

Айзек АЗИМОВ

$$F=mg$$



$$E=mc^2$$

ПОПУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ОТ АРХИМЕДОВА РЫЧАГА ДО КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ



Ц Е Н Т Р П О Л И Г Р А Ф

Айзек АЗИМОВ

ПОПУЛЯРНАЯ
ФИЗИКА

Н.В.В. 2017 Киев

Айзек АЗИМОВ

ПОПУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ОТ АРХИМЕДОВА РЫЧАГА ДО КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ



Москва
ЦЕНТРОЛИГРАФ
2006

ББК 22.3г
А35

Оформление художника И.А. Озерова

- А35 Азимов Айзек**
Популярная физика. От архимедова рычага до квантовой механики / Пер. с англ. М.Г. Барышникова. — М.: ЗАО Центрполиграф, 2006. — 752 с.

Эта книга состоит из трех частей и охватывает период истории физики от Древней Греции и до середины XX века. В последней части Азимов подробно освещает основное событие в XX столетии — открытие бесконечно малых частиц и волн, предлагает оригинальный взгляд на взаимодействие технического прогресса и общества в целом. Книга расширяет представления о науке, помогает понять и полюбить физику.

ББК 22.3г

- © Перевод, ЗАО «Центрполиграф», 2006
- © Художественное оформление, ЗАО «Центрполиграф», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Загадочные формулы, таинственные знаки, сложные механизмы взаимодействия, объясняющие все — от зарождения нашей Вселенной до разрушения межатомных связей. Только мир физики охватывает столь широкий диапазон знаний, и именно это делает его таким привлекательным для изучения.

Известный популяризатор науки, ученый и писатель-фантаст Айзек Азимов в своей книге «Введение в физику» излагает основные концепции современной физики. Читателю предоставляется возможность проследить интереснейшую историю развития этой науки — историю вечного поиска законов и правил, которые управляют нашей планетой. Данный труд, состоящий из трех частей, охватывает огромный период в развитии физики от Древней Греции и до середины XX века. В первой части — «Движение, звук и теплота» — рассматривается теоретическое развитие и установление определенных концепций с ньютоновской точки зрения. Во второй части, «Свет, магнетизм и электричество», показано развитие этих концепций начиная с XIX века, когда физика положила начало научно-технической революции. Физика воистину была «интеллектуальным топливом» индустриализации. Здесь же автор знакомит читателя с теорией относительности Альберта Эйнштейна и квантовой теорией Макса Планка. В заключительной части — «Электрон, протон и нейтрон», — Азимов освещает основное событие в физике в XX столетии — открытие бесконечно малых частиц и волн, а также рассуждает о взаимодействии технического прогресса и общества в целом.

Книга написана простым, доступным языком и содержит необходимый минимум формул и уравнений. Однако, используя нестандартный подход ко многим проблемам, автор приводит собственные, а не классические доказательства некоторых законов, демонстрируя оригинальный взгляд на физические явления, поэтому не рекомендуется использовать этот труд в качестве учебного пособия. Автор также придерживается «английской» системы измерений, что не всегда является удобным для русского читателя. Но это ни в коей мере не умаляет ценности данной книги — такого всеобъемлющего обзора современной физики для широкого круга читателей не создавал до Айзека Азимова никто.

ТАБЛИЦЫ ПЕРЕВОДА РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИН

ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ

| Единица | мм | м |
|---------|---------|---------|
| 1 дюйм | 25,4 | 0,0254 |
| 1 фут | 304,8 | 0,3048 |
| 1 ярд | 914,4 | 0,9144 |
| 1 миля | 0,86898 | 1609,34 |

ЕДИНИЦЫ ПЛОЩАДИ

| Единица | кв. см | кв. м |
|------------|--------|--------|
| 1 кв. дюйм | 6,4516 | — |
| 1 кв. фут | 929 | 0,0929 |
| 1 кв. ярд | 8361 | 0,8361 |
| 1 кв. миля | — | — |
| 1 кв. см | 1 | — |
| 1 кв. м | 100 | 0,01 |
| 1 ар | — | 100 |
| 1 га | — | — |

ЕДИНИЦЫ ОБЪЕМА

| Единица | куб. см | куб. дм (л) | куб. м |
|------------------|---------|-------------|---------|
| 1 куб. дюйм | 16,3871 | 0,01639 | — |
| 1 куб. фут | — | 28,3168 | 0,02832 |
| 1 куб. ярд | — | 764,555 | 0,76456 |
| 1 галлон (англ.) | 4546,09 | 4,54609 | — |
| 1 галлон (амер.) | 3785,47 | 3,78547 | — |
| 1 куб. см | 1 | 0,001 | — |
| 1 куб. дм (л) | 1000 | 1 | 0,001 |
| 1 куб. м | — | 1000 | 1 |

ЕДИНИЦЫ ЭНЕРГИИ

| Единица | Дж | кВт·ч | кВт·м | л. с.·ч | ккал |
|-----------|---------------------|------------------------|---------|------------------------|------------------------|
| 1 Дж | 1 | $277,8 \cdot 10^{-9}$ | 0,10197 | $377,67 \cdot 10^{-9}$ | $238,85 \cdot 10^{-6}$ |
| 1 кВт·ч | $3,6 \cdot 10^6$ | 1 | 367,098 | 1,35962 | 859,85 |
| 1 кВт·м | 9,80665 | $2,7243 \cdot 10^{-9}$ | 1 | $277,8 \cdot 10^{-9}$ | $2,342 \cdot 10^{-3}$ |
| 1 л. с.·ч | $2,6478 \cdot 10^6$ | 0,735499 | 270,000 | 1 | 632,369 |
| 1 ккал | 4186,8 | $1,163 \cdot 10^{-3}$ | 426,935 | $1,581 \cdot 10^{-3}$ | 1 |

ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ

| Единица | Вт | кВт | кВт·м/с | л. с. | ккал/с |
|-----------|---------|-----------------------|---------|------------------------|-----------------------|
| 1 Вт | 1 | 0,001 | 0,10197 | $1,3596 \cdot 10^{-3}$ | $238,8 \cdot 10^{-6}$ |
| 1 кВт | 1000 | 1 | 101,97 | 1,3596 | $238,8 \cdot 10^{-3}$ |
| 1 кВт·м/с | 9,80665 | $9,807 \cdot 10^{-3}$ | 1 | $13,33 \cdot 10^{-3}$ | $2,342 \cdot 10^{-3}$ |
| 1 л. с. | 735,499 | 0,735499 | 75 | 1 | 0,17567 |
| 1 ккал/с | 4186,8 | 4,1868 | 426,935 | 3,6925 | 1 |

ПОПУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ОТ АРХИМЕДОВА РЫЧАГА ДО КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Часть первая

ДВИЖЕНИЕ, ЗВУК И ТЕПЛОТА

Глава I

ПОИСК ЗНАНИЯ

От философии к физике

Ученые Древней Греции были первыми из известных нам, кто сделал попытку тщательного исследования Вселенной: они проводили систематический сбор знаний, получаемых посредством человеческого восприятия. Те, кто начал этот рационалистический поиск понимания без участия интуиции, вдохновения, озарений или других нерациональных источников информации, называли себя «философами» (это слово в греческом языке буквально означает «любители мудрости»)¹.

По направлению изучения философия могла быть направлена вовнутрь — в поисках понимания человеческого поведения, этики и морали, побуждений и ответных реакций или наружу — на исследование Вселенной, находящейся вне осязаемой оболочки человеческого разума, короче говоря на исследование «природы».

Философы, относившиеся ко второму направлению, назывались «естественными философами». И в течение многих столетий после периода расцвета Греции изучение явлений природы продолжает называться естественной философией. Более современное слово, которое мы используем вместо него, — «наука» (происходит от латинского слова, означающего «чтобы знать»), стало широко распространенным только в середине XIX столетия. И даже в наши дни самая высокая универ-

¹ Несомненно, и до греков встречались мудрецы, и даже рационалисты, но, к несчастью, они нам неизвестны. Кроме того, труды предгреческих рационалистов пропали даром, потому что лишь греческая культура смогла оставить за собой рационалистическую философию, послужившую основой для современной науки.

ситетская степень, присвоенная за достижения в области наук, называется «доктор философии».

Слово «естественный» (*natural*) имеет латинское происхождение, таким образом, термин «естественная философия» (*natural philosophy*), который состоит наполовину из латинского и наполовину из греческого, обычно подвергался нападкам «борцов за чистоту терминологии». Греческое слово, означающее «естественный», — *hysikos*. Таким образом, то, что мы привыкли называть современной наукой, более точно может быть описано термином «физическая философия».

Термин «физика» являлся просто краткой формой термина «физическая философия», или «естественная философия», и в его оригинальном значении включал в себя всю науку.

Однако поскольку области исследований науки расширялись и углублялись и объем собранной информации все возрастал, то те философы, которые охватывали более пространные области изучения, вынуждены были специализироваться, выбирая какой-то один сегмент в качестве точки приложения научных усилий. Эти сегменты получили свои собственные имена и со временем стали отделять себя от общего универсального домена физики.

Таким образом, изучение абстрактных взаимоотношений форм и чисел стало называться «математикой»; изучение положений и движений небесных тел — «астрономией»; изучение физических особенностей земли, на которой мы живем, — «геологией»; изучение состава и взаимодействия материалов — «химией»; изучение структуры, функций и взаимосвязи живущих на Земле организмов — «биологией» и так далее.

Термин «физика» в те времена стал использоваться для описания особенностей изучения тех частей природы, которые остались после отделения перечисленных выше наук. По этой причине слово «физика» должно было охватить довольно разнотипную и неоднородную область изучения природы, и соответственно его четкое определение довольно сложно.

«Оставшееся» включает в себя такие явления, как движение, теплота, свет, звук, электричество и магнетизм. Все они являются формами «энергии» (термин, о котором я позже расскажу значительно больше). Таким образом, изучение физики может считаться прежде всего рассмотрением взаимосвязей между энергией и материей.

Данное определение может интерпретироваться или узко, или широко. Если интерпретировать его достаточно широко, то границы физики могут быть раздвинуты так, что эта наука будет включать в себя значительную часть из «соседних» с ней

наук. Действительно, как показал опыт XX столетия, такое положение возникает достаточно часто.

В конце концов, разделение науки на отдельные «сегменты» — искусственное и сделано человеком в целях собственного удобства. В то время, когда уровень знания был еще довольно низок, такое разделение было полезным и казалось естественным. Можно было изучать астрономию или биологию независимо от химии или физики и, наоборот, изучать химию или физику изолированно от других наук. Со временем в связи с накопленной информацией границы различных частей науки сблизились, встретились и, наконец, пересеклись. Методы, используемые при изучении одной науки, стали применимы и более того — новаторскими в приложении к другим наукам.

В последней половине XIX столетия физические методы сделали возможным определить химический состав и физическую структуру звезд, что служило началом рождения новой науки — «астрофизики». Изучение колебаний, происходящих в толще земли и вызванных землетрясениями, дало начало «геофизике». Изучение химических реакций физическими методами открыло постоянно расширяемое поле «физической химии», а последняя, в свою очередь, проникла в изучение биологии, произведя на свет то, что мы теперь называем «молекулярная биология».

Что касается математики, которая была инструментом, который больше использовали физики (естественно, только вначале и по сравнению с химией и биологией), то по мере того, как поиск основополагающих принципов становился более тонким и основательным, стало практически невозможно уловить различия между «чистой математикой» и «теоретической физикой».

Однако в этой книге я буду рассматривать физику с точки зрения ее традиционной, узкой специализации, избегая (по возможности) тех ее областей, которые вторгаются на территории соседних наук.

Представление греков о движении

Одним из первых явлений, которое стали рассматривать любопытные греки, было движение. На первый взгляд можно предположить, что движение является признаком жизни; в конце концов, люди и, например, кошки свободно двигаются, а камни и неживые тела — нет. Можно придать камню движение, но обычно посредством импульса, данного ему живым существом.

Однако этот первоначальный взгляд — не верен, так как имеется много примеров движения, в которые жизнь не вовлечена. Движение небесных тел или порыв ветра происходят сами по себе. Конечно, можно было бы предположить, что небесные тела передвигаются ангелами и что ветер является дыханием бога штормов, и действительно, такие объяснения были общеприняты в большинстве обществ в течение многих столетий. Греческие философы, однако, принимали только те объяснения и вовлекали в них только ту часть Вселенной, которая могла бы быть объяснена на основе явлений, поддающихся определению человеческими чувствами. Это исключило и ангелов, и штормовых богов. Кроме того, имелись и менее глобальные примеры движения. Дым костра поднимался вверх. Камень, отпущенный в воздушном пространстве, быстро падал вниз, хотя он не получал никакого импульса в этом направлении. Конечно же даже наиболее мистически настроенный индивидуум не был готов предположить, что каждый клуб дыма, каждый кусочек падающего материала содержит маленького бога или демона, заставляющего его двигаться туда или сюда.

Греческие понятия по данному вопросу были обобщены в достаточно сложной форме философом Аристотелем (384—322 до н. э.). Он утверждал, что каждая из различных фундаментальных видов материи («элементов») имеет свое собственное естественное место во Вселенной. Элемент «земля», в который были включены все окружающие нас твердые материалы, естественно, был расположен в центре Вселенной. Вся материальная, «земляная», часть Вселенной собралась там и сформировала мир, в котором мы живем. В том случае, если бы каждая часть элемента «земля» расположилась так близко к центру, насколько это возможно, Земля должна была бы принять форму сферы (это в действительности было одной линией в рассуждениях, использованных Аристотелем, для доказательства того, что земля имеет сферическую форму, а не плоскую).

Элемент «вода» располагался естественным образом относительно поверхности сферы «земли», элемент «воздух» располагался естественным образом относительно поверхности сферы «воды», и элемент «огонь» располагался естественным образом вне поверхности сферы «воздуха».

Понятно, что можно вывести любую схему строения Вселенной, но в то же время понятно, что не имеет смысла тратить время на то, что ни в коей мере не подтверждается реальностью, то есть на то, что не находит подтверждения благодаря нашим органам чувств. В данном случае наблюдения на первый взгляд поддерживают аристотелевское представление о Вселенной. Наши

чувства сообщают нам, что Земля действительно находится в центре Вселенной; водное покрытие в виде океанов и морей занимает большую часть Земли; воздух простирается относительно земли и моря и в воздушных просторах даже имеются свидетельства существования сферы огня, которая проявляет себя во время штормов и гроз в виде молнии.

Рассуждение Аристотеля о том, что каждая форма материи имеет свое естественное место во Вселенной, — типичный пример «аксиомы». Аксиому принимают без доказательств, некорректно говорить об истинности или ложности аксиомы только потому, что не доказано иное. (Если имелось бы доказательство иного, то это больше бы не было аксиомой.) Аксиомы лучше рассматривать с точки зрения их полезности или бесполезности в зависимости от того, насколько выводы из них соотносятся с реальностью. Если две различные аксиомы или серии аксиом приводят к выводам, которые соответствуют действительности, то более полезна та, которая объясняет больше.

С другой стороны, кажется очевидным, что именно аксиомы являются наиболее слабыми точками в любом аргументированном споре, поскольку они должны быть приняты «на веру», в то время как основой философской науки является ее рационализм. Но ведь для того чтобы начать, нужно иметь «отправную точку», то есть аксиому. Мы должны постараться ограничить себя минимальным количеством аксиом, насколько это возможно. Поэтому из двух теорий, которые объясняют одни и те же области Вселенной, более правильной следует считать ту, которая основывается на меньшем количестве аксиом. Эту точку зрения высказал средневековый английский философ Уильям Оккам (1300?—1349?), и в честь его метод уменьшения ненужного количества аксиом назван «бритвой Оккама».

Аксиома о «естественном месте» казалась грекам весьма полезной. Предположив, что такое естественное место существует, казалось разумным предположить, что всякий раз, когда объект оказывается вне своего естественного места, он старается вернуться в него, как только представится случай. Например, камень, который мы держим в руке, в воздухе дает нам понять о своем «желании» вернуться на поверхность земли — свое естественное место — силой, которой он давит на нашу руку. Из этого можно сделать вывод, что он имеет вес. Если мы перестанем поддерживать камень рукой, то он быстро начнет перемещаться к своему естественному месту, то есть падать вниз. При помощи такого же рассуждения мы можем объяснить, почему языки огня стремятся вверх, почему галька пада-

ет сквозь воду на дно и почему воздушные пузыри поднимаются сквозь воду вверх.

Ту же аргументацию можно использовать, чтобы объяснить, почему идет дождь. Когда под действием тепла солнца вода испаряется («превращается в воздух», как сказали бы древние греки), пары быстро поднимаются вверх в поиске своего естественного места. Но как только те же пары снова преобразуются в жидкость, воду, последняя падает на землю в виде капель в поисках своего естественного места.

Из аксиомы о «естественном месте» можно сделать и дальнейшие выводы. Как известно, одни объекты тяжелее других. Более тяжелый объект «толкает» руку вниз с большим «рвением», чем это делает более легкий объект. Конечно же если освободить каждый из них, то более тяжелый объект выразит свое большее «рвение» возвратиться на свое естественное место, падая быстрее, чем более легкий объект. Так что Аристотель поддерживал и это, действительно кажущееся естественным, заключение, потому что легкие объекты типа перьев, листьев и снежинок дрейфовали вниз медленно, в то время как камни или кирпичи падали быстро.

Но может ли эта теория выстоять против искусственно созданных трудностей? Например, объект может быть вынужден покинуть свое естественное место, как в случае, когда мы бросаем камень в воздух. Первоначально движение камня вызвано мускульным импульсом, но, как только камень отделяется от руки, она больше не прикладывает импульс к нему. Почему же тогда камень сразу не возобновляет свое естественное движение и не падает на землю? Почему он продолжает подниматься в воздух?

Аристотель объяснял это тем, что данный импульс от камня был перелан воздуху и что воздух как бы несет камень. Но поскольку импульс передается от точки к точке, в воздухе он слабеет, и начинает возобладать естественное движение камня. Восходящее движение камня замедляется и в конечном счете превращается в нисходящее движение, пока, наконец, камень не возвратится на свое естественное место — на землю. Сила руки или катапульты не может в конечном счете преодолеть естественное движение камня. (Как говорится: «Кто поднялся — упадет» — *Whatever goes up must come down*.)

Из этого следует, что вынужденное движение (отрыв от естественного места) должно неизбежно уступить естественному движению (обратно к естественному месту) и что естественное движение в конечном счете приведет объект к его естественному месту. Оказавшись там, объект прекратит перемещаться, так

как ему некуда больше двигаться. Поэтому состояние «покоя», или недостаток движения, является естественным состоянием любого объекта.

Это также соотносится с наблюдением, что все брошенные объекты возвращаются на землю и останавливаются; вращение или скольжение объектов тоже останавливается и даже живые объекты не могут двигаться вечно. Если мы поднимаемся в гору, то делаем это с усилием, и, поскольку импульс в наших мускулах постепенно слабеет, мы вынуждены периодически отдыхать. Даже самые слабые движения требуют некоторого усилия, и импульс, находящийся в пределах каждого живого существа, в конечном счете бывает растрочен. Живой организм затухает и возвращается к естественному состоянию покоя. («Все люди смертны».)

Но как же быть с небесными телами? В отношении их позиция кажется весьма отличной от той, с которой мы рассматривали объекты на земле. Естественное движение небесных тел кажется круговым, в отличие от движения вверх-вниз земных тел, и они не кажутся приближающимися или удаляющимися от земли.

Аристотель мог только заключить, что небеса и небесные тела сделаны из материи, которая не была ни землей, ни водой, ни воздухом, ни огнем. Этот пятый «элемент» он назвал «эфир» (греческое слово, означающее «сверкание», ведь, как известно, небесные тела часто испускают свет).

Естественное место пятого элемента было вне сферы огня. Почему же тогда, несмотря на то что божественные тела находились в своем естественном месте, они не оставались в покое? Некоторые школяры в конце концов высказали предположение, что небесные тела движутся под воздействием ангелов, которые катают их по небесам, но Аристотеля не могли удовлетворить такие легкие объяснения. Вместо этого он был вынужден ввести новую аксиому, предполагающую, что законы, управляющие движением небесных тел, отличаются от законов, управляющих движением земных тел. Если естественным состоянием земных тел является покой, то на небесах естественным состоянием является бесконечное круговое движение.

Недостатки в теории

Я так подробно рассматриваю представление греков о движении потому, что это была физическая теория, разработанная одним из самых великих умов в истории человечества. Эта те-

ория, казалось, объясняла так много, что она была признана большими учеными на протяжении более чем двух тысяч лет; однако в конце концов все ее положения были заменены другими теориями, которые различались с ней практически по всем пунктам.

Аристотелевское представление Вселенной казалось таким логическим и верным. Почему же тогда оно было заменено? А если было неверным, то почему так много людей в течение такого долгого времени полагали, что оно верно? И что же в конечном счете случилось такое, что заставило их изменить свое мнение относительно правильности теории строения мира «по Аристотелю»?

Метод «сомнения в любой теории» (уважаемый и установленный еще в давние времена) показывает, что из постулатов Аристотеля могут быть выдвинуты два противоречащих друг другу заключения.

Например, камень, брошенный в воду, падает более медленно, чем тот же самый камень, брошенный в воздух. Можно бы было сделать вывод, что чем тоньше материя, сквозь которую падает камень, тем быстрее он движется по пути к своему естественному месту. Но если на пути камня нет вообще никакой материи («вакуум» — от латинского слова, означающего «пустой»), то и камень будет двигаться с бесконечно большой скоростью.

Некоторые ученые отмечали этот момент, и так как они чувствовали, что бесконечная скорость была невозможна, то утверждали, что этот аргумент доказывает невозможность существования вакуума. (Поговорка, которая возникла тогда и которую мы до сих пор употребляем: «Природа не терпит пустоты» — *«Nature abhors a vacuum»*.)

С другой стороны, согласно представлениям Аристотеля, когда камень брошен, на него воздействует импульс, проводимый воздухом, что и делает возможным движение камня в заданном направлении. Если бы воздуха не было, а был бы вакуум, не существовало бы ничего, что могло бы переместить камень. Хорошо, что же тогда бы делал камень в вакууме: перемещался бы с бесконечно большой скоростью или вообще не двигался? Любое утверждение кажется справедливым.

Пожалуйста, вот еще одно противоречие. Предположим, что имеются два груза: весом в один фунт и в два фунта. Позвольте им упасть. Двухфунтовый вес, являющийся более тяжелым, больше стремится достичь своего естественного места и поэтому падает быстрее, чем однофунтовый вес. Теперь положите эти два груза вместе в крепко завязанный мешок и отпустите

ик. Можно утверждать, что двухфунтовый груз будет сдержан в этих гонках вниз своим менее торопливым однофунтовым соседом. Таким образом, средняя скорость падения будет промежуточная — меньше, чем у двухфунтового груза, падающего в одиночку, и больше, чем у однофунтового груза, если бы он падал один.

С другой стороны, можно утверждать, что двухфунтовый груз и однофунтовый груз вместе сформировали единую систему, весящую три фунта, которая должна падать более быстро, чем один двухфунтовый груз. Хорошо, тогда все-таки система падает быстрее или медленнее, чем двухфунтовый груз? Похоже, что и здесь две различные, но одинаково справедливые точки зрения на один и тот же вопрос.

Такое более внимательное рассмотрение указывает на слаботи в теории, но в реальности оно редко приводит к ее отрицанию. Сторонники теории обычно выдвигают контрдоводы. Например, можно сказать, что в вакууме естественное движение становится бесконечным по скорости, в то время как принудительное движение становится невозможным. Можно было бы доказывать, что скорость падения двух связанных весов зависит от того, насколько сильно и прочно они скреплены, и так далее.

Второй метод испытания теории (который оказывается гораздо более действенным) состоит в том, чтобы, получив необходимое заключение из теории, затем тщательно проверить его на практике.

Например, двухфунтовый объект осуществляет давление на руку в два раза сильнее, чем однофунтовый. Достаточно ли этого, чтобы сказать, что двухфунтовый объект упадет быстрее, чем однофунтовый? Если двухфунтовый объект «показывает» в два раза большее «рвение» возвратиться к своему естественному месту, говорит ли это о том, что он должен падать в два раза быстрее? Почему бы не проверить этот факт? Почему бы не получить точные данные и не сравнить их, чтобы выяснить: действительно ли двухфунтовый объект падает в два раза быстрее однофунтового? Если данные не совпадут, то, конечно, греческую теорию движения следует пересмотреть. Если, с другой стороны, двухфунтовый вес действительно падает в два раза быстрее, то это послужит лишним подтверждением греческой теории движения.

И все же такое преднамеренное испытание (или, как мы его теперь называем, — «эксперимент») не было проведено не только Аристотелем, но и в течение двух тысяч лет после него. Причина этого двойственна. Во-первых, теоретический аспект.

Древние греки достигли самых больших успехов в геометрии, которая имеет дело с абстрактными концепциями типа точек нулевого размера и прямых линий, не имеющих ширины. Они достигли результатов большой простоты и общности, которых они не могли бы получить, измеряя реально существующие объекты. Это привело, в частности, к возникновению мнения, что реальный мир груб, неправильно устроен и что, основываясь на нем, нельзя разрабатывать абстрактные теории Вселенной. Безусловно, были древние греки, которые экспериментировали и получали важные заключения именно в результате этих экспериментов; например, Архимед (ок. 287—212 до н. э.) и Герон (начало I века н. э.). Однако и в древние, и в Средние века была более широко принята форма вычитания из нескольких предположений по сравнению с испытанием экспериментированием.

Вторая причина была чисто практическая. Эксперимент не всегда столь же легко поставить, как это можно было бы предположить. Нетрудно проверить скорость падающего тела в наш век секундомеров и электронных методов измерения коротких интервалов времени. Но всего лишь три столетия назад не существовало никаких часов, приспособленных для измерения коротких интервалов времени, и немногие хорошие измерительные приборы любого типа ценились на вес золота.

Положив в основу «чистую» теорию, древние философы действительно сделали то, на что они больше всего были способны, что же касается их кажущегося презрения к экспериментированию — тут типичный случай, когда из вынужденной необходимости делают достоинство¹.

Ситуация медленно начала изменяться только в конце Средневековья. Все большее число ученых начали оценивать значение экспериментирования как метода испытания теорий и повсеместно начали пробовать разрабатывать методики проведения экспериментов.

Экспериментаторы не имели значительного влияния на науку вплоть до появления на сцене итальянского ученого Галилео Галилея (1564—1642). Он не изобретал экспериментирования, но сделал его показательным, захватывающим и популярным. Его

¹ И все же можно только сожалеть, что древнегреческие философы не проводили некоторых простых экспериментов, которые не требуют никаких инструментов. Например, лист тонкого папируса падает медленно. Тот же свинный лист, но смятый в маленький комочек, падает гораздо быстрее. Почему, если его вес не изменился в результате того, что его смяли, изменилась скорость его падения? Вопрос настолько же простой, насколько принципиально важный для того, чтобы вызвать изменения в греческой теории движения, что с позиций сегодняшнего дня мы считаем абсолютно правильным.

эксперименты с движением были настолько изобретательны и убедительны в доказательстве, что они не только начали разрушение аристотелевской физики, но и продемонстрировали раз и навсегда потребность науки в экспериментаторстве. Именно от Галилео (он больше известен по имени¹) и начинается отсчет даты рождения «экспериментальной науки», или просто — «современной науки».

Глава 2

ПАДЕНИЕ ТЕЛ

Наклонные плоскости

Главной трудностью, с которой столкнулся Галилео, была проблема хронометрирования. Он не имел часов, достойных своего названия, так что был вынужден импровизировать. Например, он использовал контейнер с маленьким отверстием в основании, из которого вода капала в кастрюлю с достаточной равномерностью. Узнав вес воды, которая перетекла между двумя событиями, можно узнать затраченное время.

Конечно, данный способ не подходит для измерения времени нахождения тел в «свободном падении», то есть беспрепятственном падении вниз. Свободное падение с любой разумной высоты закончится слишком быстро, и количество воды, собранной за время падения, слишком мало, чтобы сделать даже приблизительно точные замеры времени.

Поэтому Галилео решил использовать наклонную плоскость. Гладкий шар будет катиться вниз по гладкому углублению на такой плоскости с явно более низкой скоростью, чем двигался бы в свободном полете. Кроме того, если уменьшить наклон этой плоскости к горизонтали, то шар будет катиться все менее и менее быстро; при точно горизонтальной плоскости шар не будет катиться вообще (по крайней мере, из состояния покоя). Этим методом можно замедлить скорость падения до уровня, при котором даже грубые устройства измерения времени начинают вылавливать достаточно точные результаты.

Можно спросить: а может ли движение вниз по наклонной плоскости дать результаты, которые справедливо применять и для случая свободного падения? Кажется вполне разумным предположить, что может. Если что-то истинно для любого из

¹ В России же Галилео Галилей, наоборот, больше известен по своей фамилии, то есть — Галилеем. (Примеч. пер.)

углов, под которым находится наклонная плоскость, оно должно быть истинно и для свободного падения, поскольку свободное падение можно рассматривать как качение вниз по наклонной плоскости, максимально отклоненной по отношению к горизонтали, то есть под углом 90 градусов.

Например, можно легко видеть, что достаточно тяжелые шары различных весов катятся вниз по одной и той же наклонной плоскости с одной и той же скоростью. Это правило является истинным для любого угла к горизонтали, под которым отклонена наклонная плоскость. Если плоскость отклонить более резко, шары покатятся быстрее, но все они одинаково увеличат скорость своего движения и в конечном итоге покроют одно и то же расстояние за одно и то же время. Справедливо будет заключить, что свободно падающие тела пролетят равные расстояния за равное время независимо от их веса. Другими словами, тяжелое тело не будет падать более быстро, чем легкое тело, что не соответствует точке зрения Аристотеля.

(Существует известная история о том, что Галилео доказал это, бросив два объекта различного веса с наклонной Пизанской башни, и они ударились о землю одновременно. К сожалению, это — только легенда. Историки совершенно уверены, что Галилео никогда не проводил такого эксперимента, но вот голландский ученый Симон Стевин (1548—1620) производил подобные измерения за несколько лет до экспериментов Галилео. В холодном мире науки, однако, осторожные и исчерпывающие эксперименты вроде тех, что проводил Галилео с наклонными плоскостями, иногда значат больше, чем некоторые сенсационные демонстрации.)

Все же можем ли мы действительно так легко расстаться с аристотелевскими представлениями о движении? Нет никаких сомнений в справедливости утверждения того, что скорости движения шаров по наклонной плоскости равны, но, с другой стороны, не менее справедлив и тот факт, что мыльный пузырь падает гораздо медленнее, чем шарик от пинг-понга того же самого размера, и что шарик от пинг-понга падает гораздо более медленно, чем твердый деревянный шар того же самого размера.

Однако этому имеется объяснение. Объекты не падают сквозь ничто, они падают сквозь воздух, и, чтобы падать, они должны, если можно так выразиться, «раздвинуть» воздух. Мы можем принять точку зрения, что процесс «раздвигания» воздуха занимает время. Тяжелое тело осуществляет сильный нажим и легко «раздвигает» воздух, «проталкивая» его мимо себя, и поэтому не теряет фактически никакого времени. Не имеет

значения, сколько весит тело: один фунт или сотню фунтов. Однофунтовый вес испытывает такое малое сопротивление воздуха в процессе его «раздвигания», что вес в сотню фунтов едва ли может улучшить этот результат. Поэтому оба веса падают на равные расстояния за равное время¹. Действительно, легкое тело типа шарика для пинг-понга нажимает на воздух настолько мягко, что из-за этого испытывает значительное сопротивление в «раздвигании» воздуха на своем пути и поэтому падает медленно. По той же причине мыльный пузырь падает вообще еле заметно.

Можно ли использовать это объяснение «воздушного сопротивления» как соответствующее истине? Или это только выдумка, призванная объяснить неудачу обобщения Галилео для реальных условий жизни? К счастью, данный вопрос может быть проверен. Сначала предположите, что у вас есть два объекта равного веса, причем первый — сферический и компактный, а другой — широкий и плоский. Широкий плоский объект вступает в контакт с воздухом по более широкому фронту и, чтобы упасть, должен «раздвинуть» большее количество воздуха на своем пути. Поэтому он будет испытывать большее сопротивление воздуха, чем компактный сферический объект, и будет падать медленнее, несмотря на то что оба объекта имеют равный вес. Проверка показывает, что все верно. Действительно, если лист бумаги смят в шарик, то он падает быстрее, потому что он преодолевает меньшее сопротивление воздуха. Я упомянул этот эксперимент как один из тех, которые древние греки могли бы легко выполнить и благодаря которому они могли бы обнаружить, что что-то неладно с аристотелевским представлением о движении.

Еще более безошибочным тестом было бы избавиться от воздуха и позволить телам падать в вакууме. В среде, где отсутствует сопротивление воздуха, все тела, независимо от того, легкие они или тяжелые, должны падать на равные расстояния за равные промежутки времени. Галилео был убежден, что это так, но в его время проверить это было невозможно, так как не существовало способов создания вакуума. В позднейшие времена, когда вакуум уже научились создавать, эксперимент по совместному падению перышка и свинцовой глыбы, с целью подтверждения факта их одновременного приземления, стал достаточно заурядным. Таким образом, можно сказать,

¹ На самом деле имеется маленькая разница. Это не обнаруживается при падении с небольшой высоты, но становится видимым в случае, если оба веса были бы сброшены, например, с самолета. В этом случае более легкий вес был бы немного «придержан» и чуть-чуть бы отставал.

что сопротивление воздуха — вполне реальное явление, а не только средство спасения престижа.

Конечно, это поднимает вопрос, оправданно ли, ради изложения простого правила, описывать Вселенную в нереальных условиях? Правило Галилео о том, что все объекты любого веса падают на равные расстояния в равное время, может быть выражено в очень простой математической форме. Однако правило это истинно только в физическом вакууме, который фактически не существует. (Даже лучший вакуум, который мы можем создать, даже вакуум межзвездного пространства не является абсолютным.) С другой стороны, мнение Аристотеля о том, что более тяжелые объекты падают более быстро, чем легкие, — истинно, по крайней мере до некоторой степени, в реальном мире. Однако его нельзя привести к простому математическому выражению, поскольку скорость падения тел зависит не только от их веса, но также и от их формы.

Можно считать, что следует придерживаться реальности любой ценой. Однако хотя это может быть и правильно с моральной точки зрения, такой подход далеко не самый полезный и удобный. Сами греки в своей геометрии предпочли идеальный подход реальному и продемонстрировали, что гораздо больших результатов можно достигнуть рассмотрением абстрактных линий и форм, чем изучением реальных линий и форм мира; большее понимание, полученное при помощи абстракции, можно удачно применять при подходе к той самой действительности, которая игнорировалась в процессе получения знания.

Почти четыре столетия опытов, начиная с эпохи Галилео, показали, что часто более полезно отбросить из реального мира и построить «модель» изучаемой системы; в такой модели отбрасываются некоторые из усложнений, поэтому из оставшегося может быть создана простая и обобщенная математическая структура. Как только это сделано, мы можем начать восстанавливать один за другим факторы усложнения и соответственно изменять взаимоотношения. Попытка же учесть все взаимосвязи сложностей действительности без предварительной разработки упрощенной модели является настолько трудным делом, что фактически никогда не была предпринята, и мы смеем предположить, что если бы такая попытка и была предпринята, то вряд ли бы увенчалась успехом.

Таким образом, бесполезно судить, являются ли взгляды Галилео «истинными», а Аристотеля «ложными» или наоборот. В отношении скоростей падения тел имеются аргументы, которые поддерживают как одну точку зрения, так и другую. Что мы

можем сказать наверняка, так это то, что взгляды Галилео на движение, как оказалось, объяснили намного больше и в более простой форме, чем это сделали взгляды Аристотеля. Поэтому Галилеево представление о движении было гораздо более пригодным. Последнее было признано вскоре после того, как были описаны эксперименты Галилео и аристотелевская физика рухнула.

Ускорение

Если мы будем измерять расстояние, пройденное телом, катящимся вниз по наклонной плоскости, мы обнаружим, что тело последовательно покрывает все большие и большие расстояния за равные временные интервалы.

То есть мы видим, что в первую секунду тело прошло расстояние в 2 фута; в следующую секунду оно прошло уже 6 футов при полном расстоянии в 8 футов; в третью секунду — 10 футов при расстоянии в 18 футов; в четвертую секунду — 14 футов при полном расстоянии в 32 фута. Ясно, что с течением времени шар катится все более и более быстро.

Это само по себе не идет вразрез с аристотелевской физикой, поскольку теория Аристотеля не говорит ничего относительно того, как изменяется со временем скорость падающего тела. Фактически это увеличение в скорости соотносится с аристотелевским представлением, поскольку можно сказать, что, так как тело приближается к своему естественному месту, его «рвение» попасть туда усиливается, что приводит к соответствующему увеличению скорости.

Однако важность метода Галилео заключается в том, что он подошел к вопросу изменения скорости не качественным, а количественным способом. Недостаточно просто сказать «скорость увеличивается со временем». Если это представляется возможным, надо сказать, насколько она увеличивается, и постараться разработать точную взаимосвязь скорости и времени.

Например, если шар проходит 2 фута за одну секунду, 8 футов за две секунды, 18 футов за три секунды и 32 фута за четыре секунды, то, казалось бы, имеется взаимосвязь между пройденным расстоянием и квадратом затраченного на его прохождение времени. Как мы видим, 2 равно 2×1^2 , 8 равно 2×2^2 , 18 равно 2×3^2 , и 32 равно 2×4^2 . Мы можем определить эти отношения, сказав, что полное расстояние, покрытое шаром, катящимся вниз по наклонной плоскости (или объек-

том, находящимся в свободном падении) со старта из состояния покоя, — прямо пропорционально¹ квадрату затраченного времени.

Физика приняла этот акцент на точное измерение, который предложил Галилео, аналогично поступили и другие области науки, везде, где это было возможно. (Тот факт, что химики и биологи не приняли математического отношения в полной мере, как это сделали физики, не говорит о том, что химики и биологи являются менее интеллектуальными или менее точными, чем физики. На самом деле это произошло потому, что системы, изучаемые физиками, более просты, чем те, которые изучают химики и биологи, и более легко могут быть приведены к идеализированному виду, в котором их можно было бы выразить в простой математической форме.)

Теперь рассмотрим шар, который проходит 2 фута в секунду. Его средняя «скорость» (расстояние, которое он покрывает в единицу времени) на протяжении этого односекундного интервала равна двум футам, поделенным на одну секунду. Легко разделить 2 на 1, но важно запомнить, что мы также должны разделить и единицы измерения: «футы» на «секунды». Мы можем выразить это деление единиц измерения обычным способом — в виде дроби. Другими словами, 2 фута, разделенные на 1 секунду, могут быть выражены как $\frac{2 \text{ фута}}{1 \text{ секунду}}$, или 2 фута в секунду. Эта запись может быть сокращена как 2 фт/с, и обычно читается как «два фута за секунду»². Важно, чтобы использование «за» не обмануло нас, создав впечатление, что мы в действительности имеем дело с умножением. Мы имеем дело с дробью, то есть делением, и, несмотря на то что числитель и знаменатель этой дроби содержат единицы измерения, а не числа, она не перестает быть дробью.

Но вернемся к катящемуся шару... За одну секунду он проходит 2 фута при средней скорости 2 фт/с; за две секунды — 8 футов при средней скорости по полному расстоянию 4 фт/с; за три секунды — 18 футов при средней скорости по полному расстоянию 6 фт/с. И как вы можете лично убедиться, средняя скорость в течение первых четырех секунд — 8 фт/с. Средняя

¹ Когда мы говорим, что a «прямо пропорционально» b , мы имеем в виду, что увеличение b приводит к увеличению a . Когда же, наоборот, увеличение b приводит к уменьшению a (например, при повышении цены товара число продаж может уменьшиться), мы говорим тогда, что a «обратно пропорционально» b .

² В русском языке для единиц измерения скорости более принято выражение «в секунду», а не «за секунду». (Примеч. пер.)

скорость, как и сказано, находится в прямой пропорции к затраченному времени.

Здесь, однако, мы имеем дело со средними скоростями. А какова же скорость катящегося шара в каждый конкретный момент? Рассмотрим первую секунду временного интервала. В течение этой секунды шар катится со средней скоростью 2 фт/с. Он начинает двигаться с малой скоростью. На самом деле он начинает двигаться из состояния покоя — его скорость в начале движения (другими словами, после того как прошло 0 секунд) была 0 фт/с. Чтобы получить среднее значение в 2 фт/с, шар должен достичь соответственно более высокой скорости во второй половине временного интервала (то есть после начала движения). Если мы предположим, что скорость повышается плавно по времени, то из этого следует, что если скорость в начале временного интервала была на 2 фт/с меньше, чем среднее значение, то в конце временного интервала (после того как прошла еще секунда) она должна быть больше на 2 фт/с, чем среднее значение, то есть 4 фт/с.

Если следовать той же логике рассуждения, которую мы использовали для средних скоростей в течение первых двух секунд, для первых трех секунд и далее мы получим следующие значения скорости: в 0 секунд — 0 фт/с; через одну секунду (в этот момент) — 4 фт/с; через две секунды — 8 фт/с; через три секунды — 12 фт/с; через четыре секунды — 16 фт/с и так далее.

Обратите внимание на то, что после каждой секунды скорость увеличивалась точно на 4 фт/с. Такое изменение скорости со временем называется «ускорением» (от латинских слов, означающих «добавить скорость»). Чтобы определить значение ускорения, мы должны разделить увеличение скорости в течение специфического интервала времени на значение этого интервала времени. Например, если в первую секунду скорость была 4 фт/с, в то время как в четвертую секунду она была равна 16 фт/с, то за время интервала 2—3 секунды она возросла на 12 фт/с. Ускорение в этом случае равно: 12 фт/с разделить на три секунды. (Обратите внимание, что в этом случае мы делим не 12 фт/с на 3, а 12 фт/с на 3 секунды. Во всех выражениях, где есть единицы измерения, они должны быть включены в любое математическое преобразование.)

Когда мы делим 12 фт/с на 3 секунды, получаем ответ, в котором единицы измерения так же, как и числовые значения, подвергаются делению, — другими словами, 4 фт/с разделить на с. Это может быть записано в виде 4 фт/с/с (читается «четыре фута в секунду за секунду»). Как мы знаем, в алгебраиче-

ском преобразовании a/b разделить на b равно a/b , умноженному $1/b$, соответственно окончательный результат равен a/b^2 . Теперь преобразуем единицы измерения по тому же принципу, мы получим $\frac{4 \text{ фт/с}}{с}$, то есть 4 фт/с^2 (читается «четыре фута на секунду в квадрате»).

Как вы можете видеть в данном случае, если посчитаете ускорение для любого временного интервала, ответ будет всегда тот же самый: 4 фт/с^2 . Для разных наклонных плоскостей ускорение будет различно в зависимости от степени наклона, но оно останется постоянным (константой) для любой данной наклонной плоскости в любой интервал времени.

Таким образом, мы можем выразить открытие Галилео относительно падающих тел более простым и более наглядным способом. Сказать, что все тела преодолевают равные расстояния за равные промежутки времени, будет правильно; однако это не говорит ничего о том, падают ли тела с равномерными скоростями, равноускоренно или с неравномерными скоростями. Еще раз, если мы говорим, что все тела падают с равными скоростями, мы ничего не говорим относительно того, как эти скорости могут изменяться по времени.

Теперь мы можем сказать, что все тела независимо от веса (мы пренебрегаем сопротивлением воздуха) катятся вниз по наклонным плоскостям или свободно падают с равным и постоянным ускорением. Если сказанное верно, из этого следует неизбежно, что два падающих тела проходят одно и то же расстояние за одинаковое время и что в любой данный момент они падают с одной и той же скоростью (предполагая, что они начали падать в одно и то же время). Это также говорит нам о том, что скорость тел увеличивается со временем и что она увеличивается на постоянную величину.

Общепринято выражать такие взаимоотношения при помощи математических символов. При таком способе мы не вносим в них ничего существенно нового. Используя математические символы, мы выражаем именно то, что мы хотели бы сказать словами, но более кратко и более общо. Математика — язык стенографии, в котором каждый символ имеет точное и согласованное значение. Как только язык изучен, мы понимаем, что это, в конце концов, всего лишь одна из форм английского языка.

Например, мы только что рассмотрели случай ускорения 4 фт/с^2 (из состояния покоя). Это означает, что в конце первой секунды скорость объекта равна 4 фт/с , после двух секунд — 8 фт/с , после трех секунд — 12 фт/с и так далее. Короче гово-

ря, скорость равна ускорению, умноженному на время. Если мы обозначим скорость символом v , а время — символом t , мы можем сказать, что в этом случае v равна $4t$.

Но фактическое ускорение зависит от угла, под которым отклонена наклонная плоскость. Если наклонная плоскость сделана более крутой, это приведет к увеличению ускорения; если сделать ее менее крутой, то ускорение уменьшится. Для любой данной плоскости ускорение постоянно, но специфическое значение константы может очень измениться от плоскости к плоскости. Позвольте нам поэтому не привязываться к конкретному числовому значению ускорения, давайте просто обозначим это ускорение символом a . Тогда мы можем сказать:

$$v = at. \quad (\text{Уравнение 2.1})$$

Важно помнить, что такие уравнения в физике включают в себя не только числа, но и единицы измерения. Таким образом, a в уравнении 2.1 не представляет собой число, например, скажем, 4, а представляет собой число и его единицы измерения — 4 фт/с^2 — единицы измерения, соответствующие ускорению. Так же и t , которым обозначают время, представляет собой число и его единицы измерения, например три секунды (3 с). Рассчитывая at , мы умножаем 4 фт/с^2 на 3 с, перемножая единицы измерения так же, как цифры. Преобразовывая единицы измерения так, как если бы они были дробями (другими словами, как если бы мы должны были умножить a/b^2 на b), получаем произведение, равное 12 фт/с . Таким образом, умножение ускорения (a) на время (t) действительно дает нам скорость (v), а полученные единицы измерения фт/с, соответствующие скорости, подтверждают правильность нашего преобразования.

В любом уравнении в физике единицы измерения, находящиеся по обеим сторонам знака равенства, должны быть сбалансированы после того, как закончены все необходимые алгебраические преобразования. Если этот баланс не получен, то уравнение не соответствует действительности и не может быть названо верным. Если единицы измерения какого-либо из символов неизвестны, они могут быть определены посредством решения того, какой единицы недостаточно для того, чтобы сбалансировать уравнение (это иногда еще называют «анализом размерностей»).

Теперь, учитывая все предыдущее, рассмотрим шар, начинающий движение из состояния покоя и катящийся вниз по наклонной плоскости в течение t секунд. Так, шар начинает свое движение из состояния покоя, его скорость в начале времен-

ного интервала равна 0 фт/с. Согласно уравнению 2.1, в конце временного интервала во время t его скорость v равна at фт/с. Чтобы получить среднюю скорость на всем временном интервале равномерного увеличения скорости, мы берем сумму первоначальной и заключительной скорости $(0 + at)$ и делим ее на 2. Таким образом, средняя скорость в течение временного интервала равна $at/2$. Расстояние (d), которое прошел шар за это время, должно быть равно средней скорости, умноженной на время, то есть $at/2 \times t$. Поэтому мы можем написать, что

$$d = \frac{at^2}{2}, \quad (\text{Уравнение 2.2})$$

Я не буду пытаться проверять единицы измерения для каждого представленного в книге уравнения, но сделаю это для данного. Единицы измерения ускорения (a) — фт/с², а единицы измерения времени (t) — с (секунды). Поэтому итоговые единицы измерения равны $a^2 = (\text{фт/с}^2) \times \text{с} \times \text{с}$, то есть $(\text{фт} \times \text{с}^2)/\text{с}^2$, упростив это выражение, получаем просто фт (футы). От деления на 2 a^2 не изменяется, так же как с^2 , так как 2 в этом случае — «чистое число», то есть оно не имеет единиц измерения. (Так же как, если вы делите линейку длиной в фут на два, каждая половина имеет длину 12 дюймов, разделенных на 2 или на 6 дюймов. На единицу измерения это же не оказывает эффекта.) Таким образом, получающиеся единицы измерения $a^2/2$ — фт (футы), что соответствует единицам, применяемым для измерения расстояния (d)¹.

Свободное падение

Как я сказал ранее, значение ускорения (a) шара, катящегося вниз по наклонной плоскости, изменяется в соответствии с углом наклона плоскости. Чем более крутая плоскость, тем больше значение a .

В результате экспериментов показано, что для данной наклонной плоскости значение a находится в прямой пропорциональной зависимости от отношения высоты поднятого конца плоскости к длине плоскости. Если вы обозначите высоту поднятого конца плоскости как H , а длину плоскости как L , то предыдущее предложение можно выразить в математических

¹ Или, как его еще называют, — «перемещения». (Примеч. пер.)

символах как $a \propto gH/L$. Где символ \propto означает «находится в прямой пропорциональной зависимости от».

В такой прямой пропорции значение выражения на одной стороне изменяется в точном соответствии со значением выражения на другой стороне. Если H/L удваивается, то удваивается и a ; если H/L делится пополам, то пополам делится и a ; если H/L умножают на 2,529, то и a умножается на 2,529. Такой подход предполагается прямой пропорциональностью. Но предположите, что для некоего значения a значение H/L оказывается равным одной трети a . Если значение a изменится каким-либо способом, значение H/L изменится точно таким же способом, так что оно все равно остается равным третьей части значения a . В этом специфическом случае a — в три раза больше H/L , причем не только для этого набора значений, а для всех значений вообще.

Общее правило таково: если один член пропорции x находится в прямой пропорциональной зависимости от другого члена y , мы всегда можем заменить знак отношения на знак равенства, введя некоторое соответствующее постоянное значение (называемое «коэффициентом пропорциональности»), на которое нужно умножить y , чтобы получить x . Обычно вначале мы не знаем точное значение коэффициента пропорциональности. Так что имеет смысл обозначить его некоторым символом. Этот символ обычно k (от немецкого слова «Konstant»). Поэтому мы можем сказать, что если $(x \propto y)$, то $x = ky$.

Нет никакой абсолютной необходимости использовать в качестве символа для коэффициента пропорциональности именно k . Например, скорость шара, катящегося из состояния покоя, находится в прямой пропорциональной зависимости от времени t , в течение которого он катился, а расстояние, на которое он переместился, d находится в прямой пропорциональной зависимости от квадрата того же времени; поэтому $v \propto t$ и $d \propto t^2$. В первом случае, однако, мы приняли для коэффициента пропорциональности специальное название — «ускорение» — и обозначили его a , в то время как во втором случае взаимосвязь с ускорением такова, что мы обозначили коэффициент пропорциональности как $a/2$. Таким образом, мы имеем, что $v = at$ и $d = (at^2)/2$.

В случае, который мы сейчас рассматриваем, значение ускорения a находится в прямой пропорциональной зависимости от H/L , коэффициент пропорциональности удобно символизировать буквой g . Поэтому мы можем сказать:

$$a = gH/L. \quad (\text{Уравнение 2.3})$$

Обе величины — H и L измерены в футах. При делении H на L футы делаются на футы и единицы измерения пропадают. В результате мы имеем то, что отношение H/L является «чистым» числом и не привязано ни к каким единицам измерения. Но единицы измерения ускорения (a) — $\text{фт}/\text{с}^2$. Чтобы поддержать баланс единиц измерения в уравнении 2.3, необходимо, чтобы единицы измерения g также были $\text{фт}/\text{с}^2$, потому что H/L не вносит в уравнения никаких единиц измерения. Из этого мы можем заключить, что коэффициент пропорциональности g в уравнении 2.3 имеет единицы измерения как у ускорения и поэтому должен представлять собой ускорение.

Для того чтобы понять, что это значит, поднимаем выше один конец наклонной плоскости; чем более крутой мы делаем данную наклонную плоскость, чем больше высота ее поднятого конца, тем больше значение H . Длина же наклонной плоскости (L), конечно, не изменяется. Наконец, когда плоскость встала совершенно вертикально, высота поднятого конца равна полной длине плоскости, то есть H равняется L , а H/L равняется 1.

Шар, катящийся вниз по совершенно вертикальной наклонной плоскости, фактически находится в состоянии свободного падения. Таким образом, в свободном падении H/L равно 1, и уравнение 2.3 приходит к виду:

$$a = g. \quad (\text{Уравнение 2.4})$$

Все сказанное выше показывает нам на то, что g — не просто ускорение, а специфическое ускорение, которому подвергается тело, находящееся в свободном падении. Тенденция тел — иметь вес и падать на землю — результат свойства называемого «тяжестью» (*«gravity»*) (от латинского слова «тяжелый», поэтому для обозначения ускорения свободного падения используется символ « g »).

Если измерить действительное ускорение тела, катящегося вниз по любой данной наклонной плоскости, то можно получить цифровое значение g . Уравнение 2.3 может быть преобразовано в $g = aL/H$. Для данной наклонной плоскости можно легко измерить длину (L) и высоту (H) поднятого конца и, зная a , можно сразу определить g . Его значение оказывается равным 32 $\text{фт}/\text{с}^2$ (по крайней мере, на уровне моря).

До этого места я в целях поддержания дружественных отношений использовал в качестве меры расстояния футы. Это — одна из общепринятых единиц измерения расстояния, используемых в Соединенных Штатах и Великобритании, и мы привыкли к ним. Однако ученые во всем мире используют метрическую систему мер, и мы уже достаточно далеко зашли в изучение предме-

та, чтобы, как мне кажется, быть способными присоединиться к ним в этом.

Ценность метрической системы в том, что ее различные единицы измерения связаны между собой простыми и логическими отношениями. Например, в обычной системе 1 миля равна 1760 ярдам, 1 ярд равен 3 футам и 1 фут равен 12 дюймам. Преобразование одной единицы измерения в другую — всегда трудная рутинная работа.

В метрической системе единица измерения расстояния — метр. Другие единицы измерения расстояния получаются путем умножения метра на 10 или на число, кратное 10. Благодаря такой системе написания чисел преобразование одной единицы измерения в другую в пределах метрической системы может быть выполнено простым изменением положения десятичной запятой.

Кроме того, в наборе используются стандартизированные префиксы — приставки. Приставка «деци-» всегда подразумевает $\frac{1}{10}$ стандартной единицы измерения, так что дециметр — $\frac{1}{10}$ метра. Приставка «гекто-» всегда подразумевает увеличение в 100 раз стандартной единицы измерения, так что гектометр — 100 метров. То же самое действительно и для других приставок.

Сам метр имеет длину 39,37 дюйма. Это делает его эквивалентом примерно 1,09 ярда, или 3,28 фута, две другие метрические единицы измерения, наиболее часто используемые в физике, — сантиметр и километр. Приставка «санти-» подразумевает $\frac{1}{100}$ стандартной единицы измерения, так что сантиметр — $\frac{1}{100}$ метра. Он эквивалентен 0,3937 дюйма, или приблизительно $\frac{2}{5}$ дюйма. Приставка «кило-» подразумевает 1000-кратное увеличение стандартной единицы измерения, так что километр равен 1000 метрам, или 100 000 сантиметрам. Длина километра — 39,370 дюйма, то есть примерно $\frac{5}{8}$ мили. Сокращения, обычно используемые для метра, сантиметра и километра, — это м, см и км соответственно.

Секунды, как основная единица измерения времени, используются в метрической системе так же, как и в обычной системе. Поэтому, если мы хотим выразить ускорение в метрических единицах измерения, мы должны использовать для этой цели «метры в секунду за секунду», или м/с^2 . Так как 3,28 фута равняется 1 метру, мы делим 32 фт/с^2 на 3,28 и получаем, что в метрических единицах измерения значение g равно $9,8 \text{ м/с}^2$.

Еще раз напомню о важности единиц измерения. Неправильно и некорректно говорить, что «значение g равно 32» или «значение g равно 9,8». Отдельно взятое число не имеет в этой связи никакого значения. Нужно говорить или 32 фт/с^2 , или $9,8 \text{ м/с}^2$.

Эти два последних значения абсолютно эквивалентны. Числовые части выражения могут быть различны, когда мы берем их самих по себе, но когда мы добавляем единицы измерения, они становятся идентичными величинами. Ни одна из них ни в коем случае не «более истинна» или «более точна», чем другая; выражение в метрических единицах измерения просто более удобно.

Мы всегда должны знать, какие единицы измерения используются. При свободном падении a равно g , так что уравнение 2.1 может быть написано ($v = 32t$), если мы используем обычные единицы измерения, и ($v = 9,8t$), если мы используем метрические единицы измерения. При записи уравнений в краткой форме единицы измерения не включаются, поэтому всегда имеется шанс некоей путаницы. Если вы попытаетесь использовать обычные единицы измерения в уравнении ($v = 9,8t$) или метрические единицы измерения в уравнении ($v = 32t$), вы получите результаты, которые не соответствуют действительности. По этой причине правила процедуры должны быть совершенно ясными и однозначными. В данной книге, например, впредь будет считаться само собой разумеющимся, что везде используется метрическая система, кроме тех случаев, когда я специально обговариваю иное.

Таким образом, мы можем сказать, что для тел, находящихся в состоянии свободного падения, из начального состояния покоя:

$$v = 9,8t. \quad (\text{Уравнение 2.5})$$

Таким же образом, для такого тела уравнение 2.2 становится:

$$d = gt^2/2,$$

или:

$$d = 4,9t^2. \quad (\text{Уравнение 2.6})$$

В конце первой секунды, когда падающее тело пролетело 4,9 м, оно падает со скоростью 9,8 м/с. Через две секунды его перемещение уже равно 19,6 м, а скорость падения равна 19,6 м/с. Через три секунды расстояние, покрытое телом, уже равно 44,1 м, а падает оно со скоростью 29,4 м/с, и так далее¹.

¹ Поскольку данная книга не является официальным документом, я не буду знакомить вас с проблемами, которые еще необходимо решить. Я надеюсь, однако, что вы имели достаточно опыта в общении с алгеброй, чтобы понять, что уравнения в физике не только представляют существующие взаимосвязи в краткой и удобной форме, но также создают условия для более удобного решения проблемы, например найти значение специфического символа, когда значения других символов в уравнении известны или могут быть определены.

Глава 3 ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

Инерция

Работы Галилео о падающих телах были систематизированы столетием позже английским ученым Исааком Ньютоном (1642—1727), который родился, как любят указывать, в год смерти Галилео.

Ньютон систематизировал свои знания в книге «*Philosophiæ naturalis principia mathematica*» («Математические принципы естественной философии»), которая была издана в 1687 году. Книга обычно упоминается просто как «*Principia*» («Принципы»). Аристотелевская модель физической Вселенной лежала в руинах почти сотню лет, и именно Ньютон теперь заменил ее новой, более точной и более пригодной моделью. Основу новой картины Вселенной составляют три важных научных обобщения относительно движения, которые обычно называются «три закона движения Ньютона»¹.

Его первый закон движения можно выразить следующим образом:

«Тело остается в покое или, если оно уже в движении, остается в равномерном прямолинейном движении, если на него не воздействуют неуравновешенной внешней силой».

Как вы можете видеть, этот первый закон вступает в противоречие с аристотелевским предположением о «естественном месте» вместе с его заключением, что естественным состоянием объекта является состояние покоя на его естественном месте.

В ньютоновском представлении — для любого объекта не существует никакого естественного места. Везде, где объект находится вне действия какой-либо силы², он остается в покое. Кро-

¹ Важные обобщения науки — это краткие описания поведения Вселенной, которые известны тем, что охватывают все наблюдаемые случаи. Как можно с уверенностью предположить, они также охватят и все ненаблюдаемые случаи, здесь или где-нибудь в другом месте, сейчас или в любое другое время. Такие обобщения иногда называются «законами природы». Такая фраза на самом деле не отражает всей полноты понятия, так как создает впечатление искусственности закона, сопоставления с законами человеческого общества, того, что наложено и может быть аннулировано как счет штрафа, и тому подобное. Все такие аналогии вводят в заблуждение. Поэтому было бы лучше употреблять выражение «обобщения Ньютона относительно движения». Однако все называют их «законами» движения, и, если бы я делал иначе, я просто показался бы слишком эксцентричным. Однако этой сноской к вас предупредил.

² Во времена Аристотеля Земля рассматривалась как неподвижное тело, стоящее в центре Вселенной; понятие «покой» поэтому имело буквально, literalное значение. В настоящее время то, что мы обычно понимаем под

ме того, если он находится в движении без воздействия на него какой-либо силы, то он и останется в этом движении навсегда, не выражая никакого «желания» перейти в состояние покоя. (В данный момент я не даю определения понятию «сила», думаю, что вы, несомненно, уже имеете хотя бы грубое представление о том, что этот термин означает; надлежащее определение будет приведено позже.)

Эта тенденция движения (или покоя) к сохранению своего «устойчивого» состояния без воздействия некой внешней силы может рассматриваться как своего рода «лень» или нежелание перемен. И действительно, первый закон движения обычно еще называют принципом инерции, от латинского слова, означающего «безделье» или «лень». (Привычка к приписыванию человеческих побуждений или эмоций неодушевленным объектам называется «персонификация». Это плохая привычка в науке, хотя и весьма общеупотребимая, я же побаловался ею здесь только для того, чтобы объяснить слово «инерция».)

На первый взгляд принцип инерции не кажется почти столь же самоочевидным, как аристотелевское предположение о «естественном месте». Мы можем видеть собственными глазами, что перемещающиеся объекты действительно имеют тенденцию останавливаться, даже если мы не видим ничего, что могло бы остановить их. Опять же, если камень выпущен в воздушном пространстве, он начинает перемещаться и продолжает перемещаться все быстрее и быстрее, несмотря на то что мы не видим ничего, что вызывало бы это движение. Если принцип инерции верен, мы должны желать допустить присутствие неких тонких сил, которые не проявляют столь очевидно своего существования.

Например, хоккейная шайба, получив быстрый толчок, по тротуару или цементной площадке будет двигаться по прямой линии, но будет делать это с так быстро уменьшающейся скоростью, что скоро остановится. Если той же самой шайбе дают

понятие «покой», означает состояние, при котором тело находится неподвижным относительно поверхности Земли. Но мы знаем (и Ньютон также уже знал), что сама Земля находится в движении относительно Солнца и относительно собственной оси. Тело, опирающееся на поверхность Земли, поэтому в действительности не может находиться в состоянии покоя вообще. Фактически именно проблема того, что же понимается под терминами «покой» и «движение», вызвала к жизни новое представление о Вселенной в форме «теории относительности» Альберта Эйнштейна, которую он выдвинул в 1905 году. В этой книге, однако, мы не столкнемся ни с какими осложнениями, если примем допущение, что под терминами «покой» и «движение» мы подразумеваем «покой относительно поверхности Земли» и «движение относительно поверхности Земли».

тот же самый быстрый толчок, но на гладком льду, то она будет двигаться намного дальше, опять же по прямой линии, но на сей раз — с медленно уменьшающейся скоростью. Если мы еще поэкспериментируем, то достаточно быстро выясним, что чем более шершавая поверхность, по которой перемещается шайба, тем быстрее она остановится.

Кажется, что крошечные неровности грубой поверхности цепляются за крошечные неровности хоккейной шайбы и замедляют движение. Это «цепляние» одних неровностей за другие называется «трением» (*friction*) (от латинского слова, означающего «трется»), и это трение действует в качестве силы, которая замедляет движение шайбы. Чем меньше трение, тем меньше сила трения и тем медленнее уменьшается скорость шайбы. На очень гладкой поверхности, типа упомянутого выше льда, трение настолько мало, что шайба перемещается на большие расстояния. Если мы представим себе горизонтальную поверхность без трения вообще, то хоккейная шайба будет перемещаться по этой поверхности по прямой линии с постоянной скоростью, вечно.

Ньютоновский принцип инерции действует поэтому только в несуществующем, идеальном мире, в котором никаких вмешивающихся сил не существует: нет ни трения, ни сопротивления воздуха.

Далее давайте рассмотрим камень, находящийся в воздушном пространстве. Он находится в состоянии покоя, но в момент, когда мы отпускаем его, начинает двигаться. Ясно, тогда должна иметься некоторая сила, которая заставит его двигаться, так как принцип инерции требует, чтобы при отсутствии силы тело осталось в покое. Так как движение камня, если он просто опущен, происходит всегда в направлении земли, то и сила должна быть направлена туда же. Так как свойство, которое заставляет камень падать, долго называли «тяжестью» (*gravity*), было естественным назвать силу, которая вызвала это движение, «силой тяготения» (гравитационной силой), или «силой тяжести».

Поэтому казалось бы, что в доказательстве принципа инерции существует некий «порочный круг». Мы начинаем, заявляя, что тело будет вести себя некоторым способом, если на него не действует никакая сила. Затем всякий раз, когда выясняется, что тело не ведет себя таким «предсказанным» образом, мы изобретаем силу, чтобы объяснить это отклонение.

Такая круговая аргументация была бы действительно плоха, если бы мы приступали к доказательству первого закона Ньюто-

на, но мы не делаем этого. Ньютонские законы движения представляют собой предположения и определения и не требуют доказательства. В частности, понятие «инерция» — такое же предположение, как и понятие Аристотеля о «естественном месте». Однако между ними существует разница: принцип инерции доказал свою чрезвычайную полезность в изучении физики в течение почти трех столетий и не вовлек физиков ни в какие противоречия. Именно по этой причине (а не из каких-либо соображений «правды») физики продолжают держаться за законы движения.

Безусловно, новое релятивистское представление о Вселенной, выдвинутое Эйнштейном, однозначно дает понять, что в некоторых отношениях ньютоновские законы движения — только результат аппроксимации, приближение. При очень больших скоростях и очень больших расстояниях аппроксимации значительно расходятся с действительностью. Однако при обычных скоростях и расстояниях аппроксимации чрезвычайно хороши¹.

Силы и векторы

Термин «сила» происходит от латинского слова, обозначающего «силу», и мы знаем его обычное значение, когда говорим о «силе обстоятельств», «силе аргументов» или «военной силе». В физике, однако, сила определена ньютоновскими законами движения. Сила — то, при приложении чего может произойти изменение скорости движения материального тела.

Мы ощущаем такие силы обычно (но не всегда) как мускульные усилия. Мы сознаем, кроме того, что они могут быть приложены в определенных направлениях. Например, мы можем приложить силу к объекту, находящемуся в состоянии покоя, таким образом, чтобы заставить его двигаться от нас. Или мы можем приложить подобную же силу таким способом, чтобы заставить его двигаться к нам. Когда направления приложения силы ясно видны, в обычной разговорной речи мы даем таким

¹ Иногда говорят, что взгляд Эйнштейна на Вселенную «опровергает» взгляды Ньютона. Это слишком простая точка зрения. На самом деле взгляды Эйнштейна более приемлемы для более широкого диапазона обстоятельств. При обычных обстоятельствах, однако, эйнштейновское представление работает примерно идентично ньютоновскому представлению. В этой книге мы будем рассматривать только обычные обстоятельства, поэтому необходимости вовлекать теорию относительности не будет.

силам два отдельных названия. Сила, направленная непосредственно от нас, — толчок; направленная непосредственно к нам — рывок. По этой причине сила иногда определяется как «толчок или рывок», но это не является определением, а только сообщает нам, что данная сила является одним или другим видом силы.

Величина, которая обладает и размером и направлением, как сила, называется «векторной величиной» или просто — «вектором». Та же величина, которая имеет только размер, называется «скалярной величиной». Например, с расстоянием обычно обращаются как со скалярной величиной. Можно сказать, что автомобиль прошел расстояние в 15 миль — при этом не учитывается направление, в котором он путешествовал.

С другой стороны, при некоторых обстоятельствах важное значение имеет объединить направление с расстоянием. Если город В находится на 15 миль к северу от города А, то недостаточно направить автомобилиста, указав расстояние в 15 миль, чтобы он мог достигнуть города В. Необходимо определить направление движения. Если он поедет 15 миль на север, он туда доберется, если же он проедет те же 15 миль на восток (или в любом другом направлении, кроме северного), он туда не попадет. Если мы назовем комбинацию размера пройденного расстояния и направления движения «перемещением», то можно сказать, что перемещение — векторная величина (или просто — вектор).

Важность понимания различий между векторами и скалярами состоит в том, что эти два вида величин управляются по-разному. Например, при сложении скаляров достаточно использовать обычное правило сложения, преподаваемое в начальной школе. Если вы путешествуете 15 миль в одном направлении, потом — 15 миль в другом направлении, полное расстояние, пройденное вами, равно 15 плюс 15, или 30 миль. Безотносительно направления полное расстояние равно 30 миль. Если вы перемещаетесь на 15 миль на север, потом — еще на 15 миль на север, то полное перемещение составляет: север — 30 миль. Предположим, однако, что вы путешествуете 15 миль на север, а потом 15 миль на восток. Чему же тогда равно ваше полное перемещение? Как далеко, другими словами, находитесь вы от своей отправной точки? Полное расстояние, которое вы прошли, — по-прежнему те же 30 миль, но ваше окончательное перемещение: северо-восток — 21,2 мили. Если вы путешествуете на север на 15 миль, а затем на юг на 15 миль, расстояние, которое вы прошли, — по-прежнему те же 30 миль, но ваше окончательное перемещение составля-



Скаляр и вектор

ет 0 миль, поскольку вы вернулись назад к вашей отправной точке.

Таким же образом, имеется обычное приращение — скалярное и «приращение векторное». Обычное приращение $15 + 15$ — всегда равно 30; в векторном приращении $15 + 15$ может быть равно чему угодно в пределах от 0 до 30, в зависимости от обстоятельств.

Так как сила — вектор, две силы складываются вместе согласно правилам сложения векторов. Если одна сила прикладывается к телу в одном направлении, а другая, равная ей сила прикладывается в противоположном направлении, сумма этих двух сил равна нулю; в таком случае, несмотря на то что силы приложены, тело, к которому они приложены, не изменяет свою скорость. Если оно находится в состоянии покоя, то оно и остается в покое. Фактически в каждом случае, когда тело в реальном мире находится в состоянии покоя, мы можем быть уверенными, что это не подразумевает, что не имеется никаких сил, которые могли бы изменить его состояние. Всегда на него действуют какие-либо силы (сила тяготения, как минимум). Если тело находится в состоянии покоя или постоянного движения, то это потому, что имеется более чем одна сила, и векторная сумма всех приложенных сил равна нулю.

Если векторная сумма всех приложенных к телу сил не равна нулю, то имеется неуравновешенная сила (упомянутая в моем определении первого закона Ньютона), или суммарная сила. Надо понимать, что всякий раз, когда я говорю о силе, приложенной к телу, я подразумеваю равнодействующую (результатирующую) силу.

Специфическая сила может оказывать один из нескольких эффектов на перемещающееся тело. Сила тяжести, например, направлена вниз, к земле, и падающее тело, перемещающееся в направлении гравитационного притяжения, движется со все возрастающей скоростью, испытывая при этом ускорение в $9,8 \text{ м/с}^2$.

Тело, брошенное вверх, наоборот, перемещается в направлении, противоположном направлению силы тяжести. Следовательно, его как будто тянет назад силой, заставляя перемещаться все медленнее. Это, наконец, приводит к тому, что тело останавливается, полностью изменяет свое направление движения и начинает падать. Такое изменение скорости может называться «замедлением» или «отрицательным ускорением». Однако было бы удобно, если бы специфическая сила, как та, которую мы рассматриваем, производила бы специфическое ускорение. Чтобы избежать разговоров о замедлении, мы вместо этого будем говорить об отрицательной скорости.

Другими словами, будем считать, что скорость является вектором. Это означает, что движение со скоростью 40 м/с вниз — не идентично движению со скоростью 40 м/с вверх. Самый простой способ обозначить различия между противоположными величинами состоит в том, чтобы обозначить одну величину положительным, а другую отрицательным значением. Поэтому будем говорить, что нисходящее движение равно $+40 \text{ м/с}$, а восходящее равно -40 м/с .

Так как нисходящая сила порождает и нисходящее ускорение¹ (ускорение также является вектором), мы можем выразить размер ускорения, вызванного действием силы тяжести, не как просто $9,8 \text{ м/с}^2$, но и как $+9,8 \text{ м/с}^2$.

Если тело перемещается со скоростью $+40 \text{ м/с}$ (вниз, другими словами), эффект ускорения должен увеличить это число. Сложение двух положительных чисел векторным способом дает результат, аналогичный полученному от обычного сложения, поэтому после первой секунды тело перемещается со скоростью $+49,8 \text{ м/с}$, после второй секунды $+59,6 \text{ м/с}$ и так далее. Если, с другой стороны, тело перемещается со скоростью -40 м/с (вверх), векторное сложение положительной и отрицательной величин аналогично обычному вычитанию, по-

¹ Мы знаем из опыта, что, если оттолкнем от себя объект, он перемещается от нас; если же он уже перемещается, то это заставляет его перемещаться еще более быстро. Таким же образом, чтобы остановить перемещающееся тело, мы всегда прикладываем силу в направлении, противоположном его движению. Опыт подсказывает нам, что ускорение, произведенное силой, направлено в ту же сторону, что и сила.

сколько изменяется только сама величина. Таким образом, после первой секунды тело будет перемещаться со скоростью $-30,2$ м/с, после двух секунд $-20,4$ м/с и после четырех секунд $-0,8$ м/с. Вскоре после четырехсекундной отметки тело достигнет скорости 0 м/с, и в этой точке оно придет к мгновенной остановке. Тогда оно начнет падать, и после пяти секунд его скорость будет $+9,0$ м/с.

Как мы можем видеть, ускорение, вызванное силой тяжести, одно и то же независимо от того, перемещается ли тело вверх или вниз, и все же имеются различия в этих двух случаях. Тело покрывает все большее расстояние за каждую секунду нисходящего движения, но все меньшее расстояние за каждую секунду восходящего движения. Величина расстояния, которое проходит тело за единицу времени, мы называем «скоростью»¹.

В разговорной речи скорость и векторная скорость — синонимы, другое дело — в физике. Скорость — скалярная величина и не включает в себя направление. Объект, перемещающийся на север со скоростью 16 м/с движется с той же скоростью, что и объект, перемещающийся на восток со скоростью 16 м/с, но эти два объекта перемещаются с различной векторной скоростью. При определенных обстоятельствах можно направить силу таким образом, чтобы заставить тело двигаться кругами. Скорость в таком случае может не изменяться вообще, но векторная скорость (которая включает в себя направление) будет постоянно меняться.

Из этих двух терминов термин «векторная скорость» используется физиками намного чаще, поскольку это — более широкий и более удобный термин. Например, мы могли бы определять силу как «то, что изменяет скорость тела или направление его движения, или и то и другое» или как «то, что изменяет вектор скорости тела» — это более краткая, но сохраняющая первоначальное значение фраза.

Так как изменение в скорости — это ускорение, мы могли бы также определять силу как «то, что прикладывает ускорение к телу, причем ускорение и сила приложены в одном том же направлении».

¹ В английском языке, в отличие от русского, для обозначения термина «скорость» служат слова «speed» (скорость) и «velocity» (векторная скорость). Автор поясняет различие в смысле этих двух вариантов английского обозначения термина. В русских же учебниках физики обычно говорят о скорости только как о векторной величине. В данной книге автор в дальнейшем практически всегда под термином «скорость» понимает векторную скорость. (Примеч. пер.)

Масса

Первый закон Ньютона объясняет концепцию силы, но, чтобы позволить нам измерить величину силы, необходимо еще что-то. Если мы определяем силу как то, что порождает ускорение, казалось бы логичным измерить размер силы размером ускорения, которое ее вызывает. Это имеет смысл, когда мы ограничиваем себя рассмотрением одного специфического тела, например баскетбольного мяча. Если мы толкаем баскетбольный мяч по земле с постоянной силой, он перемещается все быстрее и после десяти секунд такого перемещения развивает скорость, например, 2 м/с. Его ускорение — 2 м/с поделить на 10 секунд — 0,2 м/с². Но если вы опять начнете с нуля и будете толкать мяч не так сильно, то после десяти секунд баскетбольный мяч будет перемещаться со скоростью только 1 м/с и поэтому подвергнется ускорению, равному только лишь 0,1 м/с². Так как в первом случае ускорение в два раза больше, чем во втором, кажется справедливым предположить, что и сила в первом случае была в два раза больше, чем во втором.

Но если бы вы попробовали применить те же самые силы к твердому пушечному ядру вместо баскетбольного мяча, то обнаружили бы, что пушечное ядро не будет подвержено таким же ускорениям, как указаны выше. Потребуется применить гораздо большую силу для того, чтобы вообще заставить пушечное ядро двигаться.

Опять же, когда баскетбольный мяч катится со скоростью 2 м/с, вы можете достаточно легко его остановить. Изменение скорости с 2 м/с до 0 м/с требует приложения силы, и вы вполне можете создать достаточную силу, чтобы остановить баскетбольный мяч. Или вы можете пнуть баскетбольный мяч во время его движения и таким образом заставить его изменить направление движения. Пушечное же ядро, перемещающееся со скоростью в 2 м/с, однако, может быть остановлено только приложением очень большого усилия, и, если пнуть его во время движения, это изменит его направление весьма незначительно (а вы отобьете ногу).

Пушечное ядро, другими словами, ведет себя так, как если бы оно обладало большим количеством инерции, чем баскетбольный мяч, и поэтому требует соответственно большего количества силы для получения заданного ускорения. Ньютон использовал термин «масса», чтобы указать величину инерции, которой обладает тело. Таким образом, его второй закон движения гласит:

«Ускорение, полученное в результате действия какой-либо силы, действующей на тело, — прямо пропорционально величине этой силы и обратно пропорционально массе тела».

Как я уже объяснил, когда x считают прямо пропорциональным к y , это означает, что $x = ky$. С другой стороны, если мы говорим, что x является обратно пропорциональным к другой величине, например z , то мы подразумеваем, что любое увеличение z приводит к уменьшению x на соответствующую величину, и наоборот. Таким образом, если z увеличена в три раза, x получается равным $1/3$; если z увеличена в одиннадцать раз, x получается равным $1/11$ и так далее. Математически это понятие обратной пропорции наиболее просто может быть выражено как $x = 1/z$, тогда, когда z равно 3, x равна $1/3$; когда z удваивается до 6, x в два раза уменьшается и становится равным $1/6$ и так далее. Мы можем заменить пропорциональность на равенство, умножив какую-либо часть на константу таким образом, чтобы величина x была обратно пропорциональна z , то есть $x = k/z$. Но если x является одновременно прямо пропорциональной к y и обратно пропорциональной к z , то это означает, что $x = ky/z$.

Учитывая это, давайте обозначим ускорение как a , величину силы как f , а массу тела как m . Тогда второй закон движения Ньютона приобретает такой вид:

$$a = \frac{kf}{m} \quad (\text{Уравнение 3.1})$$

Давайте теперь рассмотрим единицы, в которых будем измерять каждую из величин, начиная с массы, так как мы пока еще не упоминали ее в этой книге. Вы можете подумать, что, если я говорю, что лушечное ядро более массивно, чем баскетбольный мяч, я подразумеваю, что оно и более тяжелое. На самом деле я так не делаю. «Массивный» — не то же самое, что «тяжелый», и «масса» — не то же самое, что «вес», как я объясню вам чуть позже в этой книге. Однако между этими двумя концепциями имеется некоторое подобие, и их часто путают. В повседневной жизни, по мере того как тела становятся более массивными, они также становятся и более тяжелыми, кроме того, физики тоже внесли свой «элемент беспорядка», используя для измерения массы тела единицы, которые нефизики обычно считают единицами веса.

В метрической системе измерений приняты две основные единицы измерения массы тела — грамм (г) и килограмм (кг). Грамм — мелкая единица измерения массы. Например, кварта молока имеет массу приблизительно 975 граммов. Килограмм,

как вы и можете ожидать (от приставки), равен 1000 граммам и, таким образом, представляет собой массу чуть больше, чем кварта молока.

(В обычных единицах массу часто представляют в виде «унций» и «фунтов», эти единицы также используют и для веса. В этой книге, однако, я буду ограничиваться метрической системой, насколько это представится возможным, и буду использовать обычные единицы, например кварталы, только тогда, когда они действительно необходимы для ясности.)

При измерении величины силы необходимо рассматривать две величины: ускорение и массу. При использовании метрических единиц ускорение обычно имеет размерность м/с^2 или см/с^2 , в то время как масса измеряется в г или кг. Традиционно всякий раз, когда расстояние дается в метрах, масса дается в килограммах, то есть в сравнительно больших единицах. С другой стороны, всякий раз, когда расстояние дается в сравнительно мелких единицах — сантиметрах, масса тоже дается в сравнительно мелких единицах — граммах. В любом из указанных случаев единица времени — секунда.

Следовательно, единицы измерения многих физических величин могут быть составлены из сантиметров, граммов и секунд в различных комбинациях или из метров, килограммов и секунд в различных комбинациях. Первый вариант известен как система СГС, второй вариант — как система МКС. Еще полвека назад более часто использовали систему СГС, но теперь более популярной стала система МКС. В этой книге я буду использовать обе системы.

В системе СГС за единицу силы принята такая сила, которая заставляя тело массой 1 г двигаться с ускорением 1 см/с^2 . Поэтому единицы размерности там 1 см/с^2 , умноженный на 1 г. (При умножении двух алгебраических величин a и b мы можем выразить произведение просто как ab . Мы обращаемся с единицами измерения так, как если бы они были алгебраическими величинами, но, поскольку прямое присоединение одних слов к другим выглядит запутывающе, я буду использовать дефис, который, в конце концов, обычно и используется, чтобы присоединять одни слова к другим). Таким образом, единица силы, равная произведению 1 см/с^2 на 1 г, будет называться 1 г-см/с² (грамм-сантиметр в секунду за секунду. — *Пер.*). Единица силы, г-см/с², часто используется физиками, но так как звучит она довольно «громоздко», то для этого выражения было придумано более короткое название «дина» (от греческого слова, означающего «сила»).

Теперь давайте решим уравнение 3.1 для k . Получается, что:

$$k = \frac{ma}{f}. \quad (\text{Уравнение 3.2})$$

Значение k остается одним и тем же для любого совместимого набора значений a , m и f , так что мы также можем брать простые числа. Предположим, что мы присваиваем m значение, равное 1 г, а a — равное 1 см/с². Количество силы, которое соответствует такой массе и ускорению, по нашему определению, 1 г·см/с² (или 1 дина).

Подставив эти значения в уравнение 3.2, мы получаем, что:

$$k = \frac{1 \text{ см/с}^2 \times 1 \text{ г}}{1 \text{ г} \cdot \text{см/с}^2} = \frac{1 \text{ г} \cdot \text{см/с}^2}{1 \text{ г} \cdot \text{см/с}^2} = 1. \quad (\text{Уравнение 3.2})$$

В этом случае, по крайней мере, k — безразмерная величина.

Так как k равна 1, мы можем привести уравнение 3.2 к виду $ma/f = 1$, откуда мы получаем, что:

$$f = ma \quad (\text{Уравнение 3.3})$$

при условии, что мы используем надлежащие наборы единиц измерения, то есть если мы измеряем массу в граммах, ускорение — в сантиметрах в секунду за секунду, а силу — в динах.

В системе измерений МКС ускорение измеряется в метрах на секунду в квадрате, а масса в килограммах. Единица силы может быть определена как количество силы, которое производит ускорение, равное 1 м/с², будучи приложенной к телу массой 1 кг. Единицы силы в этой системе поэтому 1 м/с², умноженные на 1 кг, или 1 кг·м/с². Эта единица силы более кратко называется 1 ньютон, и конечно же в честь Исаака Ньютона. Уравнение 3.3 справедливо и для второй комбинации совместимых единиц измерения, когда масса измеряется в кг, ускорение — в м/с², а сила — в ньютонах.

Зная, что килограмм равен 1000 граммам, а метр — 100 сантиметрам, можно получить, что 1 кг·м/с² равен (1000 г) · (100 см)/с², или 100 000 г·см/с². То есть более кратко: 1 ньютон = 100 000 дин.

Перед тем как оставить второй закон движения, давайте рассмотрим случай, когда к телу не приложена никакая суммарная сила. В этом случае мы можем сказать, что $f = 0$, таким образом, уравнение 3.3 приобретает вид: $ma = 0$. Но любое материальное тело должно иметь массу больше нуля, то есть единственный вариант, при котором ma может равняться 0, это — когда мы имеем a равное 0.

¹ Килограмм-метр на секунду в квадрате. (Примеч. пер.)

Другими словами, если на тело не действует никакая суммарная сила, то оно не испытывает никакого ускорения и поэтому должно находиться в покое или в состоянии равномерного движения.

Это последнее замечание, однако, представляет собой не что иное, как выражение первого закона движения Ньютона. Из этого следует, что второй закон движения включает в себя первый закон как частный случай. То есть если справедливость второго закона признана, нет никакой необходимости в первом законе. Значение первого закона в значительной степени психологическое. Частный случай $f = 0$, будучи однажды принятым, освобождает от того, чтобы учитывать основанное на «здравом смысле» аристотелевское понятие того, что естественной тенденцией объектов является стремление к состоянию покоя. Приняв такой частный случай, можно уже рассматривать и более общий.

Взаимодействие тел

Чтобы существовать, сила должна происходить от чего-либо и быть приложена к чему-нибудь. Очевидно, что-то не может быть сдвинуто с места, если другое что-то не подталкивает его. Также должно быть очевидно, что что-то не может подталкивать, если не существует самого предмета подталкивания. Попробуйте представить себе, что вы тянете или толкаете вакуум.

Значит, два тела соединяет сила, и соответственно возникает вопрос: какое же из тел является толкающим, а какое подталкиваемым? Если в процесс вовлечен некий живой организм, мы привыкли думать о нем как об источнике происхождения силы. Мы думаем о себе как о толкающем лушечное ядро, а о лошади — как о том, кто тянет фургон, а не наоборот: о лушечном ядре, толкающем нас, и о фургоне, тянущем лошадь.

В случае же, если рассматриваются два неодушевленных объекта, мы не можем быть настолько уверенными. Стальной шар, падающий на мраморный пол, собирается толкнуть этот пол в момент удара, то есть приложить к нему силу. С другой стороны, в тот момент, когда стальной шар ударяется об пол, пол начинает прикладывать силу по отношению к шару. Принимая во внимание, что сила, которую прикладывает шар, направлена вниз на пол, понятно, что сила, которую прикладывает пол, должна быть направлена вверх на шар.

В этом и во многих других подобных случаях, как мы видим, имеются две силы, равные по величине и противоположные по направлению.

Ньютон сделал обобщение, что такое явление существует всегда и обязательно и истинно во всех случаях. Он отобразил это в своем третьем законе движения. Часто этот закон формулируют в краткой форме: «Для каждого действия имеется равное противодействие». По этой причине третий закон Ньютона иногда упоминается как «закон действия и противодействия».

Возможно, однако, это не лучший вариант формулировки. Говоря относительно действия и противодействия, мы все еще думаем о живом объекте, прикладывающем силу к некоторому неодушевленному предмету, который соответственно реагирует автоматически. Одна сила («действие») кажется более важной и предшествующей по времени другой силе («реакции»).

Но это не так. С точки зрения физики обе силы имеют абсолютно равную важность и существуют одновременно. Любая из них может рассматриваться как «действие» или как «реакция». Поэтому было бы лучше сформулировать закон примерно в такой форме:

«Всякий раз, когда одно тело прикладывает силу ко второму телу, это второе тело прикладывает силу к первому телу. Эти силы равны по величине и противоположны по направлению».

В такой форме данный закон может называться «законом взаимодействия».

Третий закон движения может вызвать некоторое замешательство. Люди имеют тенденцию спрашивать: «Если каждая сила вызывает равную и противоположную противосилу, почему же обе силы всегда не уничтожают друг друга при векторном сложении, не оставляя никакой суммарной силы вообще?» (Если бы это было так, то ускорение было бы невозможным и второй закон был бы бессмысленным.)

Ответ заключается в том, что две равные и противоположные по направлению силы уничтожают друг друга в том случае, когда они приложены к одному и тому же телу. Если сила была приложена к данному конкретному камню и равная и противоположная сила была также приложена к этому камню, то не будет никакой результирующей силы: камень будет оставаться в покое независимо от того, насколько большой была каждая из сил. (Силы могут быть достаточно большие, чтобы «растереть» камень в порошок, но они не будут перемещать его.)

Закон взаимодействия, однако, относится к равным и противоположным по направлению силам, приложенным к двум разным телам. Таким образом, если вы прикладываете силу к камню, равная и противоположная сила приложена камнем к

вам; и камень и вы — каждый получает отдельную неуравновешенную силу. Если вы прикладываете силу к камню и в то же время отпускаете его, то камень, в ответ на эту отдельную силу, ускорится в направлении этой силы, то есть влечь от вас. Вторая сила приложена к вам, и вы, в свою очередь, ускоритесь в направлении этой второй силы, то есть в направлении, противоположном тому, в котором полетел камень. Обычно если вы стоите на неровном основании (земле), то трение между вашими ботинками и основанием порождает новые силы, которые предохраняют вас от перемещения. Ваше ускорение поэтому замаскировано, так что истинный эффект закона взаимодействия может пройти незамеченным. Однако если бы вы стояли на очень гладком, скользком льду и швырнули тяжелый камень, например в восточном направлении, то вы бы начали скользить на запад.

Таким же образом газы, сформированные горящим топливом в двигателе ракеты, прикладывают силу к внутренним стенкам двигателя, в то время как стенки двигателя прикладывают равную и противоположную силу к газам. Газы вынуждены ускоряться вниз, в то время как стенки (и присоединенная к ним ракета) вынуждены ускоряться по направлению вверх. Каждая взлетающая в воздух ракета является свидетельством правильности третьего закона движения Ньютона.

В рассмотренных случаях оба вовлеченных объекта были физически разделены или могли бы быть физически разделены. Одно тело могло ускоряться в одном направлении, а другое — в противоположном. Но что же делать в случае, когда эти два вовлеченных тела связаны вместе? Что делать с лошадию, тянущей фургон? Фургон также тянет лошадь в противоположном направлении, с равной силой. И все же лошадь и фургон не ускорятся в противоположных направлениях. Они связаны вместе, и оба движутся в одном и том же направлении.

Если бы силы, соединяющие фургон и лошадь, были единственными из вовлеченных, то действительно не имелось бы никакого совместного движения. Фургон и лошадь, стоящие на очень скользком льду, не сдвинулись бы с места, независимо от того, как барахталась бы лошадь. На обычном же основании (земле) существуют фрикционные эффекты. Лошадь прикладывает силу к Земле, а Земля прикладывает противосилу на лошадь (и связанный с ней фургон). Следовательно, лошадь перемещается вперед, а Земля — назад.

Но так как Земля имеет массу намного большую, чем лошадь, то ее ускорение назад (помните, что ускорение, произведенное силой, обратно пропорционально массе ускоряемого

тела) настолько мало, что практически неизмеримо. Мы видим только движение лошади, и поэтому нам кажется, что лошадь тянет фургон. Достаточно трудно осознать, что фургон в то же время тянет лошадь.

Глава 4

ТЯГОТЕНИЕ

Комбинация сил

Еще будучи двадцатилетним, Ньютон обратил внимание на очень важный и глубокий вопрос. Законы движения применимы только к Земле или они справедливы и для небесных тел? Наблюдая на ферме матери падение яблока с дерева¹, он стал задаваться вопросом, действуют ли на Луну те же силы, что и на яблоко.

На первый взгляд могло бы показаться, что Луна не может быть во власти той же самой силы, что и яблоко, поскольку яблоко упало на Землю, а Луна этого не делает. Конечно, если бы одна и та же самая сила была приложена к обоим этим объектам, то она вызвала бы одно и то же ускорение, и они бы оба упали. Однако это — упрощение. Что, если Луна действительно находится во власти той же самой силы, что и яблоко, и поэтому перемещается вниз к Земле; но, кроме того, что, если Луна также подвержена второму движению? Что, если комбинацией этих двух движений является такое, которое заставляет Луну кружиться над Землей и никогда не падать на нее?

Это понятие полного движения, составленного из двух или более движений в различных направлениях, было весьма нелегким для восприятия концепцией для ученых того времени. Когда Николай Коперник (1473—1543) предположил, что Земля вращается вокруг Солнца (а не наоборот), некоторые из наиболее ярых возражений были те, что, если Земля вращается на своей оси и (что еще хуже) перемещается в пространстве в своем вращении вокруг Солнца, на поверхности Земли невозможно будет находиться чему-либо подвижному. Любой, кто подпрыгнул бы в воздух, опустился бы на много ярдов дальше, так как земля под ним передвигалась бы в то время, как он был в воздухе. Спорящие таким образом были настолько уверены в очевидности своих аргументов, что даже не принимали никаких возражений.

¹ Яблоко не падало ему на голову, несмотря на то что сотни карикатуристов утверждают обратное.

Те, кто принимал коперниковское понятие о движении Земли, должны были доказать, что для объекта действительно возможно обладать двумя движениями сразу: то есть что прыгающий человек во время перемещения вверх и вниз может также двигаться вместе с поворачивающейся Землей и поэтому опускается на то же самое место, с которого он прыгал вверх.

Галилео показал, что объект, брошенный вниз с верхушки мачты движущегося судна, упал в точку у основания мачты. Судно не «выехало» из-под падающего объекта, и он не упал в море. Следовательно, падающий объект, в то время как он перемещался вниз, должно быть, также участвовал и в горизонтальном движении судна. На практике Галилео не пробовал выполнить описанное выше, он предложил то, что сегодня мы называем «мысленный эксперимент». Но даже при том, что данный эксперимент был предложен только в мысленной форме, он был крайне убедительным; суда плавали по морям в течение тысяч лет, и множество предметов, должно быть, было сброшено с верхушек мачт в течение всех этих лет, и все же ни один моряк никогда не сообщил о том, что судно выплыло из-под падающего предмета. (И конечно, в наше время мы можем шелкать монетами о край бьющей струи и ловить их, поскольку они снижаются, без того, чтобы переместить нашу руку. Монета участвует в движении струи, а также — в перемещении вверх и вниз.)

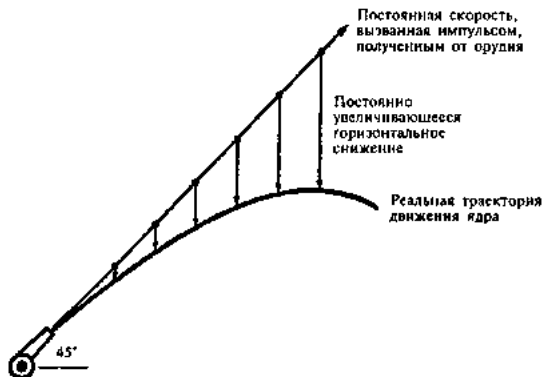
Почему тогда некоторые ученые XVI и XVII столетий уверенно утверждали, что объекты не могут обладать двумя различными движениями одновременно? Очевидно, потому, что они все еще «страдали греческой болезнью» — принимать за основу кажущиеся явными основные предположения и не всегда испытывать необходимость проверить эти заключения в условиях реальной Вселенной.

Например, ученые XVI столетия рассуждали, что снаряд, которым выстрелили из орудия или катапульты, потенциально подчиняется воздействию двух движений: во-первых, импульса, данного ему орудием или катапультой и, во-вторых, его «естественного движения» к земле. Предположив для начала, что объект не может обладать двумя движениями одновременно, можно сделать справедливый вывод, что одно движение должно закончиться перед тем, как начнется второе. Другими словами, утверждается, что пушечное ядро будет перемещаться по прямой в направлении выстрела, пока импульс, вызванный взрывом пороха, не исчерпает себя, а затем — упадет вниз, по прямой.

Галилео придерживался весьма отличной от такой точки зрения. Безусловно, снаряд будет перемещаться вперед, в направ-

лении выстрела из орудия. Больше того — он будет делать это с постоянной скоростью, так как сила взрыва пороха была приложена к нему только один раз и больше не прикладывалась. (Как позже объяснил Ньютон — без непрерывной силы не существует и непрерывного ускорения.) Кроме того, однако, пушечное ядро начинает снижаться, как только оно покидает ствол орудия, в соответствии с законами падающих тел, причем с постоянно увеличивающейся скоростью, увеличивающейся из-за постоянного ускорения (вызванного благодаря непрерывному присутствию постоянной силы тяжести). Легко показать геометрическими методами, что объект, который передвигается в одном направлении с постоянной скоростью, а в другом — со скоростью, которая возрастает прямо пропорционально со временем, будет двигаться по кривой, называемой «парабола». Галилео также доказал, что максимальная дальность полета пушечного ядра будет достигаться в том случае, если орудие будет направлено вверх под углом 45° к земле.

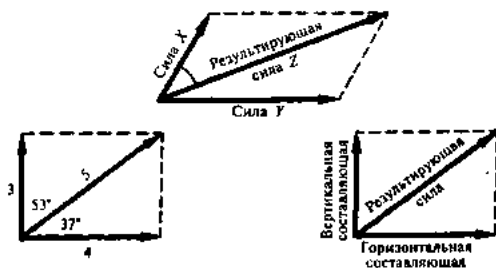
Орудие, направленное под некоторым углом к горизонту, способно было бы доставить пушечное ядро на одно расстояние, если ранние представления о движении пушечного ядра были правильными, и на совсем другое расстояние в том случае, если верными были взгляды Галилео. Показать, что именно подход Галилео был верным, не представляло особой трудности.



Комбинация движений

Действительно, во все времена стрелки, которые, возможно, и не понимали много в теории, наделивали свои орудия так, чтобы воспользоваться преимуществами параболического движения пушечного ядра¹. Короче говоря, возможность тела обладать двумя или более движениями одновременно ни разу не была подвергнута сомнению со времен Галилео.

Каким же образом можно сложить отдельные движения и получить результирующую этих движений? Это может быть сделано при помощи векторного сложения, по методу, наиболее легко представляемому в геометрической форме. Рассмотрим два движения в различных направлениях, эти два направления находятся под углом α друг к другу. (Символ α — греческая буква «альфа». Греческие буквы вообще часто используются в физике в качестве символов, чтобы ослабить нагрузку на обычные буквы алфавита.) Эти два движения могут тогда быть представлены двумя стрелками, находящимися под углом α , а длина этих двух стрелок пропорциональна соответствующим им скоростям. (Если одна скорость вдвое больше другой, то и соответствующая стрелка в два раза больше другой.) Если мы представим эти две стрелки как стороны параллелограмма, то результирующее движение, созданное из двух составляющих движений, может быть диагональю этого параллелограмма, которая находится в промежутке между направлениями составляющих компонентов.



Параллелограмм сил

¹ В наше время, когда снаряды залускают за много миль, правильный выбор цели требует большего, чем идеализированная парабола Галилео. На движение снаряда влияет множество факторов, таких, например, как кривизна поверхности Земли, изменение скорости вращения в зависимости от широты,

Зная значения этих двух скоростей и угла между ними, можно вычислить значение и направление результирующей скорости даже и без геометрических построений, хотя последние всегда полезны в качестве зрительной помощи. Например, если одна скорость — 3 м/с в одном направлении, а другая — 4 м/с в направлении перпендикулярном (под прямым углом к) первому, то результирующая скорость — 5 м/с, в направлении, которое составляет угол менее чем 37° с большим компонентом и более чем 53° — с меньшим.

Таким же образом данная конкретная скорость может быть разложена на две составляющие скорости. Если мы выразим данную скорость как диагональ параллелограмма, то две из смежных сторон параллелограмма представят собой составляющие скорости. Это может быть проделано бесконечное число раз, так как линия, представляющая скорость или силу, может быть представлена диагональю бесконечного числа параллелограммов. Однако удобно, чтобы скорость была разложена на компоненты, которые находятся под прямыми углами друг к другу. В этом случае параллелограмм превращается в прямоугольник.

Этот метод использования параллелограмма может применяться для сложения или разложения любого количества векторов. Данный метод очень часто используется для расчета сил, и поэтому обычно его называют «параллелограммом сил».

Движение Луны

Теперь позвольте нам вернуться к Луне. Относительно Земли она движется по эллиптической орбите. Однако эллипс, который она описывает в своем вращении вокруг Земли, очень близок по форме к кругу. Луна путешествует по этой орбите со скоростью, которая близка к постоянной.

Хотя линейная скорость Луны почти постоянна, ее векторная скорость, конечно, — нет. Так как Луна перемещается по кривой, направление ее движения в каждый данный момент времени изменяется, и поэтому ее векторная скорость изменя-

величина сопротивления воздуха (которая изменяется в зависимости от высоты и температуры), сила и направление ветра, движение объекта, на который нацелено оружие, и объекта, несущего это оружие (если, например, оба объекта — военные корабли) и т. д. Однако все эти эффекты просто изменяют форму параболы, не затрагивая основного принципа, выведенного Галилео, который в своей базовой форме может служить только для представления очень упрощенной, но в то же время весьма полезной модели реальной ситуации.

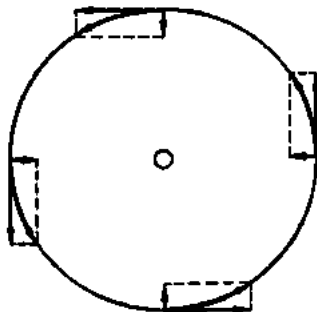
ется тоже. Если мы говорим, что векторная скорость Луны непрерывно изменяется, то, конечно, должны сказать, что она подвергается постоянному ускорению.

Если же мы рассматриваем Луну как перемещающуюся с постоянной скоростью по равномерно круговому пути (что является, по крайней мере приблизительно, истинным), то мы можем сказать, что в каждую последовательную единицу времени направление ее движения изменяется на одну и ту же величину. Поэтому она испытывает постоянное ускорение и, согласно второму закону движения Ньютона, должна быть подчинена воздействию постоянной силы. Поскольку изменение в направлении движения всегда направлено к Земле, то ускорение и соответственно сила тоже должны быть направлены к Земле.

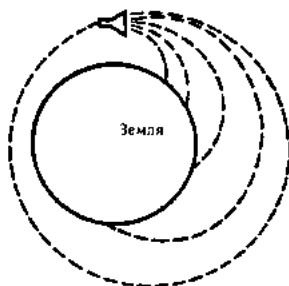
Конечно, если имеется сила, притягивающая Луну к Земле, это может быть та же хорошо известная сила, которая притягивает яблоко к земле. Однако, если это было бы так и Луна испытывала бы постоянное ускорение, направленное к Земле при наличии постоянной силы, почему же она не падает на Землю, как делает яблоко?

Чтобы понять, почему этого не происходит, мы должны разложить движение Луны на две составляющие движения, находящиеся под прямым углом друг к другу. Одна из составляющих направлена как стрелка, указывающая на Землю, по радиусу круговой орбиты Луны. Она представляет собой движение в ответ на силу, притягивающую Луну к Земле. Другая составляющая направлена под прямым углом к первой и, таким образом, представляет собой касательную к кругу орбиты Луны. И Луна бы двигалась по касательному движению, если бы не имелось никакой силы, притягивающей ее к Земле. Фактическое же движение лежит между этими двумя составляющими. Луна, другими словами, всегда падает на Землю, но в то же самое время также «отступает в сторону».

В некотором смысле это «отступление» означает, что поверхность Земли отходит от Луны с такой же скоростью, как Луна приближается к ней, падая. Таким образом, расстояние между Землей и Луной остается неизменным. Чтобы было более понятно, представим себе снаряд, выстреленный горизонтально с вершины горы на земле, и развивающий все большую и большую скорость. Чем больше скорость, тем дальше перемещается снаряд, прежде чем удариться о землю. Чем дальше он перемещается, тем дальше от него сферическая земная поверхность, таким образом увеличивается перемещение снаряда. Ну и наконец, если снаряд выстрелен вперед с достаточной скоростью, высота его падения



Движение Луны



«На орбите»

становится равной величине кривизны земной поверхности, и снаряд «остается на орбите». Именно так на орбиту Земли выводят искусственные спутники, и именно поэтому Луна не падает на Землю, а остается на орбите.

При рассмотрении движения Луны мы должны учитывать только ту составляющую движения, которая направлена к Земле. Естественно возникает вопрос: не является ли этот компонент результатом действия той же силы, которая притягивает к земле яблоко? Ну что же, давайте обратимся к яблоку и посмотрим, как интерпретировать силу взаимодействия между ним и землей в свете законов движения.

Во-первых, все яблоки падают с одним и тем же ускорением, независимо от того, насколько они массивны. Но если одно яблоко имеет массу вдвое большую, чем второе яблоко, и все же падает с тем же самым ускорением, то на первое яблоко должна действовать вдвое большая сила (согласно второму закону движения). Сила, притягивающая яблоко к земле (часто ее называют весом яблока), должна быть пропорциональна массе яблока.

Но согласно третьему закону движения всякий раз, когда одно тело прикладывает силу к другому, второе прикладывает равную и противоположную силу к первому. Это означает, что, если Земля привлекает яблоко с некоторой нисходящей силой, яблоко привлекает Землю с равной восходящей силой.

Это кажется странным. Как крошечное яблоко может проявлять силу, равную той, что проявлена огромной Землей? Если бы это происходило, то можно было бы ожидать, что яблоко притянет к себе другие объекты, как это делает Земля, но этого, конечно, не происходит. Логично было бы объяснить это предположением, что сила притяжения между яблоком и землей зависит не только от массы яблока, но также и от массы Земли. Она не может зависеть от суммы масс, поскольку, когда мы удвоим массу яблока, суммарная масса яблока и Земли остается примерно прежней, в то время как сила притяжения удваивается. Очевидно, что она должна зависеть не от суммы масс, а от произведения масс.

Если мы умножаем массы, маленькая масса оказывает столь же сильный эффект на конечное произведение, как и большая. Таким образом, результатом умножения малого количества a на огромное количество b является произведение ab . Если теперь мы удвоим a , оно становится равным $2a$. Если мы умножаем его на b , произведение становится равным $2ab$. Таким образом, при удвоении одного из двух множителей в умножении маленький множитель может удвоить произведение. И удвоение массы яблока удваивает размер силы между яблоком и Землей.

Что же касается притяжения яблоком какого-либо другого объекта обычного размера, оно существует, но столь мало заметно из-за того, что произведение масс этих объектов составляет ничтожно малую часть от произведения массы этого объекта и массы Земли. Сила притяжения между двумя объектами обычного размера соответственно меньшая, и, несмотря на то что такая сила существует, она настолько бесконечно мала, что никак не может обнаружить себя при нормальном состоянии вещей.

Так как Земля притягивает все материальные объекты к себе (даже газообразная атмосфера крепко привязана к планете бла-

годаря силе тяготения), может показаться, что сила тяготения в любой форме порождается массой Земли. Однако Земля вовсе не должна быть вовлечена. Любые две массы должны взаимодействовать гравитационно, и если мы замечаем силу, только когда вовлечена Земля, то потому, что сама наша Земля — единственное тело в нашем окружении достаточно массивное, чтобы породить силу тяготения, достаточно большую, чтобы заявить нам о своем существовании.

Такова сущность вклада Ньютона. Он не открывал закон тяготения в том смысле, что все земные объекты привлечены к земле. (Эта ограниченная концепция, по крайней мере, столь же стара, как Аристотель, а слово «тяжесть» использовалось в этом смысле в течение многих столетий до Ньютона.) Ньютон указал на то, что все существующие массы притягивают другие массы, таким образом, притяжение Земли не является уникальным. Ньютон утверждал, что между любыми двумя материальными телами во Вселенной имеется гравитационное притяжение, его обобщение называется «универсальный закон всемирного тяготения», и прилагательное «универсальный» — наиболее важное слово в этом названии¹.

Если бы это было все, то мы могли бы теперь рассчитать величину составляющей движения Луны, которая направлена к Земле. Все тела, падая на Землю, движутся с одним и тем же ускорением, и поэтому казалось бы логичным решить, что Луна, находясь во власти той же самой силы притяжения, должна делать так же. За одну секунду она должна падать на Землю приблизительно на 4,9 метра. Фактически же составляющая движения Луны к Земле — намного меньше.

Чтобы объяснить это, можно было предположить, что сила тяготения Земли ослабляется с расстоянием, и это кажется разумной гипотезой. Опыт показывает нам, что существует много вещей, которые ослабляются с расстоянием. Так происходит со светом и звуком — двумя наиболее привычными явлениями, с которыми человек всегда был знаком.

И все же — был ли вывод о таком ослаблении поддержан экспериментальным свидетельством?

На первый взгляд может показаться, что не было. Камень, брошенный вниз с высоты 100 метров, падает с ускорением $9,8 \text{ м/с}^2$,

¹ Однако из каждого правила можно изобрести исключение. Если бы Земля была полая, то в пределах пустоты не имелось бы никакой суммарной силы тяготения. Тело, находящееся в пределах этой пустоты, не было бы притянуто Землей. Однако это — искусственно придуманное исключение, которое не имеет никакого практического значения; любое тело, которое является достаточно большим, чтобы иметь поле тяготения значительной величины, является слишком большим, чтобы сохранять такую полую структуру.

а другой камень, брошенный вниз с высоты 200 метров, падает с тем же ускорением. Если сила тяготения уменьшается с удалением от Земли, разве не должно падение с большей высоты вызывать меньшее ускорение? Разве ускорение не должно равномерно увеличиваться по мере приближения камня к земле, вместо того чтобы оставаться постоянным, как оно это делает?

Но взгляд Ньютона на эту проблему состоит в том, что все тела привлекают к себе все другие тела. Падающий камень привлекается не только той частью Земли, которая представляет собой ее поверхность непосредственно под ним, но также и той ее частью, которая находится глубже, вплоть до центра и далее, к антиподам, на расстоянии 12 740 километров (8000 миль). Он также притягивается и всеми остальными частями во всех направлениях: на север, восток, юг, запад, и во всех промежуточных точках.

Кажется вполне разумным, что для тела, подобного Земле, которая имеет почти правильную сферическую форму, мы могли бы упростить этот вопрос. Притяжение с севера компенсируется притяжением с юга; притяжение с запада компенсируется притяжением с востока; отдаленное притяжение антиподов компенсируется притяжением поверхности непосредственно под нами и так далее. То есть мы можем предположить, что результирующее влияние — полное притяжение Земли — сконцентрировано точно в ее центре.

Радиус Земли равен приблизительно 6370 километрам (3960 миль). Объект, падающий с высоты 100 метров (0,1 километра), начинает свое падение поэтому с точки, находящейся на расстоянии 6370,1 километра от центра Земли, в то время как другой объект, падающий с высоты 200 метров, начинает свое падение с точки, находящейся на расстоянии 6370,2 километра от центра. Различие в силе при такой разнице в расстоянии настолько незначительно, что гравитационное притяжение на таком маленьком расстоянии может рассматриваться в качестве константы. (На самом деле современные инструменты со значительной точностью могут измерять разницу в силе тяготения даже при такой маленькой разнице в расстояниях.)

Однако расстояние от Луны до Земли (от центра до центра) в среднем равно 384 500 километрам (239 000 миль). Это — в 60,3 раза дальше от центра Земли, чем в случае, когда объект находится на ее поверхности. При увеличении расстояния в 60 раз сила тяготения могла бы действительно значительно уменьшиться.

Но насколько — «значительно»? Земля притягивает тела до всей своей поверхности, поэтому сила тяготения может рас-

смагиваться как излучение, направленное наружу от Земли во всех направлениях. Если сила действительно делает это, то оно, направленное излучение, может рассматриваться в виде поверхности сферы, которая расширяется все больше и больше, по мере того как отступает от Земли. Если некое установленное количество силы тяготения распространено по поверхности такой растущей сферы, то интенсивность силы на некоем данном месте на поверхности должна уменьшаться, поскольку площадь поверхности возрастает.

Из стереометрии известно, что площадь поверхности сферы находится в прямой пропорции к квадрату ее радиуса. Если одна сфера имеет радиус в три раза больше другого, то площадь ее поверхности больше в девять раз.

По мере того как расстояние между двумя телами увеличивается, сила тяготения между ними должна изменяться обратно пропорционально квадрату этого расстояния. (Такие взаимосвязи хорошо известны как «обратно квадратичная зависимость». Не только тяготение, но и такие явления, как интенсивность света, интенсивность магнитного притяжения и интенсивность электростатического притяжения, ослабляются таким же образом.)

Сравнивая движение Луны и движение яблока к поверхности Земли, мы должны помнить, что Луна в 60,3 раза дальше от центра Земли, чем яблоко, и что сила тяготения на Луне является более слабой: коэффициент ослабления 60,3 на 60,3, или в 3636 раз. Принимая во внимание, что яблоко падает в первую секунду на 4,9 метра, Луна за то же время должна упасть на расстояние, умноженное на $1/3636$, или 0,0013 метра за секунду падения. (Тысячная часть метра — миллиметр, поэтому 0,0013 метра равны 1,3 миллиметра.)

Действительно, астрономические измерения показывают, что Луна в своем движении по орбите вокруг Земли в каждую секунду отклоняется от прямого курса примерно на 1,3 миллиметра. Уже на основании одного этого можно было с достаточной вероятностью подтвердить, что та же самая сила, которая притягивает яблоко, притягивает и Луну. Однако Ньютон продолжил свои исследования и показал, что сила тяготения универсально объясняет такие факты: что орбита Луны относительно Земли представляет собой эллипс, с Землей, находящейся в одном фокусе; что планеты вращаются относительно Солнца в такой же эллиптической манере; что приливы существуют и ведут себя именно так; что имеет место прецессия равноденствий и так далее. Одно простое и ясное обобщение объяснило так много, что это было с восторгом принято всем научным сообществом.

Через столетие после смерти Ньютона немецко-английский астроном Уильям Гершель (1738—1822) обнаружил признаки существования далеких звезд, которые вращались относительно друг друга в строгом соответствии с ньютоновским законом всемирного тяготения, и тем самым еще раз подтвердил его универсальность. Невидимые планеты были в конечном счете обнаружены благодаря слабым гравитационным эффектам, которые могли произойти только благодаря их невидимому присутствию. Неудивительно, что закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном, часто называют «самым большим отдельным открытием в истории науки»¹.

Гравитационная постоянная

Ньютон открыл обобщение, что любые два тела во Вселенной притягивают друг друга с силой (F), которая прямо пропорциональна произведению масс (m и m') тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния (d) между ними. Чтобы преобразовать пропорцию в равенство, конечно, необходимо подставить константу. Упомянутая в данном случае константа обычно называется «гравитационной постоянной» и обозначается символом G . Таким образом, ньютоновский закон всемирного тяготения может быть выражен как:

$$F = \frac{Gmm'}{d^2}. \quad (\text{Уравнение 4.1})$$

Проблемой, которую Ньютон оставил нерешенной, было значение G .

Чтобы понять, почему проблема не была решена, давайте рассмотрим известный случай падения яблока и попробуем заменить значения в уравнении 4.1 единицами измерения в системе МКС. Мы знаем значение расстояния от яблока до цент-

¹ Однако обобщение Ньютона, рассматривающее тяжесть, — только аппроксимация и не является абсолютно правильной. Уже в середине XIX столетия было обнаружено, что планета Меркурий имеет в своем движении один маленький компонент, который нельзя было объяснить в соответствии с законом Ньютона. Он оставался необъясненным, пока Альберт Эйнштейн не выдвинул в 1915 году свою «Общую теорию относительности». Эта теория — более продвинутая, мощная и спорная, чем «Специальная теория», вышедшая в 1905 году, — предлагала более широкое представление о Вселенной, чем то, что было выражено в законах Ньютона. При обычных условиях эти два представления были примерно одинаковы, однако в экстремальных условиях они расходятся, и, когда работа представленной проверяется на таких крайностях, кажется, что взгляды Эйнштейна больше соответствуют истине, чем взгляды Ньютона.

ра Земли и можем установить d ; оно равно 6 370 000 метрам. Имеются различные пути измерения массы яблока, но мы можем установить его, например, в 0,1 килограмма. Что касается величины силы тяготения (F) между яблоком и Землей, то она равна (см. уравнение 3.3), согласно ньютоновскому второму закону движения, произведению массы яблока на ускорение, которому оно подверглось под воздействием силы тяжести. Таким образом, значение F равно — 0,1 кг умножить на $9,8 \text{ м/с}^2$, или $0,98 \text{ кг-м/с}^2$.

Однако тут мы видим еще два неопределенных значения: G — гравитационная постоянная и m' — масса Земли. Если бы мы знали любое из них, то могли бы сразу вычислить другое, но Ньютон не знал, так же как и кто-либо другой в его время.

(Вы могли бы задать вопрос: не могли ли бы мы сократить константу в уравнении 4.1, так же как мы это сделали в уравнении 3.3? Однако это было сделано надлежащим выбором единиц измерения. Мы могли бы и здесь сделать так же, изобретая единицу, которую назвали бы, например, «земной единицей», и сказав, что Земля имеет массу в 1 земную единицу. Мы могли бы и далее изобретать подобные произвольные единицы измерения: для массы яблока и расстояния яблока от центра Земли и так далее. Однако такие уловки имели бы ограниченное значение. Недостаточно знать, что Земля имеет массу в 1 земную единицу. Мы хотим знать массу Земли в знакомых терминах, например в единицах измерения системы МКС. А для этого мы должны знать значение G в системе МКС.)

Закон всемирного тяготения подразумевает, что значение G — одно и то же при любых условиях. Поэтому если бы мы могли измерить силу тяготения между двумя телами известной массы, отдаленных друг от друга на известное расстояние, то смогли бы сразу определить значение G , а после этого — и массу Земли.

К сожалению, сила тяжести, наверное, самая слабая из известных сил, существующих в природе. Требуется тело, имеющее размер, сопоставимый с огромным размером Земли, чтобы произвести силу тяготения достаточную, для ускорения в $9,8 \text{ м/с}^2$. Небольшие усилия, которые могут быть произведены всего несколькими фунтами мускулов, способны противостоять всей силе тяготения всякий раз, когда мы отжимаемся, подтягиваемся, прыгаем вверх или поднимаемся на гору.

Для тел, которые являются большими, хотя и менее массивными, чем Земля, уменьшение силы тяготения имеет решающее значение. Благодаря силе тяжести Земля обеспечивает устойчивый «захват» своей мощной атмосферы, а вот сила тяжести планеты

Марс, который имеет массу, равную только $1/10$ массы Земли, может удержать только тонкую атмосферу. Луна имеет огромную массу по обычным стандартам, однако она равна только $1/81$ массы Земли и имеет силу тяготения слишком слабую, чтобы удержать какую-либо атмосферу вообще.

Когда мы рассматриваем тела обычного размера, произведенные ими силы тяготения совершенно незначительные. Масса горы проявляет по отношению к вам гравитационное притяжение, но вы не испытываете никаких трудностей, удаляясь от этой горы.

Поэтому главной является проблема, как измерить столь слабую силу, какой является сила тяжести. Мы могли бы размышлять о возможных путях измерения сил тяготения между двумя соседними горами, но собственные массы гор не намного меньше, чем масса Земли. Кроме того, горы имеют неправильную форму, а сила тяготения сконцентрирована в некотором «центральной положении», которое было бы трудно определить.

Поэтому мы должны измерять силы тяготения, происходящие в симметричных телах, достаточно маленьких, чтобы быть легко обработанными в пределах лаборатории, но измерение крошечных сил тяготения, которые вызываются такими телами, может оказаться далеко за пределами существующих у нас возможностей.

Начало решения проблемы было заложено еще во времена Ньютона благодаря работам английского ученого Роберта Гука (1635—1703). Как предварительное объяснение к работе Гука, позвольте мне напомнить вам, что когда силы прикладываются к телу, то в результате воздействия этих сил тело часто изменяет свою форму. Если деревянная доска положена на две опоры и кто-то сидит в центре, то доска согнется под грузом. Если резиновый жгут потянуть за оба конца в противоположных направлениях, он растянется. Если сжать в кулаке губку, то она сожмется, а если вращать ее концы в противоположных направлениях, она будет скручиваться. Если нажать справа на один ее конец и слева — на другой, не позволяя ей вращаться, она будет уплотняться.

Все эти типы деформирующих сил могут быть названы «нагрузками». Изменения, которым подвергается тело под воздействием нагрузок, называется «деформация».

Когда в результате воздействия нагрузок объект подвергается деформации, может получиться так, что после того, как мы удалили нагрузку, объект восстанавливает свою первоначальную форму. Деревянная доска распрямляется, после того как вы встаете; резиновый жгут стягивается, после того как отпустили его концы; губка, выпущенная из рук сжимающего, крутящего

или уплотняющего ее, прыгает назад. Опять же стальной шар сплющивается после удара о землю, так же как бейсбольный мяч после удара битой или шар для гольфа после удара клюшки. Когда деформирующая сила прошла, все сферы становятся прежними. Эта тенденция возвращаться к первоначальной форме после деформации под нагрузкой называется «эластичность» или упругость.

У любой материи имеется предел упругости — точка, после которой нагрузка на тело произведет его постоянную деформацию. Для материала типа воска эта точка может быть легко достигнута, и даже слабые нагрузки заставят кусок воска постоянно изменять свою форму. (Он скорее пластичен, чем эластичен.) Если приложить слишком большое усилие к неукрепленному центру деревянной доски, она сломается. Резиновый шнур при слишком большом растяжении будет «звенеть» (и лопнет). Стальной шар при слишком большом сжатии сплющится.

Однако, если работать с нагрузками недостаточно большими, чтобы превзойти этот предел, можно, как это сделал Гук, прийти к весьма полезному обобщению, которое может быть кратко выражено следующим образом: «Деформация пропорциональна нагрузке».

Это выражение называется законом Гука. Как можно увидеть из закона Гука, если сила x растягивает пружину на расстояние y , то сила $2x$ будет растягивать ее на расстояние $2y$, а сила $x/2$ будет растягивать ее на расстояние $y/2$. Предположим тогда, что величина растяжения, которое произвела некая известная сила, измерено. Тогда любая сила неизвестной величины (в диапазоне предела упругости) может быть измерена величиной деформации, которую произвела эта нагрузка.

Этот принцип может применяться к любому другому виду нагрузок, который производит легко измеряемую деформацию, например к кручению или искривлению эластичного прутка и волокна. Когда, для того чтобы измерить размер неизвестной нагрузки по величине скручивания, используется кручение, установка, на которой производятся измерения, называется «крутильными весами». Если взять чрезвычайно тонкое волокно, которое может быть искривлено даже очень маленькими силами, становится понятно, что даже крошечные силы тяготения могут быть измерены.

В 1798 году английский ученый Генри Кавендиш (1731—1810) использовал для этой цели тонкие крутильные весы.

Его крутильные весы состояли из легкого прута, подвешенного за середину на тонком проводе приблизительно в ярд длиной. На каждом из концов легкого прута находился свинцовый

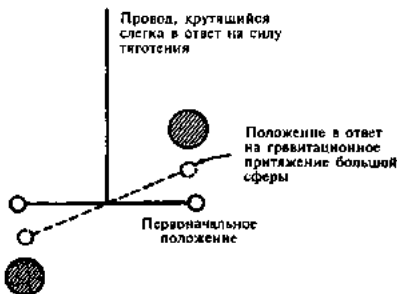
шар диаметром приблизительно в два дюйма. Вообразите себе силу, приложенную к каждому свинцовому шару в противоположных направлениях и под прямым углом к пруту и к тонкому проводу. Чрезвычайно маленьких сил было бы вполне достаточно, чтобы заставить провод скручиваться.

В качестве предварительного шага Кавендиш приложил чрезвычайно маленькие силы, чтобы определить получающееся количество смещения. Затем, тщательно экранируя свой аппарат от воздушных потоков, он принес два больших свинцовых шара, каждый приблизительно восемь дюймов в диаметре, и расположил их почти в контакте с маленькими свинцовыми шарами, но на противоположных сторонах. Сила тяготения между свинцовыми шарами теперь произвела скручивание в волокне, и, зная полный угол скручивания, Кавендиш смог измерить величину силы, возникшей между маленьким и большим свинцовыми шарами. (Оказалось, что она равна примерно $1/1\,000\,000$ ньютона.)

Теперь предположим, что мы преобразуем уравнение 4.1 следующим образом:

$$G = \frac{Fd^2}{mm'} \quad (\text{Уравнение 4.2})$$

Зная значение F , измеренного по методике, описанной выше, достаточно просто измерить массу свинцовых шаров (m и m') и расстояние между их центрами (d). Как только все значения символов на правой стороне уравнения стали известны, вычислить значение G — простая арифметическая задача. (Так как единицы измерения F в системе МКС — кг-м/с², единицами d^2 , m^2 и mm'



Эксперимент Кавендиша

являются соответственно метры на метры и килограммы на килограммы, то есть кг^2 ; единица измерения G , полученная из уравнения 4.2, равна $(\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2) \cdot \text{м}^2/(\text{кг}^2)$, или $\text{м}^3/\text{кг}\cdot\text{с}^2$.)

Лучший современный расчет дает нам значение G , равное $0,0000000000667 \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{с}^2$, конечно же достаточно крошечное значение. Надо отдать должное большому таланту Кавендиша-экспериментатора, потому что в еще в первом своем измерении он получил значение очень близкое к этому.

Предположим, теперь мы преобразуем уравнение 4.1 следующим образом:

$$m' = \frac{Fd^2}{Gm}. \quad (\text{Уравнение 4.3})$$

И попытаемся еще раз определить массу Земли (m'). Мы уже имеем, в системе МКС, значение для F , равное $0,98$, значение d , равное $6\,370\,000$ и значение (m) равное $0,1$. Если мы теперь добавим значение G равное $0,0000000000667$, то вычислить массу Земли m' — простая арифметика. Как вы можете увидеть, m' равно $(0,98) \cdot (6\,370\,000) \cdot (6\,370\,000)$, деленное на $(0,0000000000667) \cdot (0,1)$, или, примерно, $6\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ килограммов.

Физики обычно выражают такие большие числа как степени числа 10. Таким образом, $1\,000\,000$ обычно записывают в виде 10^6 , что выражает произведение шестидесяти. Экспонента (для чисел больше 1) показывает число нулей в исходном числе. Из этого следует, что $6\,500\,000$ равно $6,5 \times 10^6$. Отрицательные экспоненты выражают числа меньше чем 1, то есть 10^{-6} равно $1/10^6$ или $1/1\,000\,000$, или $0,000001$. То есть $0,00000235$ равно $2,35 \times 10^{-6}$.

Используя такую экспоненциальную систему обозначений, можно записать значение $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{с}^2$, а массу Земли как $m' = 6 \times 10^{24} \text{ кг}$. (В системе СГС значение $G = 6,67 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{с}^2$, а масса Земли равна $6 \times 10^{27} \text{ г}$.)

Глава 5

ВЕС

Форма Земли

Определяя значение G , Кавендиш в действительности определил массу Земли. По этой причине о Кавендише часто говорят как о «том, кто взвесил Землю», но на самом деле он сделал совсем не это.

В обычном языке слова «вес» и «масса» часто имеют одно и то же значение, а о теле часто говорят как о «тяжелом» или «массивном»; даже физики иногда попадают в эту западню. Однако рассмотрим, что такое вес. Вес тела — это сила, с которой тело притягивается к земле. Повторяю, вес — это сила, и единицы измерения он имеет как у силы!

Простой путь измерения веса объекта состоит в том, чтобы подвесить его на кольцевую пружину. В соответствии с законом Гука сила, с которой тело притягивается к Земле, будет растягивать пружину; величина же растяжения (или деформации) пропорциональна силе растяжения (или нагрузке). Именно по этому принципу устроены для измерения веса приборы такого типа — пружинные весы.

Масса тела, с другой стороны, является количеством инерции, которой оно обладает. Согласно второму закону Ньютона, $m = f/a$, то есть это — сила, разделенная на ускорение. Вес, который является силой, должен в соответствии с тем же самым законом быть массой, умноженной на ускорение. В случае веса, который является силой воздействия поля тяготения Земли на тело, рассматриваемое ускорение, естественно, является тем, что произведено полем тяготения земли.

Вес тела (w), другими словами, равен массе (m) этого тела, умноженной на ускорение свободного падения (g), возникшее благодаря земной гравитации (то есть — силе притяжения Земли):

$$w = mg. \quad (\text{Уравнение 5.1})$$

Так как значение g при обычных условиях примерно постоянно, вес, можно сказать, прямо пропорционален массе тела. Сказать, что А является в 3,65 раза столь же массивным, как В, эквивалентно тому, чтобы сказать, что при обычных условиях А является в 3,65 раза более тяжелым, чем В. Поскольку эти два утверждения обычно эквивалентны, существует сильное искушение признать их синонимами, и в этом и скрывается источник путаницы между массой и весом.

Эта путаница еще ухудшается тем, что для них используются общие единицы измерения. Тело массой в один килограмм, как обычно считают, имеет и вес в один килограмм¹. В системе МКС, однако, единицы измерения m — килограммы (кг), а единицы измерения g — м/с². Так как вес равен массе, умноженной на ускорение свободного падения (mg), то единицы

¹ Единицы измерения веса (фунт, унция и т. д.) использовались задолго до того, как Ньютон разработал свою концепцию массы. Единицы измерения веса были замешиваны и применены к массе, что стало «ошибкой, не подлежащей исправлению».

измерения веса — кг-м/с², или Н (ньютоны). Таким образом, при нормальных условиях один килограмм массы проявляет 9,8 Н силы.

Килограмм веса (который может быть сокращен как кг (веса), чтобы отличить его от килограмма массы) *не равен* 1 кг, а равен 9,8 Н. В системе СГС g равно 980 см/с². Таким образом, вес тела с массой 1 г равен 1 г, умноженному на 980 см/с², или 980 г-см/с². Следовательно, 1 г (веса) равняется 980 динам.

Все это может показаться вам излишне пуристическим — созданием различий там, где их на самом деле нет. В конце концов, если вес и масса всегда изменяются одинаковым образом, зачем так много беспокоиться относительно того, что есть что?

Дело в том, что масса и вес не всегда изменяются одинаково. Они связаны с g , а значение g не является константой при любых условиях.

Сила тяготения (F), которую Земля проявляет на некотором произвольно взятом теле, равна mg , как это показано в уравнении 5.1. Но она также равна Gmm'/d^2 , как это показано в уравнении 4.1. Поэтому $mg = Gmm'/d^2$, или, если разделить обе части уравнения на m :

$$g = \frac{Gm'}{d^2}. \quad (\text{Уравнение 5.2})$$

Из величин, от которых зависит значение g в уравнении 5.2, гравитационная постоянная (G) и масса земли (m') могут рассматриваться как константы. Значение d , однако, которое является расстоянием от тела до центра Земли, — конечно, не константа, и (g) изменяется обратно пропорционально квадрату этого расстояния.

Объект на уровне моря, например, может быть на расстоянии 6370 км от центра Земли, но на вершине близлежащей горы он будет на расстоянии 6373 км от центра, а страталайнер поднимет его на высоту 6385 км от центра.

Даже если мы ограничим себя высотой на уровне моря, расстояние до центра Земли не всегда равно одной и той же величине. Под воздействием лишь силы тяжести Земля имела бы правильную сферическую форму (не принимая во внимание мелкие поверхностные недостатки) — факт, указанный еще Аристотелем, а потому расстояние от уровня моря до центра Земли всюду было бы одним и тем же. Однако вторым из влияющих факторов является тот факт, что Земля вращается вокруг своей оси. Это вращение, как впервые отметил Ньютон, означает, что Земля не может быть правильной сферой.

Поскольку Земля вращается вокруг своей оси, поверхность Земли непрерывно испытывает ускорение, направленное внутрь, к центру Земли (так же, как это происходит с Луной при ее вращении вокруг Земли). Но если это так, то в действие вступает третий закон Ньютона. Центр Земли проявляет постоянную силу на внешних слоях Земли, чтобы создать постоянное, направленное вовнутрь ускорение, поскольку планета вращается; внешние же слои должны поэтому действием и реакцией проявлять силу, направленную наружу от центра Земли. Сила, направленная внутрь, обычно называется «центростремительной силой», а та, что направлена наружу, называется «центробежной силой» (эти слова, пришедшие из латинского языка, соответственно означают — «идущий к центру» и «бегающий от центра»).

Две эти силы направлены в противоположные стороны, и как результат мы имеем растяжение земной материи. Если вы можете вообразить крепкую веревку, протянувшуюся от поверхности Земли и до ее центра, с поверхностными слоями Земли, тянущими наружу ее один конец, и центром Земли, тянущими ее вовнутрь за другой конец, то вам будет понятно, что такая веревка будет немного растягиваться; так вот материя, из которой состоит Земля, делает то же самое.

Если бы каждая точка на поверхности Земли вращалась с одинаковой скоростью, то растяжение было бы одинаковым по всей поверхности и Земля имела бы правильную сферическую форму. Однако когда Земля вращается на своей оси, то чем ближе к оси находится некоторая часть поверхности Земли, тем медленнее она вращается. На полюсах поверхность Земли касается оси, и поэтому скорость вращения там нулевая. На экваторе же, наоборот, поверхность Земли находится на максимальном расстоянии от оси, и соответственно скорость вращения там — самая высокая (чуть больше чем 1600 километров в час).

Взаимодействующие силы на полюсах равны нулю и плавно возрастают при приближении к экватору. Одновременно возрастает и «растяжение» земной поверхности, которое достигает своего максимального значения на экваторе. Из-за этой экваториальной выпуклости расстояние от центра Земли до уровня моря на экваторе на 21 км (13 миль) больше, чем такое же расстояние на любом из полюсов.

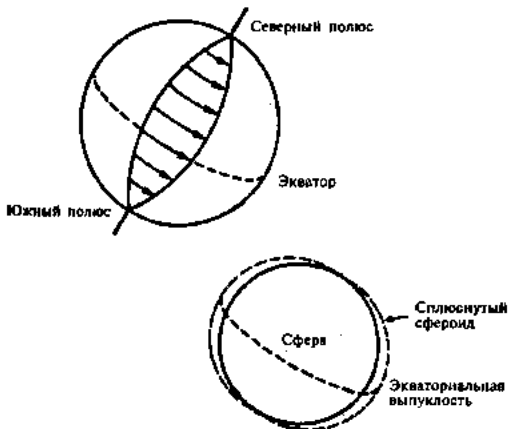
Земля поэтому не сфера, а сплюснутый сфероид.

Безусловно, 21 км при полном расстоянии в 6370 км — это немного, но и этого вполне достаточно, чтобы внести существенные различия в значение g . Что же касается выпуклости

на экваторе и локальных различий в высоте, то, например, в штате Аляска есть точки, где значение g больше чем $9,82 \text{ м/с}^2$, в то время как на экваторе это значение — только чуть выше, чем $9,78 \text{ м/с}^2$. Представленные цифры отражают разницу в почти полпроцента и соответственно отражаются на весе.

Другими словами, вес объекта в значительной мере изменяется при перемещении его с места на место по поверхности Земли, что и показывают пружинные весы. Человек, который весит 200 фунтов на полюсах, весил бы 199 фунтов на экваторе. Химику или физику, заинтересованному в массе объекта (многие свойства объектов зависят от массы), такое «замещение» измерения массы измерением веса доставило бы серьезные погрешности.

Ученые обычно, когда у них возникает необходимость «взвесить» объект, используют весы, состоящие из двух чашек, расположенных на противоположных концах прутка, который в середине установлен на шарнире. В одну чашку помещают объекты известного веса, а в другую — объект, который необходимо взвесить. Известные веса добавляют до тех пор, пока вся конструкция не сбалансируется. В этом случае сила тяжести на обеих чашках



Центробежная сила и экваториальная выпуклость

становится одинаковой (если бы она была большей на любой из них, то эта чашка опустилась бы, в то время как другая поднялась бы вверх).

Если вес с обеих сторон один и тот же, то и mg будет с обеих сторон одинаковым, так как g , которое в больших пределах изменяется в зависимости от точки земной поверхности, на которой находится тело, будет одно и то же для двух чашек весов, стоящих рядом на практически одной и той же точке земной поверхности. Поэтому масса m объектов, находящихся в обеих чашках весов, будет одна и та же. То есть масса неизвестного объекта будет равна массе грузов (вес которых нам известен)¹.

Вне Земли

Естественно, мелкие изменения в значениях g становятся все большими по мере удаления тела от центра Земли. Дальнейшее усложнение ситуации представляет собой то, что при удалении тела на большое расстояние от Земли мы можем приблизить его к некоторому другому значительному скоплению массы. Такая ситуация возникает в первую очередь в связи с Луной и имеет очень важное значение, поскольку искусственные объекты уже приземлились там, а живые люди могут встать на поверхность Луны в ближайшие несколько лет².

Объект на поверхности Луны все еще находится в пределах поля тяготения Земли, которое простирается не только на Луну, но и в принципе на всю Вселенную. Однако Луна также имеет собственное поле тяготения. Это поле намного слабее, чем земное, поскольку Луна намного менее массивна, чем Земля, а объект на поверхности Луны находится намного ближе к центру Луны, чем к центру Земли; гравитационное притяжение Луны поэтому гораздо сильнее, чем таковое у отдаленной Земли, и человек, стоящий на поверхности Луны, будет ощущать только ее притяжение.

Но Луна притягивает к своей поверхности объект отнюдь не с той же силой, как это делает Земля. Чтобы увидеть разницу между этими двумя силами, обратимся назад, к уравнению 4.1, которое утверждает, что $F = Gmm'/d^2$. Эта F представляет собой

¹ Между прочим, масса тоже не полностью постоянна. Однако изменения в массе объектов становятся важными только при экстремальных скоростях и вряд ли могут встретиться вам в обычной жизни.

² Сейчас, в начале XXI века, мы можем сказать: «Уже давно петики». (Примеч. пер.)

интенсивность притяжения Земли, с которым она воздействует на объект на ее поверхности. Притяжение Луны, с которым она воздействует на объект на ее поверхности, мы можем обозначить F_m .

Далее, объект имеет одну и ту же массу независимо от того, находится ли он на поверхности Земли или на поверхности Луны, так что m остается неизменным. Значение G также неизменно, поскольку оно является константой повсюду во Вселенной. Масса Луны, однако, как известно, является $1/11$ массы (m') Земли. Масса Луны, следовательно, равна $m'/81$. Расстояние от поверхности Луны до ее центра — 1737 км, или примерно $1/11$ расстояния от поверхности Земли до ее центра, равного 6370 км (d). Следовательно, мы можем выразить расстояние от поверхности Луны до ее центра как $3d/11$.

Теперь подставим эти значения в уравнение 4.1, используя массу и радиус Луны, и мы получим уравнение, которое выражает значение силы притяжения Луны для объекта, находящегося на ее поверхности. Итак, это:

$$F_m = \frac{Gm(m'/81)}{(3d/11)^2} \quad (\text{Уравнение 5.3})$$

Если мы теперь разделим уравнение 5.3 на уравнение 4.1, то найдем, что F_m/F (отношение силы тяжести на Луне к силе тяжести на Земле) равно $1/6$, разделенной на $(1/11)^2$, или почти точно — $1/6$. Таким образом, сила тяжести, которую мы испытали бы на поверхности Луны, будет равна $1/6$ той, к которой мы привыкли на поверхности Земли. Человек весом в 180 фунтов, взвесив себя на пружинных весах, найдет, что он весит всего 30 фунтов.

Но, несмотря на столь решительное уменьшение веса, масса объекта останется неизменной. Это означает, что сила, требующаяся, чтобы ускорить данный объект до данной величины, остается той же самой и на Луне, и на Земле. Мы могли бы поднять в воздух своего 180-фунтового друга без особых усилий, поскольку усилие подъема будет не больше, чем то, которое мы развиваем на Земле, поднимая 30 фунтов. Однако на Луне мы не могли бы поднять человека более быстро, чем на Земле. Здесь, на Земле, мы можем достаточно легко управиться с чем-то, что весит 30 фунтов. Но на Луне это что-то, весящее 30 фунтов, будет иметь массу в шесть раз больше «нормальной», а такое количество массы можно переместить только достаточно медленно. По этой причине манипулирование объектами на поверхности Луны создает чувство «замедленного движения», или как будто проталкиваешься сквозь патоку.

Опять же, если мы подпрыгиваем на Луне, силе наших мускулов будет противостоять только $\frac{1}{6}$ той силы тяготения, к которой мы привыкли на Земле. Поэтому центр нашего тела поднимется на высоту в шесть раз большую, чем это было бы на Земле. Достигнув этой необычной высоты, мы будем падать по направлению к поверхности, но с ускорением, составляющим $\frac{1}{6}$ обычного ускорения ($1,63 \text{ м/с}^2$). Это означает, что мы, внешне, как бы падали медленно вниз, «планируя, подобно перу». Однако к тому времени, когда бы мы снова достигли поверхности с $\frac{1}{6}$ от обычного ускорения и с расстояния большего в шесть раз, мы к моменту приземления все равно бы достигли той скорости, с которой мы приземлились бы после прыжка на Земле (затратив для этого равное усилие, но достигнув значительно меньшей высоты).

Остановка после такой скорости на Луне потребовала бы от нас таких же усилий, как на Земле, поскольку это усилие зависит от массы, а не от веса, а масса остается неизменной и на Луне. И если, введенный в заблуждение своей легкостью, вы поддадитесь искушению приземлиться на большой палец правой ноги, то вы почти наверняка сломаете этот палец.

Однако ситуация может быть сделана даже более необычной и без всяких полетов на Луну. Субъективное ощущение, которое мы называем «весом», является результатом того факта, что мы физически изолированы от реакции на ускорение силы тяжести. Когда мы стоим на поверхности Земли, сама земная материя препятствует нашему ускоренному падению к центру Земли. Эта сила, приложенная к нам в направлении, противоположном реакции твердого основания (земли, на которой мы стоим), и интерпретируется нами как «вес».

Если бы мы падали с ускорением, равным гравитационному ускорению (свободное падение), мы не почувствовали бы никакого веса. Если бы мы находились в подъемнике, который сорвался и рухнул вниз, или в самолете, который пошел в пики, наше чувство веса пропало бы. Мы не сможем давить ногами на пол лифта или самолета, так как этот пол будет падать так же быстро, как мы. И если бы мы были в воздушном пространстве в пределах кабины подъемника, мы не смогли бы спуститься к его полу, поскольку этот пол перемещался бы с такой же скоростью, как это делали мы. Поэтому мы оставались бы «плавающими в воздушном пространстве» и ощутили бы себя невесомыми.

Указанные выше примеры свободного падения несовершенно. Ни подъемник, ни самолет не могут падать длительное время без того, чтобы разбиться и тем самым нарушить экспери-

мент. Кроме того, падение подъемника или самолета было бы несколько замедлено сопротивлением воздуха, через который они мчатся, причем замедление это больше, чем то, которое испытывает от сопротивления воздуха человек, находящийся в пределах этого подъемника или самолета. Поэтому некоторое чувство веса все-таки присутствовало бы.

Чтобы достичь истинного чувства свободного падения, мы были бы должны подняться выше главной части атмосферы, скажем на высоту примерно 160 километров или более над поверхностью Земли. Чтобы удержаться на этой высоте, было бы неплохо иметь также небольшое поперечное движение, которое удерживало бы нас на орбите вокруг Земли, таким же образом, как комбинация внутренних и поперечных сил удерживает Луну на орбите вокруг Земли.

Описанная ситуация точно воспроизведена в отношении искусственного орбитального спутника. Такой спутник находится в свободном падении и может продолжать это свободное падение в течение долгого периода времени. Астронавт в его пределах не ощущает собственного веса. Это происходит не потому, что он — «вне притяжения Земли», как говорят некоторые дикторы службы новостей. Это происходит потому, что он находится в состоянии свободного падения и все в этом спутнике вместе с ним самим падает с абсолютно одним и тем же ускорением.

Сама Земля находится в состоянии свободного падения на орбите вокруг Солнца. И хотя ее масса огромна, вес ее равен нулю. Кавендиш не «взвесил Землю», поскольку это было ему не нужно; ее вес был равен нулю, и это понимали уже со времен Ньютона. Что сделал Кавендиш, так это — определил массу Земли.

Даже в свободном падении, когда вес равен нулю, масса любого взятого тела остается неизменной. Астронавты, строящие космическую станцию, будут перемещать огромные прогоны, которые не будут иметь никакого веса. Они даже будут способны балансировать такими прогонами на одном пальце, если прогон и палец будут неподвижны относительно друг друга. Однако если прогон был приведен в движение, или если он уже перемещается и должен быть остановлен, или требуется изменить направление его движения, то усилие, которое требуется приложить для этого, будет точно такое же большое, как если бы это происходило на Земле. Человек, попавший в ловушку между двумя прогонами, перемещающимися по направлению друг к другу, может оказаться раздавленным насмерть двумя невесомыми, но не «безмассовыми» объектами.

Различие между массой и весом, которое кажется настолько непринципиальным на Земле, является поэтому совсем не тривиальным, когда мы находимся в космическом пространстве, и легко может стать вопросом жизни и смерти.

Вторая космическая скорость

По мере того как объект падает на землю со все большей и большей высоты, время, которое требуется объекту, чтобы достичь ее, увеличивается, а объект приближается к земле со все более и более высокой скоростью. Если мы воспользуемся уравнениями 2.1 и 2.2, подставив в эти уравнения значение a , равное $9,8 \text{ м/с}^2$ (ускорение свободного падения), то можем сделать некоторые легкие вычисления. Тело, упавшее с высоты 4,9 метра, ударится о землю через одну секунду и будет перемещаться в момент соударения со скоростью $9,8 \text{ м/с}$. Если отпустить тело с высоты 19,6 метра, оно ударилось бы о землю через две секунды, а скорость его была бы соответственно $19,6 \text{ м/с}$. Если отпустить тело с высоты 44,1 метра, оно ударилось бы о землю через три секунды, перемещаясь в момент контакта с землей со скоростью $29,4 \text{ м/с}$.

Казалось бы, что если вы бы только могли поднять объект на достаточно большую высоту, то достигли бы такой высокой скорости соударения, какой вам захотелось. Конечно, это кажется верным, но только в том случае, если значение g остается одним и тем же для любых высот.

Но значение g не является константой; оно уменьшается с высотой. Значение g изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от объекта до центра Земли. Точка подъема в 6370 километрах над поверхностью Земли будет на самом деле на высоте 12 740 километров от Земли, поскольку мы рассчитываем расстояние до центра — в два раза дальше от центра, чем от поверхности. А значение g на такой высоте равно всего лишь $1/4$ того, каким оно является на поверхности.

Объект, падающий из состояния покоя, с высоты 6370 километров над поверхностью Земли, в первую секунду разовьет скорость, равную лишь $2,45 \text{ м/с}$, вместо $9,8 \text{ м/с}$, которых он достиг бы после одной секунды падения в непосредственной близости от поверхности Земли.

Но поскольку тело продолжает падать и приближаться к Земле, значение g , конечно, постоянно возрастает и в конце падения достигает $9,8 \text{ м/с}^2$. Однако падающее тело не ударилось бы о поверхность Земли со столь же высокой скоростью соуда-

рения, как оно бы сделало, если бы значение g было равно $9,8 \text{ м/с}^2$ на протяжении всего его пути вниз.

Представьте себе тело, брошенное сначала с высоты 1000 километров, затем — с высоты 2000 километров, затем — с 3000 километров и так далее. Падение с высоты в 1000 километров закончилось бы скоростью соударения, равной v_1 . Если бы значение g было постоянным, то падение с высоты 2000 километров вызвало бы увеличение в скорости на первых 1000 километрах, равное увеличению на вторых 1000 километрах, так что окончательная скорость соударения была бы $v_1 + v_2$, или $2v_1$. Однако верхние 1000 километров представляют собой ту часть расстояния, на котором значение g меньше, чем на более низких 1000 километрах. Соответственно движение по этой половине дистанции добавляет меньшее количество скорости, чем при движении по более низкой половине, и заключительная скорость соударения равна $v_1 + v_2$, где v_2 меньше, чем v_1 . Те же самые аргументы могут быть повторены для других частей дистанции, таким образом, падение с высоты 10 000 километров закончилось бы со скоростью соударения, равной $v_1 + v_2 + v_3 + v_4$ и так далее, до v_{10} . Здесь каждый символ представляет собой часть заключительной скорости, привнесенной в окончательную все более и более высокими частями дистанции, каждая из которых равна 1000 километров, и значение каждого следующего символа меньше, чем таковое предшествующего.

Всякий раз, когда вы видите перед собой ряд чисел, каждое из которых меньше, чем предыдущее, имеется возможность наличия сходящегося ряда. В таком ряде сумма чисел никогда не превосходит некоторое установленное значение — предел суммы — независимо от того, сколько чисел добавлено. Наиболее хорошо известный случай такого сходящегося ряда — это $1 + \frac{1}{7} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16}$, в котором каждое следующее число — половина предыдущего. Сумма первых двух чисел — 1,5; сумма первых трех чисел — 1,75; сумма первых четырех чисел — 1,875; сумма первых пяти чисел — 1,9325 и так далее. По мере добавления в ряд все большего количества чисел сумма становится все больше и приближается к 2, никогда не достигая его. Предел суммы этого своеобразного числового ряда равен 2.

Оказывается, что числа, представляющие собой приращения скорости, получаемые в результате падения тела со все большей высоты, действительно образуют сходящийся ряд. Поскольку тело падает со все большей и большей высоты, окончательная скорость соударения не увеличивается беспрестанно; вместо этого она имеет тенденцию стремиться к некоторой предельной скорости, преодолеть которую не может.

Эта предельная скорость соударения (v_1) зависит от значения g и радиуса (r) тела, которое является источником поля тяготения. Важность величины радиуса опирается на тот факт, что чем больше его значение, тем медленнее «затухает» при увеличении расстояния значение g . Предположим, что тело имеет радиус 1000 километров. Находящееся на расстоянии 10 000 километров от его центра падающее тело в десять раз дальше от центра, чем объект, лежащий на его поверхности, и поэтому значение g там равно всего $1/100$ значения на поверхности. Предположим далее, что тело имеет радиус 2000 километров, находящееся на расстоянии 10 000 километров от его центра падающее тело будет тогда только в пять раз дальше от центра, чем объект, находящийся на поверхности. И значение g соответственно будет равно только $1/25$ значения на поверхности. Поэтому по мере прохождения высот значение g уменьшалось бы более быстро для маленького тела, чем для большого, и окончательная скорость соударения была бы меньше для маленького тела, несмотря на то что поверхностное значение его g может быть тем же самым, что и у большого тела.

Оказывается, что:

$$v_1 = \sqrt{2gr}. \quad (\text{Уравнение 5.4})^1$$

В системе МКС значение g равно $9,8 \text{ м/с}^2$, что касается r , то оно равно 6 370 000 м, таким образом, $2gr$ равно приблизительно $124\,800\,000 \text{ м}^2/\text{с}^2$. При извлечении квадратного корня из этого числа мы должны также извлечь квадратный корень и из единиц измерения. Так как квадратный корень из a^2b^2 равен ab , должно быть ясно, что квадратный корень из $\text{м}^2/\text{с}^2$ равен м/с . Квадратный корень из $124\,800\,000 \text{ м}^2/\text{с}^2$ равен приблизительно $11\,200 \text{ м/с}$. То есть предел скорости соударения равен $11,2 \text{ км/с}$ (или примерно семь миль в секунду). Ни один объект, падая по направлению к Земле из состояния покоя, не может когда-либо удариться об нее со скоростью большей чем $11,2 \text{ км/с}$. (Конечно, если рассматриваемый объект представляет собой метеор или что-либо в этом роде, который летит с ускорением в направлении Земли, то его собственная скорость добавится к скорости, вызванной полем тяготения Земли, и он ударится о Землю со скоростью соударения большей чем $11,2 \text{ км/с}$.)

¹ Поскольку эта книга является введением в физику, я не всегда буду давать derivation используемых уравнений, так как это может вовлечь в разговор необъяснимые концепции или математические методы, которые я предпочитаю не использовать.

Для Луны, на которой значения g и r гораздо меньше, максимальная скорость соударения будет равна только 2,4 км/с (или 1,5 мили в секунду).

Давайте теперь рассмотрим этот вопрос с другой точки зрения. Вместо падающего тела рассмотрим такое, которое перемещается вверх от поверхности Земли. Для тела, перемещающегося вверх, g представляет собой величину, на которую его скорость уменьшается в каждую секунду полета. В данном случае ситуация развивается с точностью до наоборот, то есть если тело, первоначально находившееся в состоянии покоя, падает с высоты h и в момент соударения достигает скорости v , то тело, брошенное вверх со скоростью v , перед тем как остановиться, достигнет высоты h (и начнет падать назад, по направлению к Земле).

Но тело, падающее с любой высоты, однако, никогда не может достигнуть скорости соударения большей чем 11,2 км/с. Это означает, что, если тело бросают вверх со скоростью 11,2 км/с или больше, оно никогда не достигнет точки покоя и поэтому никогда не упадет обратно на Землю (взаимное влияние и наложение гравитационных полей других тел мы не рассматриваем).

Таким образом, предел скорости соударения — это также скорость, с которой тело, подброшенное вверх, навсегда улетит с Земли; поэтому такая скорость называется «второй космической скоростью». Вторая космическая скорость на поверхности Земли равна 11,2 км/с, а вторая космическая скорость на поверхности Луны — 2,4 км/с.

Тело, которое находится на орбите вокруг Земли, не может улететь от нее. Оно падает на Землю, и только его горизонтальная скорость препятствует этому падению вниз. Поэтому для того чтобы удержать объект на орбите, требуется гораздо меньшая скорость, чем та, которая нужна, чтобы вывести его на нее. Для круговой орбиты скорость должна быть равна \sqrt{gr} , где r — расстояние от орбитального тела до центра земли, а g — величина ускорения свободного падения на таком расстоянии. В непосредственной близости от поверхности Земли такая скорость составляет 7,9 км/с (или 4,9 мили в секунду). Орбитальные спутники перемещаются с такой скоростью и заканчивают свое «кругосветное путешествие» длиной 40 000 километров за минимальное время в 85 минут.

По мере увеличения расстояния от центра Земли значение r , конечно, увеличивается, в то время как значение g — уменьшается, изменяясь как $1/r^2$. Изменение \sqrt{gr} (которая называется «первой космической», или «орбитальной», скоростью) происходит как $\sqrt{(1/r^2)r}$ или $\sqrt{1/r}$. Другими словами, первая

космическая скорость тела изменяется обратно пропорционально квадратному корню из расстояния до объекта, вокруг которого вращается данное тело.

Мы знаем, что расстояние от Луны до центра Земли равно 382 400 километрам. Это в 60,3 раза больше расстояния от центра орбитального спутника, находящегося сразу за пределами атмосферы. Поэтому на Луне первая космическая скорость меньше, чем такая же на Земле, коэффициент пересчета равен $\sqrt{60,3}$. Другими словами, первая лунная космическая скорость равна $7,9/\sqrt{60,3}$, или примерно 1 км/с.

Теперь рассмотрим спутник, находящийся на орбите в 42 000 километров от центра Земли (приблизительно 35 600 километров над ее поверхностью). Его расстояние от центра Земли в 6,6 раза больше, чем у объекта на поверхности Земли. Его первая космическая скорость поэтому равна $7,9/\sqrt{6,6}$, или почти 3,1 км/с. Длина его орбиты приблизительно равна 264 000 километрам, и при достижении первой космической скорости спутнику потребуется как раз 24 часа для того, чтобы совершить одно обращение вокруг планеты. Поэтому при таких условиях спутник будет двигаться со скоростью вращения Земли, а нам будет казаться, что он неподвижно висит на небе. Такие внешне неподвижные спутники прекрасно служат в качестве спутников связи.

Глава 6 МОМЕНТ

Нипульс

Давайте снова рассмотрим падающее тело. Объект, удерживаемый в некоторой точке над землей, находится в состоянии покоя. Если мы отпустим его, то он сразу начнет падать. Очевидно, что мы создали движение там, где его изначально не существовало. Но «создали» — слово, которое физики пересваривают с трудом (для этого существуют философы). Разве что-нибудь действительно может быть создано из ничего? Или одна вещь просто превращается в другую, так что вторая появляется только за счет перехода первой в состояние небытия? Или, возможно, один объект подвергается изменениям (например, переходит из состояния покоя в стадию движения, например) потому и только потому, что другой объект подвергается противодействующим изменениям (например, из состояния покоя — в стадию движения, но в противоположном направлении). В этом последнем случае то,

что создано, не является движением, а является движением плюс «антидвижение», и если сложить их вместе, то мы получим нуль. а следовательно, возможно, что никакого движения не было создано вообще.

Чтобы разрешить эти вопросы, давайте сначала попробуем точно решить, что же мы подразумеваем под понятием «движение».

Мы можем начать с того, скажем, что сила, конечно, создаст движение. Приложенная к любому телу, первоначально находившемуся в состоянии покоя, например к хоккейной шайбе на льду, сила порождает ускорение и заставляет шайбу перемещаться все быстрее и быстрее. Чем дольше действует сила, тем быстрее движется хоккейная шайба. Если сила постоянна, то скорость в любой данный момент времени пропорциональна величине силы, умноженной на время, в течение которого она действует. К этому произведению силы (f) на время (t) применяют термин «импульс» (I):

$$I = ft. \quad (\text{Уравнение 6.1})$$

Так как сила производит движение, мы могли бы ожидать, что данный импульс (то есть данная сила, действующая в течение данного времени) будет всегда производить одно и то же количество движения. Однако если это так, то количество движения не может зависеть только от одной скорости. Если та же самая сила будет действовать на вторую хоккейную шайбу, массой в десять раз больше первой, она создаст меньшее ускорение и за данное время создаст меньшую скорость, чем в первом случае. Поэтому количество движения, произведенного импульсом, должно также учитывать не только скорость, но и массу.

Это и есть то, что фактически подразумевается уравнением 6.1. В соответствии со вторым законом Ньютона мы знаем, что сила равна массе, умноженной на ускорение ($f = ma$). Мы поэтому можем заменить ma на f в уравнении 6.1 и написать:

$$I = mat. \quad (\text{Уравнение 6.2})$$

Но из уравнения 2.1 мы знаем, что для любого тела, начинающего движение из состояния покоя, скорость (v), произведенная силой, равна ускорению a , умноженному на время (t), то есть $at = v$. Если мы заменим v на at в уравнении 6.2, то получим:

$$I = mv. \quad (\text{Уравнение 6.3})$$

Именно эта величина, mv — масса, умноженная на время, и является действительной мерой движения тела. Тело, переме-

щающееся быстро, требует и большего усилия для своей остановки, чем то же самое тело, перемещающееся медленно. Увеличение в скорости поэтому увеличивает количество его движения. С другой стороны, массивное тело, перемещающееся с некоторой скоростью, требует и большего усилия для своей остановки, чем это требует легкое тело, перемещающееся с той же самой скоростью. Увеличение в массе также увеличивает количество его движения. Следовательно, произведение mv призвано, чтобы назваться «количеством движения» (*momentum*) (от латинского слова, означающего «движение»).

Физический смысл уравнения 6.3 заключается в том, что импульс (fi), приложенный к телу, находящемуся в состоянии покоя, заставляет это тело получить количество движения (mv), равное импульсу. В более общем виде: если тело уже находится в движении, то приложение импульса вызовет изменение количества движения, равное импульсу. Говоря более коротко, импульс (силы) равен изменению количества движения.

Единицами измерения импульса должны быть, с одной стороны, единицы измерения силы, умноженной на время, согласно уравнению 6.1, или масса, умноженной на скорость, согласно уравнению 6.3. В системе МКС единицы измерения силы — ньютоны, так что импульс может быть измерен в ньютон-с. С другой стороны, единицы измерения массы — килограммы, а единицы измерения скорости — метры в секунду, так что единицы измерения импульса (масса, умноженная на скорость) равны кг-м/с. Однако ньютоны были определены как кг-м/с². Таким образом, ньютон-с равны кг-м-с/с², или кг-м/с. То есть единицы измерения I через fi получились теми же самыми, что и единицы измерения I , полученные через mv . В системе СГС, как легко можно показать, единицы измерения импульса — дин-с или г-см/с, и они также совпадают с обеих сторон.

Закон сохранения (импульса) количества движения

Представьте себе хоккейную шайбу массой m , двигающуюся по льду со скоростью v . Ее количество движения равно mv . Теперь представьте себе другую хоккейную шайбу той же самой массы, перемещающуюся с той же самой скоростью, но в противоположном направлении. Ее скорость поэтому $-v$, и ее количество движения равно $-mv$. Количество движения, как вы видите, является векторной величиной, так как оно зависит от скорости и имеет не только количественную характеристику, величину, но и направление. Естественно, что, если мы имеем

два тела с импульсами в противоположных направлениях, мы можем сказать, что одно количество движения равняется некоторому положительному значению, а другое — некоторому отрицательному значению.

Предположим теперь, две хоккейные шайбы покрыты по кругу слоем клея, достаточно сильного, чтобы заставить их немедленно сцепиться вместе при вступлении в контакт друг с другом. И предположим, что они вступают в контакт «лоб в лоб». Если это произойдет, они мгновенно остановятся.

Будет ли уничтожено количество их движения? Нисколько. Полное количество движения системы¹ было равно $mv + (-mv)$, или 0, перед столкновением, и $0 + 0$, или (все еще) 0, после столкновения. Распределение количества движения среди частей системы до столкновения было иным, чем после столкновения, но полное количество движения осталось неизменным.

Предположим теперь, что вместо того, чтобы прилипнуть, когда эти две шайбы столкнулись (неупругое столкновение), они отпрыгнули бы друг от друга с абсолютной упругостью (упругое столкновение). Если бы это произошло, то каждая из шайб полностью изменила направление своего движения. Та, чье количество движения было равно (mv) , теперь имела бы количество движения, равное $(-mv)$, и наоборот. Вместо суммы $mv + (-mv)$ мы получили бы сумму $(-mv) + mv$. Снова произошло бы изменение в распределении количества движения, но снова — полное количество движения системы будет неизменно.

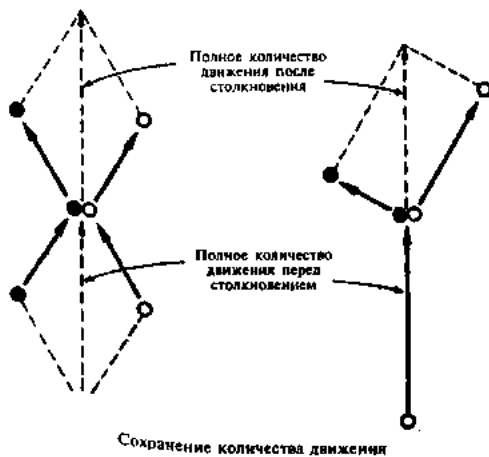
Если столкновение не было ни совершенно упругим, ни полностью неупругим, если шайбы отпрыгнули обособленно, но только слабо, то значение количества движения для каждой из шайб могло бы изменяться от mv до $-0,2mv$, в то время как количество движения другой шайбы могло измениться от $-mv$ до $0,2mv$. В любом случае конечная сумма была бы равна нулю.

Все это справедливо и в том случае, если шайбы встречаются «под углом», а не «лоб в лоб» и касаются друг друга «по скользящей». Если они встречаются «под углом», то есть таким образом, что их скорости не направлены в точно противоположных направлениях, оба импульса этих тел не обнуляются, даже если скорости этих двух шайб были равны. Полное количество движения системы можно вычислить векторным сложением этих двух индивидуальных импульсов. И шайбы тогда отпрыгнут таким обра-

¹ Под словом «система» подразумевается конечное число обсуждаемых тел, в данном случае двух хоккейных шайб, рассматриваемых вне связи с остальной частью Вселенной.

зом, каким укажет вектор их суммы. Это же сложение укажет нам на тот факт, что суммарное общее количество движения системы осталось таким же, как до столкновения. Все это также справедливо для частного случая, когда двигающаяся шайба ударяет скользящим ударом в шайбу, находящуюся в состоянии покоя. Шайба, находящаяся в состоянии покоя, будет приведена в движение, а шайба, которая изначально перемещалась, изменит направление своего движения; однако оба получившихся в результате столкновения импульса в итоге составят величину, равную оригинальной.

Рассматриваемые величины останутся, по существу, неизменными, даже если эти две шайбы имели различные массы. Предположим, что одна шайба перемещалась с некоторой данной скоростью направо и имела количество движения, равное mv , в то время как другая, имеющая массу в три раза больше первой, перемещалась с той же самой скоростью налево и имела поэтому импульс, равный $-3mv$. Если рассмотреть эти две, связанные вместе после столкновения «лоб в лоб», объединенные шайбы (с полной массой $4m$), то мы увидим, что они продолжали бы перемещаться влево, в направлении, в котором



двигалась более массивная шайба, но суммарная скорость системы была бы равна половине начальной скорости оригинала ($-v/2$). Первоначальное количество движения системы было: $mv + (-3mv)$, или $-2mv$. Окончательное количество движения системы будет: $(4m) \times (-v/2)$, или $-2mv$. Опять мы видим, что полное количество движения системы осталось неизменным.

А что получается в том случае, если количество движения, как кажется, создано «из ничего»? Давайте рассмотрим пулю, которая первоначально находится в состоянии покоя (поэтому ее количество движения равно нулю), которую внезапно выстреливают из ружья, а значит — она начинает перемещаться с высокой скоростью. Как мы знаем, пуля теперь имеет значительное количество движения, равное (mv) . Однако пуля — это только часть системы. Оставшаяся часть системы — ружье — тоже должно получить импульс, равный $-mv$, так как оно перемещается в противоположном направлении. Если ружье обладает массой в n раз большей, чем масса пули, оно должно переместиться в противоположном направлении со скоростью, равной $1/n$ скорости ускоряющейся пули. Количество движения ружья (минус пуля) будет тогда: $(nm) \times (-v/n)$, или $-mv$. (Если в момент выстрела ружье не было закреплено, то этот «обратный» рывок его — хорошо виден. Если же мы стреляем из ружья обыкновенным образом, то чувствуем его обратное движение в виде «отдачи».) Полное количество движения, равное импульсу пули плюс импульс ружья, как было равно нулю до выстрела, так и осталось равно нулю после выстрела, хотя в данном случае распределение количества движения среди частей системы весьма различается до и после выстрела.

Короче говоря, все эксперименты, которые мы можем провести, приводят нас к заключению, что: *«Полное количество движения изолированной системы тел остается постоянным»*. Это выражение называется законом сохранения импульса.

Конечно, чтобы доказать обобщение, нужно не просто перечислять отдельные случаи, подтверждающие его истинность. Независимо от того, насколько часто вы экспериментируете и приходите к выводу, что количество движения сохранено, вы не можете заявить с уверенностью, что так будет всегда. В лучшем случае можно заявить, что поскольку эксперимент за экспериментом подтверждают истинность закона и поскольку в результате экспериментов не было получено данных, опровергающих этот закон, то существует большая вероятность того, что данный закон верен. Было бы гораздо лучше, если бы мы могли доказать обобщение, опираясь на другое обобщение, истинность которого уже была доказана ранее.

Например, предположите, что два тела любой массы, перемещающиеся с любыми скоростями, сталкиваются под любым углом, с любой степенью упругости. В момент столкновения одно тело прикладывает силу (f) ко второму. В соответствии с третьим законом Ньютона второе тело прикладывает к первому телу равную и противоположную по знаку силу ($-f$). Сила прикладывается в течение времени, пока эти два тела остаются в контакте. Время (t) контакта, очевидно, одинаково для обоих тел, поскольку, когда первое тело перестает быть в контакте со вторым, второе также перестает быть в контакте с первым. Это означает, что импульс первого тела на втором равен ft , а второго на первом равен $-ft$.

Импульс первого тела на втором передает изменение количества движения, равное mv , второму телу. Но импульс второго тела на первом, являющийся абсолютно равным по величине, но противоположным по знаку, должен передать изменение в количестве движения, равном $-mv$, первому. Изменения в количестве движения могут быть большие или маленькие в зависимости от размера импульса, угла столкновения и эластичности материала; однако независимо от величины изменения количества движения первого тела изменение количества движения второго тела равно по величине и противоположно по направлению. Полное количество движения системы должно оставаться тем же самым.

Таким образом, закон сохранения импульса может быть получен из ньютоновского третьего закона движения. На самом деле, однако, этого не произошло, и закон сохранения импульса был открыт в 1671 году английским математиком Джоном Валлсом (1616—1703) на дюжину лет раньше, чем Ньютон опубликовал свои законы движения. Обратный путь, кстати, тоже возможен, и третий закон движения тоже можно получить из закона сохранения импульса.

Тут у вас может появиться ощущение, что что-то не так, ведь если физики доказывают закон сохранения количества движения, опираясь на третий закон движения, а затем доказывают третий закон движения, исходя из закона сохранения количества движения, то они фактически ходят по кругу и не доказывают ничего вообще. Это бы и было, если бы происходило так, но все происходит иначе.

Здесь не столько вопрос «доказательства», сколько вопрос создания предположения и демонстрации последствий этого предположения. Можно начинать с того, что принять третий закон движения, а затем доказать, что закон сохранения импульса есть следствие его действия. Точно так же можно начать с того, что

принять закон сохранения импульса и показать, что третий закон — следствие из него.

Направление доказательства, которое вы выберете, — просто вопрос удобства. В любом случае не существует никакого магического «доказательства», также нет и никакой обычной «ясности». Целая структура опирается на тот факт, что никто в течение почти трех столетий не был в состоянии провести четкую демонстрацию опыта, который показал бы, что существует или может быть искусственно создана система, в которой не действует третий закон движения или закон сохранения импульса. Такая демонстрация может быть проведена завтра, и тогда, как последствие этой демонстрации, придется, вероятно, изменить многие основы физики; но к настоящему моменту времени вероятность того, что это случится, кажется весьма и весьма небольшой¹.

И все же, может быть, мы немного пофантазируем и попытаемся придумать случаи, когда этот закон не соответствует действительности? Например, предположим, что бильярдный шар бьет в борт бильярдного стола и отскакивает по своей собственной линии удара. Его скорость была u , стала после отскока $-v$, и так как его масса не изменилась, то первоначальная величина mu количества движения стала равна $-mv$. Разве это не явное изменение количества движения?

Да, это так. Но бильярдный шар не представляет собой систему целиком. Полная система включает в себя борт бильярдного стола, который приложил импульс, изменивший количество движения бильярдного шара. В действительности, так как бильярдный стол удержан на основании (земле) при помощи сил трения, преодолеть которые шар не может из-за их слишком большой величины, то система включает в себя также и всю планету. Количество движения Земли изменяется ровно настолько, чтобы компенсировать изменение в количестве движения бильярдного шара. Однако масса Земли значительно больше, чем у бильярдного шара, и изменение в ее скорости поэтому также соответственно меньше — слишком ничтожно малое, чтобы быть обнаруженным любыми известными человеку средствами.

Все же можно было бы предположить, что, если достаточное количество бильярдных шаров, двигающихся в одном и том же направлении, будут ударять в достаточное количество бильярдных столов в течение достаточно долгого времени, движение Земли могло бы быть ощутимо изменено. Как бы не так! Каждый уда-

¹ Пожалуйста, не забывайте, что выражение «кажется невероятным» не означает «невозможно».

ряющийся бильярдный шар должен ударить противоположный край стола, или вашу руку, или какое-то другое препятствие. Но если даже он просто медленно остановится благодаря трению (которое можно рассматривать как серию микроударов шара о ткань стола), это ничего не изменит. Независимо от того, каким образом двигается бильярдный шар, он распределит изменения в своем количестве движения одинаково в обоих направлениях, прежде чем остановится, если только непосредственно вовлечены шар и Земля.

В наиболее общем случае распределение количества движения между Землей и всеми подвижными объектами на ее поверхности или около может время от времени изменяться, но полное количество движения и поэтому общая скорость Земли плюс всех этих подвижных объектов (предполагая, что общая масса остается неизменной) должны оставаться теми же самыми. Никакая величина или вид взаимодействия среди компонентов системы не могут изменить полное количество движения этой системы.

А теперь решение проблемы падающего тела, которой я открыл данную главу. В то время как тело падает, оно получает некоторое количество движения (mv), это количество движения нарастает по мере увеличения скорости. Система, однако, состоит не только из одного падающего тела. Сила тяготения, которая вызывает движение, относится и к телу, и к Земле. Следовательно, Земля должна получить количество движения, равное ($-mv$), двигаясь навстречу телу. Из-за огромной массы Земли это ее встречное ускорение исчезающе мало и при любых практических вычислениях может игнорироваться. Однако принцип остается. Когда тело падает, движение не создается из ничего. Скорее возникает и движение тела, и антивдвижение Земли, и эти два движения взаимоисключаются. Полное количество движения Земли и падающего тела относительно друг друга является нулевым до того, как тело начинает падать, нулевым — после того, как оно заканчивает падение, и нулевым — в любой произвольно взятый момент времени в течение его падения.

Вращательное движение

До сих пор я рассматривал движение, как если бы оно вовлекало перемещение объекта через пространство в едином целом с различными частями объекта, поддерживающими их взаимную неизменяемую ориентацию. Такое движение называется «поступательным» (*translational*) — от латинских слов, означающих «переносить».

Однако возможно и перемещение тела, при котором оно не будет двигаться через пространство как единое целое, но при этом — все же будет перемещаться. Например, центр колеса может быть закреплён на одном месте, чтобы колесо в целом не изменяло своего положения; однако само колесо может вращаться относительно этого центра. Подобным же образом сфера, установленная в пределах некоторого объёма пространства, может вращаться вокруг некоторой установленной линии, оси. Этот вид движения называется «вращательным» (*rotational*) — от латинского слова, означающего «колесо». (Конечно, тело может двигаться и в комбинации из этих двух типов движения, как это делает бейсбольный мяч, который крутится, одновременно перемещаясь вперед, или как Земля, которая вращается вокруг своей оси, одновременно перемещаясь вперед по своей орбите вокруг Солнца.)

Вращательное движение весьма аналогично поступательному, но рассмотрение его требует изменения точки зрения. Например, мы привыкли думать о скорости поступательного движения в терминах «миля в час» или «сантиметры в секунду», во вращательном движении единицы измерения другие. Кроме того, мы принимаем как очевидное, что если одна часть тела имеет некоторую скорость поступательного движения, то и все остальные части тела имеют такую же скорость. Другими словами — весь самолет перемещается вперед со скоростью своего носа.

В случае вращательного движения эти вопросы различны. Точка на ободе вращающегося колеса перемещается уже с некоторой скоростью, точка, находящаяся ближе к центру колеса, перемещается с меньшей скоростью, а точка, находящаяся еще ближе к центру, перемещается с еще меньшей скоростью. Точка, находящаяся в центре вращающегося колеса, неподвижна. Поэтому сказать, что колесо вращается со скоростью столько-то сантиметров в секунду, является бессмысленным, если мы не указываем точную часть колеса, к которой относится данное высказывание, а это может быть достаточно неудобно.

Было бы более удобно, если бы мы могли найти некоторый метод измерения скорости вращения, который был бы применим сразу ко всему телу вращения. Одним из таких методов может быть рассмотрение числа оборотов тела за единицу времени. Хотя различные точки на колесе могут двигаться с различной скоростью, каждая точка на колесе заканчивает вращение в один и тот же момент времени, так как колесо вращается «как единое целое». Поэтому мы можем говорить о колесе (или любом другом объекте вращения), что оно «имеет скорость в

столько-то вращений в минуту» (обычно это выражение сокращают как «об/мин», или «rpm» — от английского «*revolutions per minute*»).

Или мы могли бы разделить одно обращение колеса на 360 равных частей, называемых «градусами» (сокращенно градус обозначается значком °. В этом случае 1 оборот в минуту был бы равен 360 град./мин, или 6 град./с (градусов в секунду). В то время как колесо поворачивается на какой-то градус линия, соединяющая центр колеса с точкой на его ободу, образует угол. Поэтому о скорости, данной в оборотах в минуту или в градусах в секунду, обычно говорят как об «угловой скорости».

Вращательное движение способно совершаться любым из двух зеркально отраженных способов. Если смотреть из некоторого фиксированного положения, то колесо может выглядеть вращающимся «по часовой стрелке», то есть в том же направлении, в котором двигаются стрелки часов. Но с другой стороны, оно может двигаться «против часовой стрелки», то есть в сторону, противоположную движению стрелок часов¹. Поэтому об угловой скорости можно говорить, учитывая не только величину, но также и направление. (Что касается скоростей, включаемых в поступательное движение, то о них можно говорить как о «линейных скоростях», так как движение тут происходит скорее по линии, чем по углу.)

Физики используют другую единицу измерения вращательной скорости — радиан. Это угол, который охватывает на окружности дугу, равную по длине радиусу круга. Длина окружности равна π , умноженному на диаметр окружности², то есть 2π умножить на радиус круга. Поэтому длина окружности равна 2π , умноженным на длину дуги, обозначенной одним радианом. Один полный оборот включает в себя прохождение одной полной длины окружности, то есть один оборот равняется

¹ Важно отметить фразу «из некоторого фиксированного положения», потому что термины «по часовой стрелке» и «против часовой стрелки» не являются абсолютными. Колесо может казаться поворачивающимся по часовой стрелке, когда вы смотрите на него с одной стороны, но если вы переходите на противоположную сторону, то рассматриваемое колесо будет казаться вам поворачивающимся против часовой стрелки. То же самое истинно, если мы говорим о поступательном движении, что тело двигалось «влево» или «право» или «к» и «от». Все эти термины имеют значение только тогда, когда вы учитываете ваше собственное расположение. Однако если вы говорите относительно «севера», «юга», «востока» или «запада», то эти термины устанавливаются относительно Земли и не зависят от вашего собственного расположения.

² Греческая буква π используется, чтобы представить отношение длины окружности (c) круга к его диаметру (d); другими словами, $c/d = \pi$. И хотя каждый круг может иметь различные значения c и d , отношение этих двух величин — c/d — всегда одно и то же для всех кругов. Поэтому π — константа, ее приблизительное значение равно 3,14159.

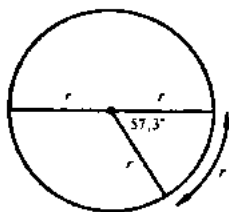
2π радианам, или 360° . Из этого следует, что один радиан равен $360^\circ/2\pi$, или, так как π равняется 3,14159, один радиан примерно равен $57,3^\circ$ (1 рад = $57,3^\circ$).

Угловая скорость часто обозначается греческой буквой ω («омега»), так как это — греческий эквивалент латинской буквы v , обычно используемой для обозначения линейной скорости.

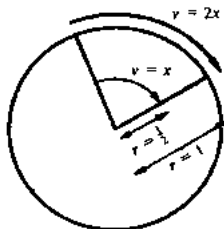
Для любой данной точки на вращающемся теле угловая скорость может быть приведена к линейной скорости. Линейная скорость зависит не только от угловой скорости, но также и от расстояния, на котором находится рассматриваемая точка от центра вращения (r). Если для той же самой угловой скорости удвоить расстояние от точки до центра вращения, то линейная скорость точки также удвоится. В таком случае можно сказать, что:

$$v = r\omega. \quad (\text{Уравнение 6.4})$$

Это уравнение абсолютно корректно, когда ω измеряется в радианах в единицу времени. Например, если угловая скорость — один радиан в секунду, то за одну секунду данная точка, расположенная на окружности колеса, проходит дугу, равную ее расстоянию от центра, и $v = r$. Если ω равняется 2 радианам в секунду, то $v = 2r$ и так далее.



Величина радиана



Угловая скорость

Если бы мы измеряли ω в оборотах в единицу времени, то уравнение 6.4 можно было бы прочитать как $(v = 2\pi r\omega)$, а если бы мы измеряли ее в градусах в единицу времени, то это же уравнение можно было бы прочитать как $v = r\omega/57,3$. Это — пример того, как единица измерения, которая на первый взгляд может показаться имеющей странную и неудобную размерность, оказывается все же полезной, потому что она позволяет выразить отношения между величинами с максимальной простотой.

Крутящий момент

Для того чтобы привести тело, находящееся в состоянии покоя, в поступательное движение, требуется приложить к нему силу. Но при некоторых условиях сила может вместо этого вызвать вращательное движение тела. Предположим, например, вы прибили гвоздем один конец доски к деревянному основанию. Если вы теперь толкнете доску, то она не будет двигаться в поступательной манере движения, так как один конец ее закреплен. Вместо этого доска начнет совершать вращательное движение вокруг зафиксированного конца.

Сила, которая вызывает такое вращательное движение, называется крутящим моментом («*torque*» — от латинского слова, означающего «вращать»). Если мы продолжим использовать греческие буквы для обозначения элементов вращательного движения, мы можем обозначить крутящий момент греческой буквой τ («*tau*» — «*tau*»), которая является эквивалентом латинской буквы «*t*» (от латинского «*torque*» — очевидно).

Данная сила не всегда вызывает тот же самый крутящий момент. В случае упомянутой доски величина крутящего момента зависит от расстояния между точкой, к которой приложена сила, и фиксированной точкой. Сила, приложенная непосредственно к фиксированной точке, не будет вызывать крутящий момент. По мере отступа от этой точки данная сила производит все более быстрое вращение и поэтому вызовет все больший и больший крутящий момент. Фактически крутящий момент равен силе (f), умноженной на расстояние (r):

$$\tau = fr. \quad (\text{Уравнение 6.5})$$

В прошлом о крутящем моменте говорили как о «моменте силы», но эта фраза теперь вышла из употребления. Крутящий момент может быть вызван не только в случае, когда какая-то часть тела зафиксирована в пространстве, но даже тогда, когда все тело способно свободно перемещаться.

Рассмотрим тело, обладающее массой, но состоящее из одной-единственной точки. Такое тело может подвергнуться только поступательному движению. Вращающееся тело, в конце концов, крутится относительно некоторой точки (или линии); если эта точка — все, что существует, и нет ничего еще, что могло бы вращаться, возможно только линейное движение. Зато к таким точечным массам наиболее просто применить законы движения.

Однако в реальной Вселенной не существует никаких точечных масс. Все реальные тела, обладающие массой, могут расши-

ряться. Однако можно показать, что в некоторых случаях такие реальные тела ведут себя так, как будто вся их масса сконцентрирована в какой-то одной точке. Точка, в которой эта кажущаяся концентрация может быть найдена, называется «центром масс» тела. Если тело симметрично по форме и однородно по плотности или имеет плотность, которая изменяется симметричным образом, центр массы совпадает с геометрическим центром тела. Например, Земля, по существу, сферическое тело, но в то же время оно неравномерно плотно, плотность Земли — наибольшая в центре, и эта плотность уменьшается одинаково во всех направлениях, по мере приближения к поверхности. Центр масс Земли поэтому совпадает с ее геометрическим центром, и именно к этому центру и направлена сила тяжести.

Концепция центра масс может объяснять несколько вещей, которые иначе могли быть достаточно озадачивающими. Согласно ньютоновскому первому закону движения, объект, находящийся в движении, продолжает перемещаться с постоянной скоростью, если на него не воздействовать некоторой внешней силой. Предположим, что снаряд, содержащий взрывчатое вещество, перемещается через пространство с постоянной скоростью и что в некоторой точке он взрывается. Фрагменты снаряда разлетаются во всех направлениях, и различные химические продукты взрыва также расширяются по различным направлениям вовне. Этот взрыв является внутренней силой, однако, будучи одним из фрагментов в пределах рассматриваемой системы, согласно первому закону он не должен оказывать никакого эффекта на движение системы. Все же различные фрагменты снаряда больше не перемещаются с первоначальной скоростью. Что же — сломались ньютоновские законы движения?

Нисколько. Законы описывают систему в целом и совсем не обязательно должны подходить к той или иной ее части, рассмотренной в изоляции от других. В результате взрыва система изменила свою форму. Но изменил ли взрыв центр масс системы? Центр масс мог бы рассматриваться как «средняя точка» тела. Если одна часть снаряда брошена наружу, то это сбалансировано другой частью, брошенной в противоположном направлении. Чтобы быть более точным, согласно закону сохранения импульса векторная сумма всех импульсов в одном направлении должна быть равна векторной сумме всех импульсов в противоположном направлении. Можно показать, что независимо от того, как изменилась форма тела под действием внутренних силы, центр масс остается там, где он и находился до того, как произошло изменение формы. Другими словами, центр масс системы перемещает-

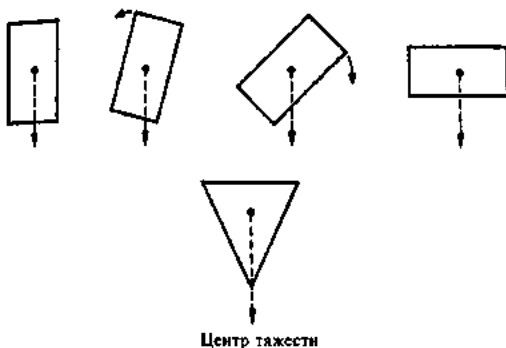
ся с постоянной скоростью независимо от взрыва, который расширял частицы системы туда и сюда.

Если бы тело под влиянием силы тяготения двигалось по параболической дуге, его внезапный взрыв не заставил бы центр масс прекратить плавное движение по этой параболической дуге, несмотря на то что отдельные фрагменты разлетелись бы во все стороны. (Сказанное подразумевает отсутствие вмешательства сил извне системы. Если фрагменты ударяются в другие тела и (при)останавливаются, движение центра масс изменяется. Олять же эффект, который оказывает сопротивление воздуха на множество частиц после взрыва, не может быть тем же, что оказывает действие на цельный снаряд перед взрывом; это тоже может изменять движение центра масс.)

Предположим теперь, что тело падает к земле. Каждую частицу тела тянет сила тяжести, но тело ведет себя так, как будто вся сила сконцентрирована в одной точке в пределах тела; такая точка называется «центром тяжести» тела. Если рассматриваемое тело находится в однородном поле тяготения, центр тяжести совпадает с центром масс тела. Однако более низкая часть тела находится несколько ближе к центру земли, чем верхняя, поэтому более низкая часть испытывает на себе большее гравитационное влияние. Следовательно, центр тяжести тела находится чуть-чуть ниже центра масс; при нормальных условиях эта разница настолько незначительная, что ей можно пренебречь, но не следует смешивать или подменять друг другом эти понятия.

Концепция центра тяжести весьма полезна при рассмотрении устойчивости тел. Представьте себе кирпич, опирающийся на свою узкую сторону. Если его слегка качнуть, а затем отпустить, он вернется назад, к своему первоначальному положению. Если качнуть его несколько больше и снова отпустить, он снова вернется назад. По мере увеличения наклона, однако, наступает такое положение, когда он падает на другую свою сторону. Что это за положение, при котором происходит этот «переворот»?

Мы можем рассматривать силу тяжести как силу, действующую на центр тяжести кирпича и только на эту точку. Пока центр тяжести расположен непосредственно по некоторой части первоначального основания, после удаления качающей силы эффект гравитационного напряжения перемещает кирпич назад на это основание. Если кирпич качнуть так сильно, что центр тяжести сместится на некоторую точку вне первоначального основания, кирпич упадет на то основание, на котором теперь расположена эта точка.



Естественно, чем более широким является основание по сравнению с высотой центра тяжести, тем на больший градус требуется качнуть кирпич, прежде чем центр его тяжести переместится, другими словами: чем шире основание, тем устойчивей тело. Кирпич, лежащий на своей самой широкой стороне, более устойчив, чем такой же, но стоящий на своей узкой стороне.

Конус, опирающийся на свой острый конец, может быть выставлен таким образом, что его центр тяжести будет непосредственно выше этой точки. Тогда он останется в состоянии равновесия. Однако самое небольшое движение или слабое дуновение воздуха способно переместить его центр тяжести за эту точку в одном или другом направлении, и конус упадет вниз. Жонглер переносит объекты, сбалансированные на точках, или, говоря более точно, на очень маленьких основаниях, перемещая собственное тело таким образом, чтобы подводить основание под центр тяжести каждый раз, когда центр тяжести пытается сместиться из этого положения.

Если тело неоднородно по плотности, то его центр тяжести не расположен в его геометрическом центре, а смещен к более плотным частям. Объект, который является особенно плотным в своей самой нижней части («с тяжелым основанием»), имеет необычно низкий центр тяжести. Даже большой градус наклона не будет выносить этот низкий центр тяжести за границу основания, и, когда мы отпустим его, объект возвратится в свое первоначальное положение. С другой стороны, объект, который является особенно плотным в своей верхней части («с тяжелой

вершиной»), имеет необычно высокий центр тяжести и упадет даже после небольшого качания. Так как обычно мы имеем дело с объектами примерно однородной плотности, мы удивляемся отказу объекта с тяжелым основанием падать (например, детская игрушка ванька-встанька, которая поднимается, даже если мы положим ее на бок), или легкости, с которой объект с тяжелой вершиной переворачивается.

Позвольте нам теперь вернуться к нашей точечной массе, которая подвержена только поступательному движению. Если мы представим себе силу, приложенную к реальному телу таким образом, чтобы пересечь его центр масс, то это реальное тело ведет себя так, как будто оно — точечная масса и подвергается чисто поступательному движению. Таким образом, у свободно падающего тела сила тяжести приложена непосредственно к центру тяжести (обычно совпадающему с центром масс), поэтому (без учета действия возможного крутящего момента, возникающего в момент, когда тело отпускают, а также ветра и сопротивления воздуха) тело будет падать чисто поступательно.

Если, однако, сила приложена к телу таким способом, что направлена по одной или другой стороне от центра масс, происходит возникновение крутящего момента. Такие тела, даже когда сила приводит их в поступательное движение, одновременно подвергаются и вращательному движению. Манера, в которой двигается футбольный мяч, бейсбольный мяч и любой другой подобный объект, известна всем. В природе настолько трудно сосредоточить силу на центре масс, что фактически невозможно предохранить тело от вращения.

Естественно, чем дальше точка приложения силы находится от центра масс, тем больше в движении тела доля вращательного движения по сравнению с поступательным. Мы можем легко заставить крутиться стоящую на ребре монетку, взяв ее за ребра пальцами, при этом скорость ее вращения — велика, а скорость перемещения — очень небольшая.

Есть теория, согласно которой звезды и планеты были порождены увеличением в результате соударений растущих ядер тел и маленьких фрагментов. В результате труда астрономов возникли схемы, из которых видно, что эти сталкивающиеся тела кажутся имеющими тенденцию более частого соударения со сторонами вне центра масс, что приводит к образованию крутящих моментов, сумма которых не равна нулю. Таким образом, образуется комбинированное движение небесных тел — они двигаются прямолинейно, одновременно вращаясь вокруг некоторой оси.

Сохранение углового количества движения

Наряду с известной нам поступательной инерцией имеется и вращательная инерция. Если колесо вращается на абсолютно гладкой оси, то оно будет продолжать вращаться с постоянной угловой скоростью до тех пор, пока к нему не будет приложен внешний крутящий момент.

В угловом движении приложение крутящего момента стимулирует ускорение. Это угловое ускорение обозначают буквой α (греческая буква «альфа», которая является эквивалентом латинской буквы «а»). Единицы измерения углового ускорения — радианы в секунду за секунду, или рад/с². Так же как линейная скорость равна угловой скорости, умноженной на расстояние от центра вращения (см. уравнение 6.4), так и, следуя той же самой логике рассуждения, линейное ускорение a равно угловому ускорению α , умноженному на расстояние от центра r , или:

$$a = r\alpha. \quad (\text{Уравнение 6.6})$$

В соответствии со вторым законом движения мы знаем, что сила равна массе, умноженной на линейное ускорение ($f = ma$). Подставив это выражение в уравнение 6.6, мы можем заменить (ra) на a и получаем:

$$f = mra. \quad (\text{Уравнение 6.7})$$

Мы уже решили, что крутящий момент (τ) равен силе, умноженной на расстояние от центра (fr). Это было выражено в уравнении 6.5. Подставляя значение для f , полученное в 6.7, мы имеем:

$$\tau = (mra) \times (r) = mr^2\alpha. \quad (\text{Уравнение 6.8})$$

Теперь, согласно законам движения в применении к прямолинейному движению, отношение силы к ускорению (f/a) равно массе (m) (см. уравнение 3.3). Что, если мы возьмем аналогичное отношение в угловом движении — то есть отношение крутящего момента к угловому ускорению (τ/α)? Перестраивая уравнение 6.8, мы можем получить значение для такого отношения:

$$\frac{\tau}{\alpha} = mr^2. \quad (\text{Уравнение 6.9})$$

Таким образом, во вращательном движении величина mr^2 (масса, умноженная на квадрат расстояния от центра вращения) аналогична массе (m) в поступательном движении. Это наводит на мысли об интересных различиях между этими двумя типами движения.

Рассмотрим тело, перемещающееся по прямой линии, которое при этом составлено из тысячи единиц равной массы. Сила, требуемая, чтобы остановить движение этого тела в данном периоде времени, зависит только от полной массы. Она не зависит от того, как эти единицы распределены: упакованы они плотно или нет, находятся в полой сфере или в объеме кубической формы, скомпонованы по прямой или как-нибудь еще. Имеет значение только полная масса, а манера, в которой распределены ее составляющие, — не изменяет значения полной массы.

Во вращательном движении, однако, влияние оказывает не просто масса, а масса, умноженная на квадрат расстояния от точки (или линии), относительно которой имеет место вращение. Рассмотрим, например, сферу вращения, составленную из тысячи единиц равной массы. Некоторые из этих единиц находятся ближе к оси, а некоторые — дальше от оси. Те, что находятся ближе к оси, имеют маленький r , а поэтому маленький mr^2 , в то время как те, что дальше от оси, имеют большой r , а поэтому — большой mr^2 . Тело в целом имеет некоторый средний mr^2 , который и называется моментом инерции, часто обозначаемый символом I . Крутящий момент, который требуется, чтобы остановить сферу вращения в данный момент времени, зависит не от массы сферы, а от ее момента инерции.

Значение момента инерции зависит от распределения массы и может быть изменено без изменения полной массы. Если вместо твердой сферы мы возьмем полую сферу, составленную из тех же самых единиц массы, но некоторые из единиц, ранее располагавшиеся близко к оси, теперь будут расположены далеко от оси. А с другой стороны, мы возьмем такую, где никакие единицы не были бы перемещены ближе к оси. Среднее число r увеличилось бы, и момент инерции (среднее число mr^2) также значительно увеличился, даже несмотря на то, что полная масса не изменилась. Для того чтобы остановить вращающуюся полую сферу в данный момент времени, потребовался бы намного больший крутящий момент, чем для того, чтобы остановить твердую сферу той же самой массы, вращающуюся с той же самой угловой скоростью.

Поэтому гироскопы и маховики, в которых требуется поддерживать стабильную угловую скорость, несмотря на крутящие моменты одного или другого типа, построены так, чтобы иметь обод настолько массивный, насколько это возможно, и внутреннюю часть — легкой, насколько это возможно. Тогда ускорения, произведенные данными крутящими моментами, сводятся к минимуму, потому что момент инерции был сведен к максимуму.

Неудивительно, что, рассматривая аналогии между вращательным и поступательным движением, мы видим экспериментальное подтверждение такой вещи, как закон сохранения момента импульса. По аналогии с законом сохранения импульса в поступательном движении этот дополнительный закон может быть выражен в следующем виде: «Полное угловое количество движения изолированной системы тел остается постоянным».

Но как бы мы определили угловое количество движения? Обычное поступательное количество движения равно mv : массе, умноженной на скорость. Для углового количества движения мы должны заменить массу на момент инерции I , а скорость поступательного движения — на угловую скорость ω . Тогда угловое количество движения получается равным $I\omega$.

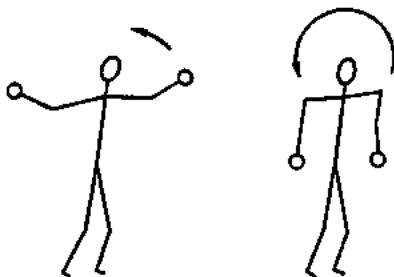
И снова момент инерции (средняя величина mr^2) может быть изменен без того, чтобы изменить полную массу, а это производит любопытные эффекты.

Предположим, например, что вы стоите на абсолютно гладком поворотном столе, который был приведен во вращение; вы держите ваши руки раздвинутыми на ширину плеч, в каждой руке у вас — тяжелый груз.

Ось вращения проходит через центр вашего тела от головы к пальцам ног, а масса ваших раскинутых рук находится дальше от этой оси, чем вся остальная часть тела. Грузы, которые вы держите в обеих руках, находятся еще дальше. Следовательно, ваши руки и грузы, которые они держат, оказывающие очень большое влияние на значение r , вносят большую составляющую в значение mr^2 и создают момент инерции, намного больше того, которым вы обычно обладаете.

Предположим затем, что при вращении вы опускаете руки. Масса ваших рук и грузов, которые они держат, теперь значительно ближе к оси вращения, и, несмотря на то что полная масса не изменилась, момент инерции очень уменьшился. Если момент инерции (I) уменьшился, то угловая скорость ω должна быть соответственно увеличена, чтобы угловое количество движения ($I\omega$) оставалось постоянным. (Другими словами, если вам нужно, чтобы произведение двух чисел всегда равнялось 24, а затем изменяете множитель с 8 на 4, то вы должны изменить второй множитель с 3 на 6, чтобы произведение продолжало равняться $24 : 24 = 8 \times 3; 24 = 6 \times 4; 24 = 4 \times 6; 24 = 3 \times 8; 24 = 2 \times 12...$)

Так и получается. Поворотный стол внезапно увеличивает скорость своего вращения, в то время как вы опускаете руки, и также скорость вращения резко уменьшается, когда вы снова поднимаете руки. Фигурист использует этот же принцип при выступлениях на льду: сначала он вращается достаточно быст-



Сохранение углового количества движения

ро с руками раздвинутыми в стороны, а затем руки опускает вниз или вытягивает вертикально вверх и осуществляет стремительное вращение на носке конька.

Тело, которое обладает только угловым количеством движения, не может передать неуравновешенное поступательное количество движения к другому телу, поскольку передавать ему нечего. Безусловно, вращающиеся колеса автомобиля дают поступательное количество движения. Но в этом случае, однако, равное по величине, но противоположное по знаку количество движения дает земля. Эти два поступательных импульса складываются, чтобы в результате дать нуль. Любой автомобилист, который когда-либо пробовал двигаться по льду, подтвердит этот факт. Как только трение уменьшилось до величины, когда оно очень малое или никакое количество движения не может быть передано земле, автомобиль получит малое или никакое количество движения, и колеса будут прокручиваться вхолостую.

Глава 7

РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Рычаг

Законы сохранения нравятся ученым. Во-первых, закон сохранения устанавливает пределы возможностей. При рассмотрении нового явления очень удобно исключить все объяснения, которые повлекли бы нарушение одного из законов сохранения

(по крайней мере, пока не придет к выводу, что ничего, за исключением такого нарушения, не может объяснить явление). С остановившимися возможностями тогда гораздо легче работать.

В дополнение ко всему имеется интуитивное чувство, что ничто не возникает из ничего. Поэтому кажется надлежащим и правильным предположить, что Вселенная обладает определенным ограниченным количеством тех или других свойств материи (типа количества движения) и что в то время, как это количество распределено различными способами среди различных тел Вселенной, общая сумма их не может быть ни увеличена, ни уменьшена.

Следовательно, если мы наблюдаем ситуацию, в которой кажется, что в некотором отношении что-то получено из ничего, сразу имеет смысл начать поиск некоторого фактора ситуации, который уменьшается, компенсируя это увеличение. Может оказаться, что это — два фактора, объединенные некоторым способом, которые образуют константу. В случае углового количества движения, например, момент инерции может изменяться по желанию и может, по-видимому, появляться из ниоткуда или исчезать в никуда.

Угловая скорость, однако, всегда сразу изменяется в противоположную сторону, а произведение момента инерции и угловой скорости является константой.

Другой случай такого плана — результат рассмотрения «рычага». Рычаг — это любой твердый объект, способный вращаться вокруг некоторой фиксированной точки, называемой «точкой опоры» рычага. В качестве практического примера можно рассмотреть деревянную доску, лежащую на «козлах»; доска является рычагом, «козлы» — точкой опоры.

Если точка опоры находится точно под центром тяжести рычага, то рычаг останется сбалансированным, то есть не наклонится ни в ту ни в другую сторону. Поскольку рычаг, как и любой другой объект, ведет себя так, как будто весь его вес сконцентрирован в центре тяжести, он может тогда удержаться целиком на узком крае точки опоры. Если рычаг обладает однородными геометрическими характеристиками и плотностью, центр тяжести его находится в геометрическом центре, и именно туда следует поместить точку опоры, как в известной детской игре — в качелях.

Если к любой точке на рычаге приложить направленную вниз силу, то эта сила, умноженная на расстояние до точки опоры, даст нам крутящий момент и рычаг начнет вращательное движение в направлении крутящего момента.

Предположим, однако, что к рычагу в то же самое время, но с другой стороны точки опоры прикладывают другую направ-

ленную вниз силу. Если вторая сила равна первой и приложена на таком же расстоянии от точки опоры, то полученные два крутящих момента равны по величине, но не по направлению. Крутящий момент на одной стороне точки опоры имеет тенденцию вызывать вращение по часовой стрелке, а тот, что с другой стороны, имеет тенденцию вызывать вращение против часовой стрелки. Если обозначить один крутящий момент как τ , то другой должен быть равен $-\tau$. Эти два крутящих момента складываются, сумма их равна нулю, и рычаг не движется. Он остается в положении равновесия.

(С другой стороны, если сила приложена вниз на одной стороне точки опоры и вверх на другой, то оба производят движение в том же самом направлении: оба по часовой стрелке или оба против часовой стрелки. Крутящие моменты в этом случае будут одного и того же знака, и сумма их будет составлять 2τ или -2τ . Такой удвоенный крутящий момент называется «парой», и, естественно, пара моментов может более легко переместить рычаг относительно точки опоры. Такую пару мы используем, когда заводим будильник или открываем штопором бутылку.)

Крутящие моменты, используемые при применении рычага, часто образуются под действием грузов, опирающихся на концы балансировочного рычага; они также могут находиться на чашках, установленных на этих концах. Можно сказать, что два равных груза приведут рычаг в положение равновесия, если они помещены на противоположные стороны точки опоры и на равных расстояниях от нее.

Это фактически и является принципом «балансирных весов». Такие весы имеют две чашки равного веса, установленные на концах горизонтального прутка («коромысла», поэтому такие весы также называют «весами с коромыслом». — *Пер.*), который вращается относительно центральной точки опоры. Если мы поместим объект неизвестного веса в одну чашку, а в другую чашку — набор известных весов (тарированные гири) и приведем весы в положение равновесия, то неизвестный вес будет равен сумме известных весов в другой чашке. По этому же принципу мы измеряем массу, а не только вес.

Рычаг, подвергнутый воздействию равных и противоположных по знаку крутящих моментов, считается находящимся «в положении равновесия» (*«equilibrium»* — от латинских слов, означающих «равные веса»). Это выражение применяют к любой системе, находящейся под воздействием сил, которые производят взаимоисключающие эффекты и оставляют общее состояние системы неизменным.

Для того чтобы рычаг находился в положении равновесия, он должен быть подвергнут воздействию равных и противоположных по знаку крутящих моментов, и это справедливо даже в том случае, если приложенные силы неравны. Рассмотрим направленную вниз силу (f), приложенную к точке на одной стороне рычага на некотором расстоянии (r) от точки опоры. Крутящий момент, создаваемый этой силой, равен fr . Затем рассмотрим другую направленную вниз силу, величиной вдвое больше, чем первая ($2f$), приложенную к точке на другой стороне от точки опоры, но на расстоянии, равном только половине первого ($-r/2$). (Мы ставим отрицательный знак перед величиной расстояния потому, что это расстояние находится на противоположном от точки опоры направлении относительно первого.) Этот второй крутящий момент равен $(2f) \times (-r/2)$ или $(-fr)$. То есть мы имеем два крутящих момента, которые равны и противоположны, и рычаг остается в положении равновесия.

Легко видеть, что если силы произведены неравными весами, опирающимися на концы рычага, то центр тяжести системы должен сместиться к концу с большим весом. Чтобы поддерживать равновесие, точка опоры должна находиться непосредственно под новым положением центра тяжести. Как только это будет сделано, мы сразу сможем обнаружить, что его положение центра тяжести стало таким, что произведение одного веса на его расстояние от точки опоры стало равно произведению другого веса на его расстояние от точки опоры.

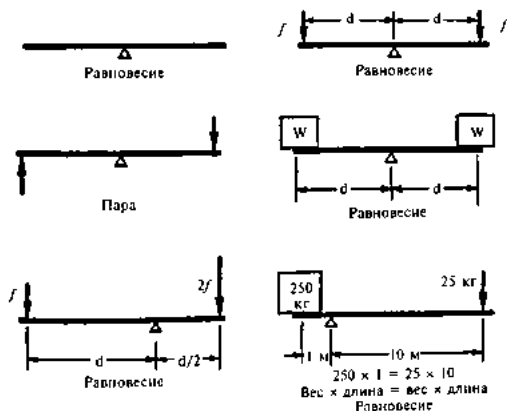
Таким образом, если два ребенка примерно равного веса находятся на качелях, правильным для них будет сесть на концы качелей. Если один ребенок заметно более тяжелый, чем другой, он должен сидеть ближе к точке опоры. Эти двое детей должны расположиться таким образом, чтобы их собственный центр тяжести плюс таковой качелей находился непосредственно над точкой опоры. (В устройстве некоторых качелей предусмотрена возможность перемещения, то есть имеется регулировка длины коромысла для «подстройки» его положения по отношению к точке опоры.)

Тот факт, что для равновесия системы требуется равенство крутящих моментов, а не сил, определил широкое использование рычага. Предположим, что мы поместили вес в 250 килограммов (эквивалент силы приблизительно в 2450 ньютонов) на расстояние, равное 1 метру от точки опоры. Затем предположим, что на расстоянии 10 метров от точки опоры, с другой стороны рычага, человек прикладывает направленную вниз силу, равную 245 ньютонам (эквивалент веса в 25 килограммов). Крутящий момент, который создает эта сила (25×10), равен и

противоположен крутящему моменту, созданному весом с другой стороны рычага (250×1). Рычаг находится в положении равновесия, и большой вес поддерживается малой силой. Если человек применит несколько большую силу (которая является все еще значительно меньшей, чем та, что создана весом с другой стороны), рычаг перевесит на его сторону.

Человек не столь чувствителен к крутящему моменту, как к силе (точнее, к мускульному усилию). Он знает, что не может создать достаточную силу, чтобы непосредственно поднять вес в 250 килограммов. Используя рычаг, однако, он может делать работу с силой, равной одной десятой той, которая потребовалась бы для прямого подъема. Регулируя длину рычага, он смог бы обойтись силой в одну сотую, в одну тысячную или в любую другую часть силы, действительно требуемой для прямого подъема. Полезность рычага как способа умножения сил человека для подъема грузов заложена в самом слове «рычаг» (*lever*), которое происходит от латинского слова, означающего «поднимать».

Без сомнения, еще первобытный человек наткнулся на этот «принцип рычага», но только во времена греческого математика Архимеда (ок. 287—212 до н. э.) ситуация впервые была про-



Рычаги

анализирована с научной точки зрения. Высокая оценка принципов использования рычага отразилась в его знаменитой, хотя и немного пафосной фразе: «Дайте мне точку опоры, и я переверну весь мир».

Любое устройство, которое передает силу от точки приложения к другой точке, где она используется, называется «механизмом» (*machine* — от латинского слова, означающего «изобретение» или «устройство»). Рычаг делает то, что сила, приложенная на одной стороне к точке опоры, может поднять вес с другой стороны; он делает это столь несложным способом, что далее упростить его уже невозможно. Поэтому рычаг является примером простого механизма. Другие примеры простых механизмов — наклонная плоскость, колесо и ось. Некоторые добавляют к этому списку еще три других простых механизма: шкив, клин и винт. Однако шкив может рассматриваться как своего рода рычаг, клин состоит из двух наклонных плоскостей, связанных основаниями, а винт представляет собой наклонную плоскость, «обвитую» вокруг оси.

Фактически все более сложные механизмы, изобретенные и используемые человечеством вплоть до недавнего времени, являются просто комбинациями двух или более простых механизмов. Эти механизмы зависят от движений и сил, вызванных действием в прямом контакте двигающихся тел. В результате та ветвь физики, которая имеет дело с такими движениями и силами, называется «механикой».

Та ветвь механики, которая имеет дело непосредственно с движением, называется «динамикой» (*dynamics*), в то время как та ветвь, что имеет дело с движениями, связанными с положением равновесия, называется «статикой» (*statics* — от греческого слова, означающего «остановить»). Архимед был первым великим ученым в области статике благодаря работам по изучению рычага. Галилео Галилей был первым великим ученым в области динамики.

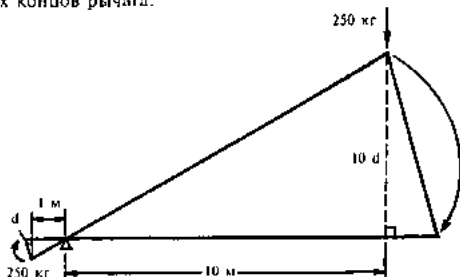
Единственная сила, которая, кажется, не является результатом прямого воздействия одного тела на другое, — сила тяготения. Тяготение, по-видимому, воздействует силой на расстоянии и вызывает движение без вступления в прямой контакт с телами. Такое «действие на расстоянии» интересовало как Ньютона, так и многих физиков после него. Были разработаны различные варианты оправдания ее, и сила тяжести заняла свое почетное место в ряду механических сил. Таким образом, изучение движений небесных тел, которые происходят и управляются силами тяготения, называется «астрономической механикой».

Умножение силы

Механизм не только передает силу, часто он может использоваться, чтобы умножить эту силу, как мы видим на примере описанного выше рычага. И все же к этому умножению силы нужно относиться с подозрением. Как один ньютон силы может делать работу десяти ньютонов только посредством передачи ее через твердый брусок? Как я указал в начале этой главы, рассчитывать на такое великодушие со стороны Вселенной слишком трудно. Что-то еще должно быть потеряно, чтобы восполнить его.

Если мы рассмотрим рычаг, поднимающий вес в 250 килограммов при помощи эквивалента силы, равного только 25 килограммам веса, то, как видно из диаграммы, мы имеем два подобных треугольника. Стороны и высота одного пропорциональны соответствующим сторонам и высоте другого, поскольку расстояние от точки опоры и высоте другого, поскольку расстояние от точки приложения веса до точки опоры пропорционально расстоянию от точки приложения силы до точки опоры.

Другими словами, если мы прикладываем силу в точке, в десять раз так же отдаленной от точки опоры, как вес, а затем поднимаем вес на данное расстояние, мы должны опустить рычаг вниз на расстояние в десять раз большее. Вот он — ответ! При подъеме веса посредством рычага мы можем регулировать расстояния от точки опоры таким образом, чтобы использовать только часть силы, которая потребовалась бы, если бы мы поднимали груз без рычага, но тогда мы должны применить эту часть силы на соответственно большем расстоянии. Произведение силы на расстояние остается тем же самым с обоих концов рычага.



Сила и расстояние

Это оказывается истинным для любого механизма, который, как нам кажется, умножает силу. Меньшая сила исполняет задачу, которая без механизма потребовала бы большей силы, но всегда за счет необходимости приложения этой силы на соответствующем большем расстоянии. Произведение силы на перемещение, на котором действует сила, называется «работой» и обычно обозначается w . Таким образом:

$$w = fd. \quad (\text{Уравнение 7.1})$$

В некотором смысле работа — достаточно неудачный термин, чтобы использовать его в данной связи. Любая согласится, что подъем веса на какое-то расстояние — работа, но в повседневном использовании смысл данного термина не ограничен одним этим значением. В повседневной речи работа — термин, который применяется к любой форме производства. Если я спокойно сижу в своем кресле и в течение получаса думаю о том, что же дальше напечатать в этой книге, то такое действие может показаться мне тяжелой работой, но данный процесс не включает в себя какого-либо действия на каком-либо расстоянии, а значит, с точки зрения физика, не является работой. Опять же стоять на одном месте и держать в руке тяжелый чемодан — кажется тяжелой работой, но так как чемодан не движется, то при этом не совершается никакой работы. Если идете и несете чемодан, то опять же при этом не производится никакой работы, поскольку хотя чемодан и перемещается (горизонтально), но перемещается не в направлении действия силы (вертикально), которая предохраняет его от падения.

Тем не менее термин «работа», означающий силу, умноженную на расстояние, на которое тело перемещается под ее действием, установлен повсеместно и не подлежит переделке.

Единицы измерения работы — это единицы измерения силы, умноженные на единицы измерения расстояния. В системе МКС единицей измерения работы является произведение ньютона на метр; это произведение было названо «джоулем» в честь английского физика, о котором я буду иметь случай упомянуть позже. В системе СГС единица работы получается равной дине, умноженной на сантиметр; эта единица называется «эрг» (от греческого слова, означающего «работа»). Так как ньютон равен 100 000 дин, а метр равен 100 сантиметрам, то ньютон-метр равен 100 000 раз по 100 дин-сантиметров. Другими словами, один джоуль равен 10 000 000 эргов.

Так как сила — векторная величина, может показаться, что работа, которая является произведением силы на расстояние, так-

же должна быть вектором: это означало бы, что можно говорить о данном количестве работы, сделанной при движении направо, и том же количестве работы, сделанной при движении налево, как о равных и противоположных по знаку. Однако это не так. Для того чтобы понять — почему, рассмотрим единицы измерения работы еще раз.

Ньютон определяется как килограммометр в секунду за секунду, или $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$. Если джоуль равен ньютон-метру, то тогда он равен килограмм-метр-метру в секунду за секунду, или $\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$. Это последнее выражение может быть записано как $\text{кг}\cdot(\text{м}/\text{с})^2$. Но $\text{м}/\text{с}$ (метры в секунду) — единица скорости, а это означает, что единица работы равна единице массы, умноженной на квадрат единицы скорости, или $w = mv^2$.

Истинно, что скорость является векторной величиной, поэтому можно было бы говорить о $-v$ и $+v$, но единица работы включает в себя квадрат скорости. Как мы знаем из элементарной алгебры, квадрат положительного числа $(+v) \times (+v)$ и квадрат отрицательного числа $(-v) \times (-v)$ положительны $(+v^2)$.

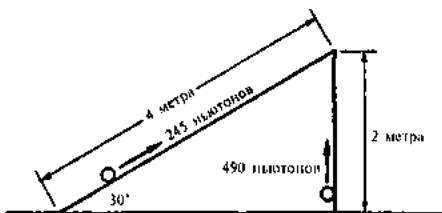
Следовательно, квадрат скорости не показывает никаких различий в знаках, и единица, которая включает в себя квадрат скорости, — не векторная, а скалярная величина (если, конечно, она не содержит других (иных, чем скорость) векторных единиц измерения).

Таким образом, мы пришли к выводу, что работа — скалярная величина.

Возвращаясь к рычагу, мы видим, что работа, потраченная на подъем валуна рычагом, та же самая, что потребовалась бы на подъем валуна без рычага. В данном случае отличается лишь распределение работы между силой и расстоянием. То же самое истинно и в том случае, когда в качестве механизма мы используем наклонную плоскость.

Допустим, что нам необходимо поднять 50-килограммовую бочку на высоту два метра на задний борт грузовика. Так как килограмм веса прикладывает направленную вниз силу, равную 9,8 ньютона, то, чтобы поднять бочку, требуется сила общей величиной 490 ньютонов. Приложив силу, равную 490 ньютонов, на расстояние в два метра в направлении силы, мы выполним 980 джоулей работы.

Предположим вместо этого, что мы кладем доску от основания (земли) на грузовик таким образом, чтобы доска составляла угол в 30° с землей. При таких условиях длина доски от основания до грузовика только в два раза больше вертикального расстояния от земли до грузовика, или четыре метра. Сила, которая требуется, чтобы катить бочку по доске, равна 245 ньютонам, то есть



Наклонная плоскость

только половине силы, требуемой для прямого подъема. Эта половина силы прикладывается на расстоянии в два раза большем, но работа продолжает равняться 980 джоулям.

Чем меньше угол наклона наклонной плоскости, тем меньше сила, которая потребует, чтобы переместить бочку, и тем длиннее расстояние, на которое она должна быть перемещена. Наклонная плоскость уменьшает силу так же, как она уменьшала скорость в опыте с силой тяжести, который выполнил Галилео. Ни наклонная плоскость, ни рычаг, ни любой другой механизм не уменьшает работу. Если мы рассматриваем работу, то мы никогда не получаем что-то из ничего.

Но если мы не получаем никаких преимуществ при выполнении работы, то зачем беспокоиться? Ответ состоит в том, что, даже если мы не получаем ничего непосредственно, мы можем извлечь пользу, изменяя распределение между силой и расстоянием. Если рассматриваемый случай — подъем груза, когда мы должны поднять вверх на два метра 250 килограммов, то без дополнительной помощи мы не сможем его поднять и вынуждены будем отказаться. Мы не сможем поднять его на метр, сантиметр или вообще на какую-либо высоту; мы не сможем сдвинуть его. Однако переместить груз, эквивалентный 50 килограммам, на расстояние в десять метров — вполне выполнимая задача, особенно если нам некуда спешить; таким образом, мы можем сделать ту же самую работу (50×10), которая была признана невозможной при предыдущих условиях (250×2). Поднять эквивалент пяти килограммов по наклонной плоскости длиной 100 метров — может быть, утомительно, но вполне возможно.

Опять же если бы нас попросили подтянуться вверх по веревке, спущенной с крыши пятиэтажного здания, то мы могли бы сразу решить, что это — вне пределов наших способностей,

разве что мы находимся в превосходной физической форме. Однако совершенно обычный человек может поднять свой вес на крышу пятиэтажного дома, если он идет по скату, который является наклонной плоскостью, позволяющему ему использовать меньшее количество силы, чтобы поднять свое тело за счет перемещения его на более длинное расстояние.

Иногда удобно сделать прогнivolоложное: израсходовать дополнительную силу, чтобы получить выигрыш в расстоянии. Именно таким образом мы прикладываем много силы к педали велосипеда. Это усилие передается к точке на заднем колесе, около его центра. Далее спицы колеса действуют как рычаги (с точкой опоры на оси колеса), так что на обод колеса передается небольшая сила, благодаря которой велосипед перемещается на большое расстояние.

Велосипед поэтому — механизм, который позволяет телу преобразовывать силу в расстояние (без изменения полного количества выполненной работы) более эффективно, чем это могло быть сделано без велосипеда. По этой причине человек на велосипеде может легко обогнать бегущего человека, хотя оба используют мускулы своих ног с равным усилием.

Определение работы как произведения силы на расстояние, на которое она действует, не говорит ничего относительно времени, которое требуется для того, чтобы выполнить данное действие. Люди обычно предпочитают выполнять какое-то количество работы за более короткое время, чем за длительное, и поэтому заинтересованы знать норму, по которой выполняется данная работа. Такая норма называется «мощностью». Единицы измерения мощности — Дж/с в системе МКС и эрг/с в системе СГС.

Очень распространенная единица мощности, которая не входит ни в какую систему, была разработана шотландским инженером Джеймсом Ваттом (1736—1819) в конце XVIII века, он улучшил паровой двигатель и сделал его пригодным для практического применения; он стремился узнать, насколько норма работы в водяной помпе его двигателя при откачке воды из угольных шахт отличается от нормы работы лошадей, которых до этого использовали в качестве силового привода на подобной работе. Чтобы определить «лошадиную силу», Ватт проверил, сколько веса, на какое расстояние и за какое время могут поднять лошади. Он пришел к заключению, что сильная лошадь могла поднять 150 фунтов веса на высоту 220 футов за одну минуту, так что одна лошадиная сила была равна $150 \times 200/1$, или 33 000 фунтов-футов в минуту.

Эта неудобная единица равна 745,2 Дж/с, или 7 452 000 эрг/с. Величине джоуль/секунда было в честь Джеймса Ватта присвое-

но название «ватт», так что мы можем также говорить, что одна лошадиная сила равна 745,2 ватта. Ватт, однако, наиболее часто используется при электрических измерениях. В механической инженерии (по крайней мере, в Великобритании и Соединенных Штатах) пока еще главенствует лошадиная сила. Например, мощность наших автомобильных двигателей обычно дается в лошадиных силах¹.

Механическая энергия

Приятно видеть, что работа, которую мы прикладываем к одному концу рычага, равна работе, выходящей из другого его конца, и мы могли бы справедливо предположить существование «закона сохранения работы».

К сожалению, такой возможный закон сохранения почти сразу натывается на препятствие. В конце концов, где работа пребывала до того, как быть приложенной к рычагу? Если один конец рычага управлялся человеком, который использовал рычаг, чтобы поднять груз, работа произошла от перемещения, вызванного движением человеческой руки.

А откуда взялась работа перемещающей рычаг руки? Сидящий спокойно человек может внезапно переместить свою руку и сделать работу там, где никакой работы до этого, казалось, не существовало. Это входит в противоречие с понятием сохранения, в соответствии с которым сохраняемое явление не может быть ни создано, ни разрушено.

Поэтому, если вы стремитесь к тому, чтобы основать закон сохранения работы, вы должны предположить, что работа, или какой-то эквивалент работы, могла бы быть сохранена в человеческом теле (и в других возможных объектах) и что по мере необходимости могут происходить обращения к этому «складу» и вызванная работа была бы сконвертирована в видимую, осязательную форму.

На первый взгляд такой «склад» работы кажется связанным с живыми формами, так как живые существа кажутся заполненными этой способностью — делать работу, в то время как неодушевленные предметы главным образом лежат в состоянии покоя и не работают. Немецкий философ и ученый Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646—1716), который был первым, кто получил ясное

¹ В 2003 году, когда большинство стран мира перешли на единую систему единиц измерения, мощность двигателей автомобилей дается в киловаттах; мощность в лошадиных силах используется только как справочная величина. (Примеч. пер.)

понятие работы в физическом смысле, хотел назвать этот «склад работы» — *viz viva* (от латинского выражения, означающего «живая сила»).

Однако совершенно ошибочно предположить, что работа может быть «заложена» только в живых существах; так, ветер может нести суда, а вода поворачивает колесо жернова, и в обоих случаях сила прикладывается на расстоянии. Отсюда возникло предположение, что «склад» работы может быть также и в неодушевленных предметах. В 1807 году английский врач Томас Юнг (1773—1829) предложил для этого «склада» работы термин «энергия». Этот термин происходит от греческих слов, означающих «вместилище работы», и является вполне нейтральным термином, который может применяться к любому объекту независимо от того, живой он или неодушевленный.

Термин «энергия» постепенно приобрел популярность и теперь применяется к любому явлению, способному к преобразованию в работу. Человечеству известно огромное множество таких явлений, а следовательно, множество форм энергии.

Первой формой энергии является непосредственно само движение. Работа включает в себя движение (так как объект должен быть перемещен на какое-то расстояние), так что неудивительно, что движение способно делать работу. Двигающийся воздух, то есть ветер, приводит в движение судно, а не «стоячий» воздух; поток воды поворачивает жернов, а не неподвижная вода. Значит, не воздух или вода содержат энергию, а движение воздуха или воды. Фактически все, что перемещается, содержит энергию, поскольку если перемещающийся объект независимо от того, что он собой представляет, столкнется с другим объектом, то он сможет передать свое количество движения этому второму объекту и привести его массу в движение — таким образом выполняется работа, поскольку масса будет перемещаться на некое расстояние под воздействием силы.

Энергия, связанная с движением, называется «кинетической энергией», этот термин предложил английский физик лорд Уильям Кельвин (1824—1907) в 1856 году. Слово «кинетический» происходит от греческого слова, означающего «движение».

Так сколько же точно содержится кинетической энергии в теле, перемещающемся с некоторой скоростью, равной v ? Чтобы определить это, давайте предположим, что в конце концов мы собираемся обнаружить существование закона сохранения для работы во всех ее формах. В этом случае было бы разумным утверждать, что, если мы выясним, сколько работы требуется, чтобы переместить тело с некоторой скоростью, равной v , тогда это автоматически будет означать количество работы,

которую можно выполнить по отношению к некоторому другому объекту благодаря его движению с этой скоростью. Коротче говоря, это будет его кинетическая энергия.

Чтобы заставить тело двигаться, во-первых, требуется приложить силу, а эта сила, в соответствии со вторым законом Ньютона, равна массе перемещаемого тела, умноженной на его ускорение: $f = ma$. Тело будет перемещаться на некоторое расстояние, равное d , прежде чем ускорение разгонит его до скорости v , с которой мы и начали разгон. Работа, примененная к телу, которая требуется, чтобы заставить его двигаться с этой скоростью, равна произведению силы на расстояние.

Если мы выразим силу как ma , то мы получим:

$$w = mad. \quad (\text{Уравнение 7.2})$$

Значительно раньше, в этой книге, когда мы обсуждали эксперименты Галилео с падающими телами, мы показали, что $v = at$, то есть скорость, другими словами, является произведением ускорения на время. Это выражение можно легко преобразовать в $t = v/a$. Также при обсуждении экспериментов Галилео мы заметили, что там, где имеется однородное ускорение,

$$d = \frac{1}{2} at^2,$$

где d — расстояние, покрытое перемещающимся телом. Если вместо t в указанном выше отношении мы подставим v/a , то получим:

$$d = \frac{1}{2} a \left(\frac{v}{a} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{v^2}{a}. \quad (\text{Уравнение 7.3})$$

Давайте теперь подставим это значение для d в уравнение 7.2, которое тогда примет форму:

$$w = \frac{1}{2} \frac{mav^2}{a} = \frac{1}{2} mv^2. \quad (\text{Уравнение 7.4})$$

Это — работа, которую следует приложить к телу массой m , чтобы заставить его двигаться со скоростью v . И поэтому это — кинетическая энергия, которую содержит тело такой массы, движущееся с такой скоростью. Если мы обозначим кинетическую энергию как e_k , то можем написать:

$$e_k = \frac{1}{2} mv^2. \quad (\text{Уравнение 7.5})$$

Как я уже сказал ранее, единицы измерения работы включают в себя единицы измерения массы, умноженные на квад-

рат единиц измерения скорости, и, как видно из уравнения 7.5, кинетическая энергия — тоже. Поэтому кинетическая энергия, как и работа, может быть измерена в джоулях или эргах. И действительно, все формы существования энергии могут быть измерены в этих единицах.

Теперь представим себе, что мы можем обосновать закон сохранения, в котором кинетическая энергия может быть преобразована в работу и наоборот, но в котором сумма кинетической энергии и работы в любой изолированной системе должна остаться постоянной. Но такой закон сохранения не выдержит, как будет показано ниже, никакой критики.

Объект, брошенный в воздух, по мере того как он покидает руку (или катапульту, или некое орудие), приобретает некоторую скорость и поэтому некоторую кинетическую энергию. Поскольку он поднимается вверх, его скорость уменьшается, из-за ускорения, наложенного на него полем тяготения Земли. Значит, и его кинетическая энергия постоянно уменьшается, и в конечном счете, когда объект достигает максимальной высоты и останавливается, его кинетическая энергия полностью исчезает — становится равной нулю. Можно бы было предположить, что кинетическая энергия исчезла из-за того, что в атмосфере была произведена работа и что поэтому кинетическая энергия была переведена в работу. Однако это — неадекватное объяснение события, поскольку то же самое происходило бы и в вакууме. Далее: можно было бы предположить, что кинетическая энергия исчезла полностью и без следа, то есть без появления работы, и что поэтому нет возможности применить какой-либо закон сохранения, включающий в себя работу и энергию. Однако после того как объект достиг максимальной высоты и скорость его движения стала равна нулю, он снова начинает падать, теперь уже вниз, все еще находясь под действием силы тяготения. Он падает все быстрее и быстрее, приобретая все большую кинетическую энергию, и в тот момент, когда он ударяется о землю (сопротивлением воздуха мы пренебрегаем), он обладает всей той кинетической энергией, с которой начал свое движение.

Чтобы не потерять свой шанс обосновать закон сохранения, мне кажется разумным предположить, что энергия, наверное, не исчезала при движении объекта вверх, а просто запасалась в некоторой другой форме, чем кинетическая энергия. Для того чтобы поднять объект на некоторую высоту, преодолевая силу тяжести, требуется выполнить некоторую работу, даже несмотря на то, что, когда объект достиг этой высоты, он остановился. Эта работа должна быть запасена в виде энергии, которую

объект содержит в себе и которая основывается на его положении по отношению к полю тяготения земли.

Таким образом, можно сказать, что по мере подъема объекта кинетическая энергия постепенно преобразовывалась в «энергию положения». На максимальной высоте вся кинетическая энергия стала такой «энергией положения». По мере падения объекта назад, вниз «энергия положения» еще раз преобразовалась — обратно в кинетическую энергию. Так как «энергия положения» имеет потенциальность кинетической энергии, то шотландский инженер Уильям Дж.М. Ранкин (1820—1872) в 1853 году предложил назвать такую энергию «потенциальной», и это предложение было принято.

Чтобы поднять тело на некоторое расстояние (d) вверх, требуется приложить силу, равную его весу, на требуемом расстоянии. Сила, приложенная весом, равна mg , где m — масса тела, а g — ускорение свободного падения (см. уравнение 5.1). Если мы обозначим потенциальную энергию как e_p , то получим:

$$e_p = mgd. \quad (\text{Уравнение 7.6})$$

Если вся кинетическая энергия тела была преобразована в потенциальную энергию, то значит — первоначальная e_k конвертировалась в эквивалентную e_p , или, объединив уравнения 7.5 и 7.6, получим:

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgd.$$

упростив это выражение и приняв предположение, что величина g — постоянна, получаем:

$$v^2 = 2gd = 19,6d. \quad (\text{Уравнение 7.7})$$

Из этого соотношения можно вычислить (пренебрегая сопротивлением воздуха) высоту, до которой поднимется объект, если нам известна его начальная скорость, то есть та, с которой он движется вверх. Те же самые соотношения могут быть получены из уравнений, которые явились результатом экспериментов Галилео Галилея с падающими объектами.

Кинетическая энергия и потенциальная энергия — это типы энергии, которые используются механизмами, созданными при помощи рычагов, наклонных плоскостей и колес, а потому эти две формы могут быть объединены одним общим понятием — «механическая энергия». Уже во времена Лейбница было признано, что существует своего рода понятие «сохранения механической энергии» и что (если отбросить такие внешние коэффици-

енты, как трение и сопротивление воздуха) механическая энергия могла бы быть визуализирована в виде движения вперед и назад между кинетической и потенциальной формами или между ними и работой, но не (и это справедливо для всех трех форм) как нечто, появляющееся из ниоткуда или исчезающее в никуда.

Сохранение энергии

К сожалению, «закон сохранения механической энергии», внешне — такой аккуратный, как это могло бы показаться при некоторых ограниченных обстоятельствах, имеет свои дефекты, и они сразу выбрасывают его из стройного ряда истинных законов сохранения.

Объект, подброшенный в воздух с некоторой кинетической энергией, возвращается на землю, не обладая той кинетической энергией, которая была у него сначала. Небольшое количество ее теряется на преодоление сопротивления воздуха. Опять же если упругий объект падает с некоторой данной высоты, то он должен был бы (в случае, если механическая энергия полностью сохраняется) сильно удариться и вернуться точно на свою первоначальную высоту. Однако этого не происходит. Он всегда возвращается на высоту несколько меньшую первоначальной, и если позволить ему падать снова и снова, то с каждым разом высота его отскока будет уменьшаться, пока не исчезнет вообще. Это зависит не только от сопротивления воздуха, которое, конечно, тоже вносит свою лепту, но также и от несовершенной эластичности непосредственно самого тела. Действительно, если бросить вниз глыбу мягкой глины, ее потенциальная энергия будет преобразована в кинетическую, но в момент, когда глина ударится о землю с «жестким» шлепком, вся кинетическая энергия пропадет без всякого перехода в потенциальную форму. Судя по всему, в таких случаях механическая энергия просто исчезает.

Можно было бы доказывать, что эти потери механической энергии происходят из-за «несовершенства» окружающей среды. Если предположить, что абсолютно гладкая система движется в абсолютном вакууме или что все объекты абсолютно упругие, то механическая энергия была бы сохранена.

Однако такой спор абсолютно бесполезен, поскольку в истинном законе сохранения дефекты окружающего, реального мира не затрагивают сущность закона. Количество движения, например, сохраняется независимо от трения, сопротивления воздуха, несовершенной эластичности или любого другого отклонения от идеала.

Если мы все еще хотим найти закон сохранения, который вовлекает работу, мы должны иметь в виду, что на каждую потерю механической энергии должно появиться какое-либо увеличение чего-то еще. Такое «кое-что» совсем не трудно найти. Трение — один из наиболее очевидных дефектов окружающей среды — вызывает повышение температуры, то есть нагрев, и, если трение значительно, вызываемое им количество теплоты также значительно. (Температура спичечной головки может быть доведена до точки загорания за одну секунду простым движением по грубой, шершавой поверхности.)

Справедливо и обратное — теплота весьма способна к тому, чтобы ее превратили в механическую энергию. Теплота Солнца поднимает бесчисленные тонны километров водяного пара высоко в воздух, так что вся механическая энергия падения воды (такая, как дождь, водопад или спокойное течение плавной реки) происходит от теплоты, отдаваемой Солнцем.

Более того, уже в XVIII столетии человек преднамеренно преобразовал теплоту в механическую энергию посредством устройства, предназначенного, чтобы изменить мир. Теплота использовалась, чтобы превратить воду в пар в замкнутой камере и использовать этот пар для вращения поршней двигателя и колеса. (Это устройство конечно же называется «паровой двигатель».)

Поэтому кажется ясно, что при разработке истинного закона сохранения мы должны добавить к таким явлениям, как работа, кинетическая и потенциальная энергии, и такое явление, как теплота. Короче говоря, теплоту надо рассматривать как другую форму энергии.

Но если это так, то любое другое явление, которое вызывает повышение температуры, также должно рассматриваться как форма энергии. Электрический ток может нагревать провод, а магнит может вызывать электрический ток, так что и электричество и магнетизм — формы энергии. Свет и звук — также формы энергии и так далее.

Если закон сохранения, который мы выводим, должен охватить работу и все формы энергии (а не только одну механическую энергию), то необходимо показать, что одна форма энергии может быть преобразована в другую форму количественно. Другими словами, в таких энергетических преобразованиях следует рассматривать всю энергию, существующую в процессе; никакая энергия не должна быть полностью потеряна и никакая не создана.

Эта точка зрения была тщательно проверена в 1840-х годах английским пивоваром по имени Джеймс Прескотт Джоуль (1818—1889), чьим хобби было изучение физики. Он измерил теплоту,

произведенную электрическим током, трением воды об стекло, образованную кинетической энергией вращения лопастей привода водяного колеса в воде, работой, которая потребовалась для сжатия газа, и так далее. При этом он нашел, что некоторое определенное количество одного вида энергии конвертируется в определенное количество другого вида энергии и что если рассматривать энергию во всем множестве ее проявлений, то никакая энергия не создается или теряется. Именно в его честь единицу измерения работы и энергии в системе МКС назвали «джоулем».

В более ограниченном смысле можно сказать, что Джоуль доказал, что некоторое определенное количество работы всегда производит некоторое количество теплоты. Применяемая обычно в Британии единица работы «фут на фунт» равна работе, которая требуется, чтобы поднять один фунт массы на высоту в один фут, преодолевая силу тяжести. Общепринятая британская единица теплоты называется «британская тепловая единица» (обычно сокращаемая до «Btu») и является тем количеством теплоты, которое требуется, чтобы поднять температуру одного фунта воды на 1° Фаренгейта. Джоуль и его преемники решили, что 778 фут-фунтов эквивалентны 1 Btu, и именно это и называется «механическим эквивалентом теплоты».

Гораздо предпочтительнее выражать этот механический эквивалент теплоты в метрической системе единиц измерения. Фут-фунт равен 1,356 джоуля, то есть 778 фут-фунтов равны 1055 джоулям. Кроме того, наиболее распространенная единица количества теплоты в физике — это «калория», которая равна количеству теплоты, которое требуется, чтобы поднять температуру одного грамма воды на 1° Цельсия (т. е. по столбчатой шкале)¹; 1 Btu равен 252 калориям (кал). Поэтому механический эквивалент теплоты Джоуля может быть выражен таким образом: поскольку 1055 джоулей равняются 252 калориям, то 4,18 джоуля = 1 калория.

Как только стало ясным перечисленное выше, дальнейшим естественным ходом было предположить, что закон сохранения механической энергии должен быть преобразован в закон сохранения энергии, то есть включить в себя самый широкий смысл того, что мы понимаем под понятиями «энергия», «работа», «механическая энергия», «теплота» и всеми остальными, которые могли бы быть конвертированы в теплоту. Джоуль видел это, и даже до того, как его эксперименты получили дальнейшее развитие, немецкий физик Юлиус Роберт фон Майер

¹ Более подробно о градусах Фаренгейта, градусах Цельсия, калориях и других подобных единицах мы поговорим позже — в 13-й и 14-й главах этой книги.

(1814—1878) экспериментально подтвердил истинность таких предположений. Однако впервые закон сохранения энергии был заявлен научному сообществу в форме достаточно ясной и недвусмысленной в 1847 году немецким физиком и биологом Германом фон Гельмгольцем (1821—1894), и поэтому именно он считается первооткрывателем закона.

Закон сохранения энергии, вероятно, является наиболее фундаментальным из всех обобщений, сделанных учеными-физиками, и таким, от которого им меньше всего хотелось бы отказываться. Мы рады сообщить, что пока что этот закон держится, несмотря на все отклонения реальной Вселенной от идеальных моделей, основанных учеными; он справедлив для всех систем — живых и неживых — и действует как для крошечного мира субатомного царства, так и для космического мира галактик. По крайней мере дважды в прошлом (XX) столетии были обнаружены явления, которые, казалось, нарушали закон сохранения энергии, но физики оба раза оказались в состоянии спасти закон, расширяя интерпретацию понятия «энергия». В 1905 году Альберт Эйнштейн доказал, что сама масса является формой энергии, а в 1931 году австрийский физик Вольфганг Паули (1900—1958) выдвинул концепцию нового вида субатомной частицы — «нейтрино», существование которой смогло объяснить очевидные отклонения от закона сохранения энергии.

И все это не было просто вопросом «спасения лица» или внесения исправлений в закон, который начал «разваливаться» и «плыть». Каждое расширение концепции «сохранения энергии» аккуратно вписалось в расширяющуюся структуру науки XX века и помогло объяснить происхождение явлений; оно также помогло предсказать (и абсолютно точно) другие явления, которые нельзя было бы объяснить или предсказать иначе. Ядерная бомба, например, явление, которое можно объяснить только в соответствии с эйнштейновской концепцией о том, что масса является формой энергии.

Глава 8

ВИБРАЦИЯ

Гармонические колебания

Закон сохранения энергии служит, чтобы пролить свет на те виды движения, которые мы еще не рассмотрели.

Рассмотренные до настоящего момента виды движений независимо от того, были ли они поступательными или враща-

тельными, происходили (если их не нарушать) непрерывно и в одном направлении. Однако любое движение способно прогрессировать поочередно: сначала в одном, а затем — в другом направлении, изменяя свое направление иногда после долгого интервала времени, иногда после короткого, а иногда — даже очень короткого. Такое движение в противоположных направлениях называется «вибрацией» или «вибрационным движением» (от латинского слова, означающего «колебаться, дрожать»).

Этот тип движения весьма распространен, и мы его постоянно видим и чувствуем, например колебание или дрожание веток и листьев растений под воздействием ветра или быструю дрожь работающих машин, например автомобиля, работающего на холостых оборотах; даже стук наших зубов или тряска рук, когда мы дрожим от холода или возбуждения, являются примерами вибрационных колебаний.

Первой формой вибрации, которую подвергли научным исследованиям, было дрожание тугой струны. Такие струны использовались в музыкальных инструментах, известных даже древнейшим; струны издают музыкальные звуки благодаря тому, что вибрационные движения, которые передаются струнами непосредственно воздуху, порождают акустические колебания (см. главы 11, 12). Первым, кто начал изучать такие колебания, был древнегреческий математик и философ Пифагор Самосский (VI столетие до н. э.). Его интересы лежали полностью в изучении взаимоотношений этих колебаний и музыки, и как результат вибрационные колебания часто стали называть «гармоническими колебаниями».

Большинство вибрационных колебаний имеют сложную природу и нелегко поддаются математическому анализу. Однако специфический тип колебаний, иллюстрацией которого является вибрация тугой струны, является исключением. Он может быть проанализирован сравнительно легко, и поэтому такой тип колебаний называется «простым гармоническим колебанием» (иногда сокращенно называемым SHM).

Как было обнаружено, в простых гармонических колебаниях все стадии движения находятся под действием закона Гука. Если мы тянем тугую струну из ее первоначального равновесного положения, величина перемещения от равновесного положения пропорциональна силе, которая старается восстановить это положение равновесия. Если отпустить натянутую струну, то сила упругости ускоряет ее в направлении равновесного положения. Другими словами, струна прыгает назад к состоянию равновесия, перемещаясь все быстрее и быстрее по мере движения.

По мере приближения струны к равновесному положению ее смещение от этого положения становится все меньше и меньше, и сила упругости пропорционально уменьшается. Поскольку уменьшение силы упругости, естественно, создает ускорение, которое передает струне, то, хотя по мере приближения к положению равновесия струна двигается все более быстро, приращение скорости становится все меньше и меньше. Наконец, когда струна достигла равновесия, сила упругости стала равна нулю и ускорение — тоже. Струна больше не может развить скорость, и амплитуда ее движения равна максимуму.

Но, несмотря на то что струна не получает приращения скорости, она перемещается быстро и поэтому не может остановиться в положении равновесия, а двигается мимо него. Только сила может остановить ее перемещение (первый закон Ньютона), а в положении равновесия не имеется никакой силы, чтобы это сделать. Но поскольку струна проходит мимо точки равновесия, ее перемещение вызывает возникновение силы упругости: эта сила производит ускорение, которое служит, чтобы уменьшить скорость движения струны (которая теперь двигается в направлении, противоположном действию силы). Так как струна продолжает двигаться, ее смещение и сила упругости продолжают увеличиваться, скорость уменьшается все быстрее и быстрее, пока не достигнет нуля. Струна теперь опять неподвижна в точке максимального смещения, которая является равной величине первоначального смещения (когда мы оттянули струну рукой).

Под влиянием силы упругости струна снова начинает двигаться в противоположную сторону, проходит через положение равновесия и из него — в первоначальное максимальное смещение. Оттуда она снова идет назад, затем — вперед и так далее.

Если бы не существовало никакого сопротивления воздуха и никакого трения в точках крепления струны, максимальные смещения струны влево и вправо были бы постоянными и одинаковыми и вибрация продолжалась бы неопределенно долго. Но описанные колебания в конце концов в значительной мере не достигают своего максимума и, наоборот, с каждым движением вправо (или влево) достигают точки смещения, не равной, а меньшей, чем та, что была достигнута при предыдущем движении в этом направлении. Колебания «заглушены» и медленно «затухают».

Во всех случаях простых гармонических колебаний принципиальным моментом является то, что изменения скорости всегда происходят гладко и плавно и никогда — резко. Вообразим себе падающее тело, проходящее через поверхность Земли и твердую

материю планеты. Сила тяжести, приложенная к этому телу, непрерывно становится все больше с увеличением расстояния от поверхности планеты и все меньше с продвижением его под этой поверхностью. По мере падения тело ускоряется на все меньшую и меньшую величину. К тому времени, когда оно достигнет центра Земли, на него не будет действовать никакой силы, а его скорость будет максимальной. Тогда тело пройдет сквозь центр Земли и начнет перемещаться к противоположной части планеты; его скорость начнет уменьшаться, поскольку сила тяжести становится все больше и больше, пока тело не появится на противоположной поверхности Земли и не поднимется на такую же высоту, как это было вначале (с другой стороны). Но тогда оно бы повторило свое движение, возвращаясь к своей первоначальной позиции, оно бы начало движение в противоположном направлении и так далее. Такое воображаемое движение также являет собой пример простых гармонических колебаний.

В реальности, однако, движение падающего тела было бы прервано поверхностью Земли, и скорость его резко бы изменилась в момент контакта с этой поверхностью. Получившиеся в результате этого сильные удары — тоже пример вибраций или гармонических колебаний, но совсем не простых гармонических колебаний.

Период колебаний

Особый интерес при рассмотрении любых вибрационных колебаний представляет собой время, которое требуется телу, чтобы пройти расстояние от одной экстремальной точки к другой и назад. Время, которое потребуется для завершения этого движения (или любого другого подобного в этом отношении движения), называется «периодом» этого движения¹.

Всякий раз, когда движение складывается из ряда повторных поддвижений, каждое из которых имеет свой собственный период колебаний, говорят, что такое движение называется «периодическими колебаниями», особенно когда индивидуальные периоды колебаний равны. Движение по кругу или любой замкнутой кривой может рассматриваться как составленное из последовательных возвращений к первоначальной точке нача-

¹ Слово «период» происходит от греческих слов, означающих «круговой путь» или «круг», потому что первое движение, которое заинтересовало человечество с точки зрения измерения времени, затраченного на него, было конечно же круговое движение Солнца по небу, от одного восхода Солнца до следующего.

ла движения, с каждым отдельным движением по кривой; следовательно, это ряд повторных поддвижений и он может быть назван периодическими колебаниями. Вибрация также представляет собой ряд возвращений к первоначальной точке, хотя скорее посредством движений «вперед-назад», чем в соответствии с движением по замкнутой кривой, поэтому и вибрация может также служить примером периодических колебаний.

Определить период колебаний объекта, даже когда он вибрирует в соответствии с законами, управляющими простыми гармоническими колебаниями, довольно сложно, если иметь дело непосредственно с вибрацией. В такой вибрации величины скорости, ускорения не являются постоянными, обе они изменяются в зависимости от положения в каждый данный момент времени. Поэтому при таких исследованиях ищут пути представить вибрацию посредством некоторого вида движения, включающего в себя постоянное ускорение.

Это может быть достигнуто путем перехода от вибрации к другой форме периодических колебаний — круговому движению. Объект может быть изображен как перемещающийся по кругу при постоянном внутреннем ускорении и, следовательно, как перемещение по окружности круга с постоянной скоростью.

Если рассматриваемый круг имеет радиус длины a , тогда длина его окружности равна $2\pi a$. Если точка перемещается со скоростью v , то время t , которое требуется, чтобы сделать полное обращение (период кругового движения), равно:

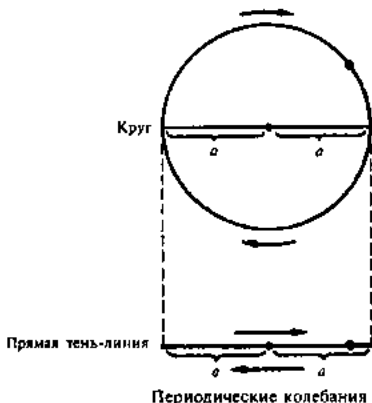
$$t = \frac{2\pi a}{v}. \quad (\text{Уравнение 8.1})$$

Теперь если мы представим себе круг, бросающий тень на стену, то тень его боковой поверхности будет прямой линией. Точка, перемещающаяся по кругу, на тени будет казаться перемещающейся вперед и назад по прямой линии. По мере движения точки по окружности точка на тени будет совершать возвратно-поступательное движение по прямой линии. Период колебаний по окружности (уравнение 8.1) будет также равен периоду вибрации тени.

На любом из крайних положений линии-тени точка будет казаться перемещающейся очень медленно, потому что ее движение по кругу отражается на линию-тень под более или менее прямым углом, что дает очень немного поперечного движения. (А только поперечное движение обнаружит себя на тени.) По мере передвижения точки в промежуточные части круга его движение становится все более поперечным и все

менее поступательным по отношению к линии, так что точка на тени кажется двигающейся все быстрее и быстрее, чем дальше она находится от крайнего положения. Таким образом, когда точка находится в самом центре, точка на окружности перемещается параллельно линии и все ее движение — поперечно. В центре теневой линии поэтому точка кажется перемещающейся самым быстрым образом. Движение точки по линии тени напоминает движения тела при простых гармонических колебаниях, и действительно, данное движение является таковым. Следовательно, формула 8.1 представляет собой период (t) простых гармонических колебаний.

Уравнение 8.1 все еще представляет трудность для анализа, так как включает в себя скорость v , и, в то время как точка перемещается по окружности с постоянной скоростью, она перемещается по линии тени с постоянно меняющейся скоростью. Поэтому мы должны найти, если возможно, что-то, что займет место v .



В любых простых гармонических колебаниях максимальная скорость проходит через среднюю точку между двумя экстремумами. В этот момент тело, испытывающее такое движение, находится в положении равновесия, где оно и осталось бы, если бы находилось в состоянии покоя. В этой точке тело не обладает никакой потенциальной энергией, а обладает только энер-

гией движения, или, как ее иначе называют, «кинетической энергией». Поскольку тело перемещается дальше от своего положения равновесия, оно теряет скорость и поэтому теряет кинетическую энергию. Однако оно перемещается в положение, в котором кинетическая энергия равна нулю, зато получает энергию положения, или, как ее иначе называют, «потенциальную энергию». В экстремальном положении тело останавливается на мгновение, и вся его энергия находится в форме потенциальной энергии. Тело, участвующее в простых гармонических колебаниях, демонстрирует периодический переход кинетической энергии в потенциальную энергию и обратно и (не принимая во внимание эффект демпфирования трением и сопротивление воздуха) являет собой превосходный пример сохранения механической энергии.

Как я уже сказал ранее, в соответствии с законом Гука, сила упругости, приложенная к телу, испытывающему простые гармонические колебания, пропорциональна его смещению от положения равновесия. Она равна $F = kd$, где F — сила упругости, а d — смещение. Сила упругости — наименьшая в положении равновесия (которое находится в центре нашей прямойлинейной тени). В этой точке не имеется никакого смещения и сила упругости равна нулю. Максимальное значение силы упругости достигается в точке максимального смещения, которая, конечно, расположена на краю прямойлинейной тени. Это крайнее положение равно расстоянию a (радиусу окружности, которая отбрасывает прямойлинейную тень) от центра или положения равновесия, следовательно, мы можем сказать, что сила упругости в ее максимальном значении равна ka .

В то время как тело перемещается из положения равновесия до крайнего положения, оно перемещается против силы, которая начинается в 0 и плавно увеличивается до ka , а средняя сила, против которой действует перемещающееся тело, поэтому равна ka плюс 0, разделенные на два, или $(ka/2)$.

Работа, приложенная к телу, которая необходима, чтобы вывести его из положения равновесия и переместить в данную точку, равна силе, умноженной на расстояние, на котором приложена сила. Это означает $ka/2$ умножить на a , или $ka^2/2$. В крайней точке вся эта работа будет запасена в виде потенциальной энергии и поэтому максимальная потенциальная энергия тела, перемещающегося на условиях простых гармонических колебаний, равна $ka^2/2$.

В то же самое время кинетическая энергия тела достигает своего максимального значения в средней точке, там, где вся потенциальная энергия была преобразована в движение и где

скорость достигает своего максимума. Кинетическая энергия тогда равна $mv^2/2$, где m — масса тела, а v его максимальная скорость.

Так как потенциальная энергия и кинетическая энергия постоянно конвертируются между собой в течение всего времени существования простых гармонических колебаний без существенных потерь, максимальная величина потенциальной энергии и максимальная величина кинетической энергии должны быть равны. Таким образом:

$$1/2mv^2 = 1/2ka^2. \quad (\text{Уравнение 8.2})$$

Мы легко можем преобразовать это уравнение:

$$\frac{a}{v} = \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (\text{Уравнение 8.3})$$

Заменяя (m/k) на (a/v) в уравнении 8.1, мы получаем:

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (\text{Уравнение 8.4})$$

Это совершенно удивительный результат, поскольку выясняется, что период простых гармонических колебаний зависит только от массы перемещающегося тела и пропорционален константе между нагрузкой и напряжением. Все эти данные могут легко быть определены для данного специфического тела, и, таким образом, мы можем сразу рассчитать период колебаний.

Следует отметить, что период колебаний не зависит ни от скорости тела, перемещающегося с простыми гармоническими колебаниями, ни от расстояния, на которое тело перемещено из среднего положения, так как и v и a исчезли из уравнения 8.4. Это означает, что, если струна оттянута на некоторое расстояние от ее среднего положения, она достигнет некоторой максимальной скорости в средней точке ее колебаний и будет иметь некоторый период вибрации. Если ее оттянуть на большее или меньшее расстояние, она получит большую или соответственно меньшую максимальную скорость; в любом случае изменения в скорости будет только достаточно, чтобы восполнить изменение в расстоянии смещения, так что период колебаний останется тем же самым.

Этот постоянный период вибрации является большим благом для всего человечества, потому что предлагает средство для весьма точного измерения времени — подсчет колебаний, причем даже затухающих колебаний.

Теоретически любые периодические колебания делают это возможным. Первым периодическим движением, которое слу-

жит человечеству в качестве часов, было непосредственно само движение Земли; каждый поворот планеты на ее оси отмечает один день и ночь, а каждый поворот планеты относительно Солнца отмечает один цикл сезонов. К сожалению, движения Земли не могут нам предложить хороших средств измерения промежутков времени меньше чем длиною в день.

В древние времена человечество использовало аperiодические движения, разбитые (как надеялись) на равные части. Они включают в себя движение тени по основанию, движение песка через узкое отверстие, капанье воды через отверстие, сокращение длины горящей свечи и так далее. Все, что можно было получить таким способом, — это довольно приблизительно равные промежутки времени; и только в середине XVII столетия появилась возможность сообщить время с точностью до часа или менее или измерить единицы времени меньше чем час с некоторой разумной точностью.

Только когда стали использоваться периодические колебания с короткими периодами вибрации, стали возможными современные устройства для измерения времени, а вместе с ними (до очень большой степени) и вся современная наука.

Маятник

Сам Галилео весьма страдал от неспособности точно измерить короткие интервалы времени. (В некоторых случаях он использовал для замера времени свой пульс, и хотя это было периодическое явление, но, к сожалению, не очень устойчивое.) Однако хотя он непосредственно сам и не извлек выгоды из этого, он был первым, кто обнаружил периодические колебания, которые в конечном счете стали использоваться для измерения времени.

В 1583 году, когда Галилео был юношей и студентом-медиком в Университете Пизы, он однажды пошел в местный собор, чтобы помолиться. Но даже его глубокая вера (а Галилео всегда был очень набожным человеком) не смогла удержать его пытливым ум от наблюдений. Он не мог не заметить колебание паникадила¹ в нефе. Время от времени благодаря капризу ветра оно описывало большую дугу, время от времени — меньшую, но, как показалось Галилео, период колебаний все время был тем же самым независимо от длины дуги. Он прервал свои молитвы и проверил эту догадку, рассчитав колебания при помощи своего пульса.

¹ П а н и к а д и л о — огромная многоархусная люстра со свечами, свисающая в зал (неф) из-под купола собора. (Примеч. пер.)

Вернувшись домой, Галилео продолжил эксперимент, подвесив маленькие «люстры», сделанные из «отвесов» и нитей, к потолку и позволив им раскачиваться с различным периодом колебаний. (Такие подвешенные грузы называются «маятниками» (*pendulum* — от латинского слова, означающего «висение» или «покачивание».) Галилео смог доказать, что период колебания не зависит от тяжести отвесов, а только от квадратного корня из длины нити. Другими словами, маятник, подвешенный на нити длиной четыре фута, имеет период колебания вдвое больший, чем такой же, но с нитью длиной в один фут.

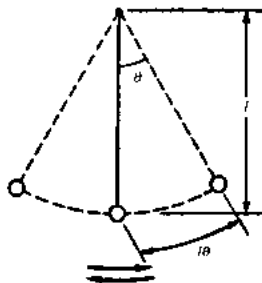
Теперь рассмотрим маятник. Если отвес висит вертикально на своей нити, он останется неподвижным. Это — его положение равновесия. Если отвес отклонить в сторону, натяжение нити заставит его двигаться по дуге круга так, что он поднимется на более высокий уровень. Если отпустить его, то под воздействием силы тяжести он будет двигаться вниз с увеличивающейся скоростью, назад по дуге круга, к своему самому нижнему положению.

Результирующая сила, которая вызывает это движение, получается в итоге сложения силы тяжести и силы натяжения нити. По мере снижения отвеса нить становится все более и более вертикальной и компенсирует все большую часть силы тяжести. Результирующая сила постоянно уменьшается по мере снижения отвеса, так же как ускорение. Когда отвес попадает в самую нижнюю часть дуги, маятник оказывается подвешенным на совершенно вертикальной линии, и нить полностью компенсирует все гравитационное напряжение. В этой точке не существует никакого неуравновешенного гравитационного напряжения и никакого ускорения. Отвес перемещается с максимальной скоростью.

Из-за инерции отвес проходит через точку равновесия и начинает описывать дугу в другом направлении. Теперь снова имеется результирующая сила, которая замедляет его движение. Чем выше он поднимается, тем больше неуравновешенная сила тяготения и тем быстрее замедляется движение отвеса. В конечном счете его движение замедляется до нуля, и в этот момент отвес достигает точки максимального смещения. Далее начинается обратное движение вниз, через точку равновесия, до максимального смещения с другой стороны и так далее.

Это очень похоже на описание простых гармонических колебаний, за исключением того, что там шипание струны вызывает движение вперед и назад по прямой линии, а смещение маятника вызывает движение вперед и назад по дуге круга. Как нам может показаться — это не является принципиальной и существен-

ной разницей, потому что нам кажется, почему бы не существовать периодическому вращательному движению точно так, как существует периодическое поступательное движение? И действительно — имеется достаточное количество обоих видов этих простых гармонических колебаний.



Маятник

Но действительно ли движение маятника является одним из них? Во всех случаях простых гармонических колебаний типа вибрации струны, скручивающегося и раскручивающегося шнура, движения вверх и вниз натянутой струны и раскручивания и закручивания упругой спирали сила упругости находится в пределах материала, из которого изготовлен предмет, она — производное его эластичности (упругости). В случае маятника сила упругости находится вне системы в форме неуравновешенного гравитационного напряжения. Это может представлять собой принципиальную разницу. Чтобы проверить, качается ли маятник согласно свойствам простых гармонических колебаний, мы должны проверить, действительно ли является сила упругости, компенсирующая силу тяжести, прямо пропорциональной величине смещения, что служит показателем того, что в данном случае действует закон Гука (характеризующий простые гармонические колебания).

Давайте начнем со смещения. Это — длина дуги круга, по которой маятник передвигается, чтобы достигнуть некоторого положения. Длина этой дуги зависит и от длины l струны, и от величины угла $(\theta)^1$, на который перемещается маятник. Смеще-

¹ Греческая буква тэта «theta» (θ) часто используется для представления углов.

ние (D) фактически равно длине струны, умноженной на угол, на который перемещается вес:

$$D = l\theta. \quad (\text{Уравнение 8.5})$$

Теперь рассмотрим силу упругости. Она, конечно, зависит от силы тяжести. Полное значение натяжения нити, вызванное силой тяжести, направленной вниз, соответственно должно быть равно mg , где m — масса отвеса, а g — ускорение свободного падения¹. Однако отвес не движется точно вниз, он перемещается по дуге. Это перемещение складывается из воображаемых «скатываний» по наклонной плоскости, которая изменяет свой угол наклона в каждой из точек окружности.

Эта ситуация подобна той, с которой мы столкнулись, когда рассматривали наклонные плоскости. Вообразите отвес маятника в некоторой точке его движения, когда поддерживающая его струна составляет с вертикальной линией угол, равный θ . В этой точке отвес как будто скатывается по наклонной плоскости, составленной по тангенсу к дуге колебания в этой точке. Мы могли бы изобразить такую наклонную плоскость, как часть прямоугольного треугольника. Наклонная плоскость имела бы длину L и высоту H от горизонтальной линии. Угол, который наклонная плоскость создает с горизонтальной линией, как это можно видеть из обычной геометрии, равен углу сдвига, то есть также равен θ .

Как мы узнали, максимальная сила тяготения должна быть умножена на отношение H к L , так что сила упругости (F) будет равна $mg(H/L)$. Отношение H к L представляет собой синус² угла θ и обозначается « $\sin \theta$ ». Поэтому мы можем выразить силу упругости как:

$$F = mg (\sin \theta). \quad (\text{Уравнение 8.6})$$

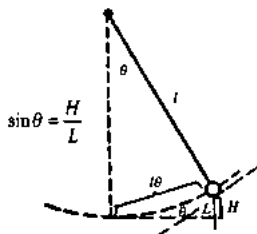
¹ На самом деле струна (нить) также имеет массу, какой бы легкой она ни была. Таким образом, мы имеем массу, распределенную по линии маятника от отвеса до центра закрепления. В каждой данной точке струна обладает некоторой массой, которая зависит от разницы в длине струны. Это также истинно и для самого отвеса, различные части которого имеют различное расстояние от точки закрепления. В идеальном варианте маятник должен состоять из массивного отвеса с нулевым объемом, приложенным в центре струны к центру закрепления. Такое устройство называется «идеальным или простым маятником» и, естественно, в реальном мире не существует. Однако, используя тяжелый отвес и легкую струну, можно сделать реальный маятник, который по своим свойствам будет приближен к идеальному маятнику. (У нас это называется «математическим» и «физическим» маятниками соответственно.) (Примеч. пер.)

² Отношение одной стороны прямоугольного треугольника к другой изменяется в соответствии с величиной углов прямоугольного треугольника. Для некоторого заданного угла эти отношения установлены, и каждому дано соб-

Таким образом, отношение силы упругости к смещению в случае качающегося маятника равно (объединяем уравнения 8.5 и 8.6):

$$\frac{F}{d} = \frac{mg(\sin\theta)}{l\theta} \quad (\text{Уравнение 8.7})$$

Теперь возникает вопрос: является ли это отношение константой, поскольку если это так, то качающийся маятник должен рассматриваться как пример простых гармонических колебаний. Масса (m) отвеса и длина струны (l) не изменяются в процессе колебания маятника, значение g также постоянно для любой данной точки поверхности Земли, так что величина mg/l также может рассматриваться в качестве константы. Остается только определить, является ли величина $(\sin\theta)/\theta$ также константой. Если это так, то задача решена.



Сила упругости нити маятника

К сожалению, данное отношение не является константой. Как мы можем легко определить, синус 30° равен $1/2$, в то время как синус 90° равен 1. Другими словами: в то время как синус угла только удвоился, сам угол стал больше в три раза. Это означает, что $(\sin\theta)/\theta$ не является константой, что сила упругости нити маятника не является величиной, прямо про-

ственное название. Так как такие отношения изучаются в той части математики, которая называется «тригонометрией» (это слово по-гречески означает «измерение треугольников»), то такие отношения называются «тригонометрическими функциями». Синус представляет собой пример такой тригонометрической функции. Пока мы не будем подробно вникать в сущность тригонометрических функций. Достаточно будет сказать, что мы можем легко получить таблицы, которые дадут нам значение синуса или любой другой тригонометрической функции, составленных для углов различной величины.

порциональной смещению, и что покачивание маятника не является примером простых гармонических колебаний.

Однако если отношение $(\sin \theta)/\theta$ и не является константой, то оно почти постоянно для маленьких углов (10° или меньше). Поэтому, если маятник качается вперед и назад по небольшой дуге, это движение практически является примером простых гармонических колебаний.

На практике для маленьких углов $(\sin \theta)/\theta$ — не просто константа, это отношение равно единице. По этой причине (не забывая, что мы имеем дело с маятниками, качающимися только по маленьким дугам) мы можем устранить выражение $(\sin \theta)/\theta$ в уравнении 8.7 и написать:

$$\frac{F}{D} \approx \frac{mg}{l}, \quad (\text{Уравнение 8.8})$$

в котором символ \approx означает «приблизительно равно».

(Вы можете задать вопрос: почему же мы желаем воспользоваться приблизительным равенством, ведь наука должна оперировать только точными отношениями? Ответ таков: иногда следует удовлетвориться аппроксимацией (т. е. максимально приближенным значением) — в этом случае мы можем обращаться с маятником как с примером простых гармонических колебаний и производить некоторые другие вычисления, весьма простые, пусть даже и не совсем точные.)

Например, как мы уже определили, период (t) простых гармонических колебаний объекта равен: $2\pi m/k$ (другая форма той же записи — см. уравнение 8.4).

Символ k представляет собой отношение силы упругости к смещению, для которого в случае маятника мы нашли значение в уравнении 8.8; там оно установлено приблизительно равным mg/l . При объединении уравнений 8.4 и 8.8 (и при сохранении символа приблизительного равенства) мы можем заявить, что период умеренно качающегося маятника равен:

$$t \approx 2\pi \sqrt{\frac{m}{mg/l}} \approx 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (\text{Уравнение 8.9})$$

Как вы видите, период умеренно качающегося маятника не зависит от массы отвеса, а зависит (по крайней мере, в весьма хорошем приближении) от квадратного корня из длины струны, что, собственно, в далеком XVI столетии и определил Галилео экспериментальным путем.

Присутствие в уравнении величины g — ускорения, вызванного силой тяжести, — имеет очень важное значение. Если пре-

образовать уравнение 8.9 так, чтобы выразить значение g , то мы получим:

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2}. \quad (\text{Уравнение 8.10})$$

Это дает нам гораздо более легкий метод для измерения g , чем непосредственное измерение скорости свободного падения. Длина маятника определяется легко, и его период — также. Использование маятников во времена Ньютона показало, что изменение g в зависимости от широты местности, где производятся измерения, и добавило еще одно экспериментальное подтверждение к предположению Ньютона, что Земля имеет форму сплюсненного сфероида.

Так как период умеренно качающегося маятника практически является константой, это его свойство может использоваться для измерения времени. Если маятник связан с зубчатыми колесами таким способом, что с каждым колебанием маятника колесо продвигается вперед только на один зубец, это движение тогда легко может быть преобразовано таким образом, чтобы подвинуть один указатель по кругу, составляющему точно один час (минутная стрелка), а другой указатель вокруг того же круга, но за двенадцать часов (часовая стрелка). Добавив в систему веса (гири), мы можем компенсировать затухание колебаний маятника, которое вызвано трением и сопротивлением воздуха.

Будучи уже в преклонном возрасте, Галилео имел возможность увидеть практическое применение этого его открытия, сделанного в далекой юности. Оно было осуществлено голландским ученым Христианом Гюйгенсом (1629—1695) в 1673 году. Гюйгенс не стал даже учитывать несовершенство маятника. Он показал, что физический маятник — это не математический маятник и имеет отвес некоторого конечного объема, подвешенный на струне или прутке, имеющем некую конечную массу. Он также показал, что если маятник качается по кривой, которая не является дугой окружности, а движется по траектории гораздо более сложной кривой, называемой «циклоидой», то тогда его период будет константой. Кроме того, он показал, как можно сделать маятник, который качался бы по такой циклоидальной дуге.

С того времени использовались многие изобретательные методы, предназначенные для того, чтобы привлечь во внимание тот факт, что длина маятника (и поэтому его период) слегка изменяется также в зависимости от температуры окружающей среды.

Другие представители простых гармонических колебаний могут использоваться для измерения времени. Гук (тог, что открыл закон Гука) изобрел «волосок» — тонкую спиральную пружину, которая может применяться для того, чтобы развертываться и свертываться, совершая простые гармонические колебания. Работа тонкой пружины поддерживается при помощи разматывания большой «главной пружины», которую периодически подтягивают при помощи механического привода — «заводят». Такие волосковые пружины используются в наручных часах, где нет места для маятника и в которых (даже если бы место существовало) движения руки немедленно приведут маятник в беспорядочное движение¹.

В последние годы (конец XX века. — *Пер.*) для измерения времени используются колебания атомов, которые перемещаются внутри молекул в соответствии все с теми же законами простых гармонических колебаний. Такие «атомные часы» обладают гораздо большей точностью и стабильностью, чем любые из часов, которые могут быть созданы на основе механики макромира.

Глава 9 ЖИДКОСТИ Давление

Я предполагал, что «тела», которые мы до этого рассматривали, были «твердыми», то есть что они являются более или менее жесткими и имеют определенную неизменяемую форму. Они сопротивляются любой силе, имеющей тенденцию к изменению или деформации этой формы (хотя если мы будем увеличивать силу без предела, то в конечном счете достигнем точки, в которой даже наиболее твердая форма будет деформироваться или ломаться). Твердые тела рассматривались как сплошные, то есть если часть твердого тела двигалась, то и все тело двигалось таким образом, чтобы сохранить свою форму.

Однако есть такие тела, которые не имеют определенной формы и не сопротивляются деформации. Если приложить к ним даже маленькое усилие, которое будет сокращать или вытягивать их, они в ответ изменят свою форму. В частности, они реагируют на силу тяжести и изменяют свою форму таким об-

¹ Но маятниковый механизм все-таки используется в наручных часах «с автоподзаводом» — там качание маятника, через систему колес, производит подтягивание главной пружины. (*Примеч. пер.*)

разом, чтобы свести свою потенциальную энергию к минимуму. В ответ на гравитацию такие тела будут перемещаться максимально вниз и в максимально возможной степени сглаживаться; таким образом, они будут принимать форму любого контейнера (сосуда), в котором они находятся. Если наклонить открытый сверху контейнер или если в его основании сделать отверстие, материал под влиянием силы тяжести выльется и примет новое положение, в котором его потенциальная энергия еще меньше, то есть — на стол, на пол или в отверстие. Эта способность литься или течь и дала имя таким телам — «текучие» (fluids)¹ от латинского слова, означающего «течь».

Текучие тела делятся на два класса. В одном классе направленная вниз сила тяжести первостепенна, то есть текучее тело, принимающее форму контейнера, собирается в самой нижней части его и не обязательно заполняет контейнер полностью. Такие текучие тела имеют если и неопределенную форму, но определенный объем и называются «жидкостями» (также от латинского слова, означающего «течь»). Наиболее знакомая и хорошо известная нам жидкость, конечно, вода.

В другом классе текучих тел направленной вниз силе тяжести противостоят другие эффекты, которые мы будем рассматривать в более поздних главах. В этом классе также имеется некоторая концентрация тела к основанию контейнера, но она недостаточна, чтобы заметить ее при обычных условиях. В целом такие текучие тела распространяются более или менее равномерно по всему ограниченному пространству и не имеют никакого собственного, определенного объема. Такие текучие тела — без определенной формы или определенного объема — называются «газами»².

Наиболее хорошо знакомый нам газ — воздух. Я рассмотрю по отдельности оба класса этих разнообразных текучих тел и начну с жидкостей.

Вес объекта, как я рассказывал раньше, является направленной вниз силой, которая приложена к объекту и является ответом на гравитационное притяжение. В случае твердых тел эта сила проявляет себя через любую часть своей нижней поверхности, посредством которой оно вступает в контакт с другим телом. Так как нижняя поверхность обычно шероховатая (даже если это видно только через микроскоп), сила неравномерна: она приложена в тех точках, где имеется фактический контакт,

¹ Авторский термин. (Примеч. пер.)

² Слово «газ» было введено в обращение примерно в 1600 году фламандским химиком Яном Балтистом Ван Гельмонтом (1577—1644), который, скорее всего, образовал его от греческого слова, означающего «хаос».

а не в тех, где контакта в действительности нет. По этой причине обычно принято говорить только относительно полной направленной вниз силы, приложенной твердым телом.

В случае жидкости, однако, контакт между ее нижней поверхностью и объектом, на котором она находится, весьма гладок и равномерно распределен, так что все части поверхности получают равную долю¹. Поэтому для жидкостей становится удобным говорить относительно веса (или, более правильно, силы), приложенной на единицу площади. Эта величина — сила на единицу площади — называется «давлением».

Обычно для измерения давления используют такие единицы, как «фунты на квадратный дюйм» (иногда также используется сокращение «psi»); в этом случае фунты являются единицей веса, но никак не единицей массы.

В метрической системе соответствующие единицы измерения давления — ньютон на квадратный метр — в системе МКС и дина на квадратный сантиметр — в системе СГС. Так как один ньютон равен 100 000 дин, а квадратный метр равняется 10 000 квадратных сантиметров, то 1 н/м^2 равен 100 000 дин на 10 000 квадратных сантиметров, или 10 дин/см^2 . Зависимость между английскими и метрическими единицами измерения такова: 1 фунт на квадратный дюйм равен 6900 н/м^2 , а 1 грамм на квадратный сантиметр равен 98 н/м^2 .

Предположим, что мы рассматриваем один квадратный сантиметр основания контейнера (сосуда), заполненного жидкостью до высоты, равной h . Давление (дин/см²) зависит от веса жидкости, опирающейся на этот квадратный сантиметр. Вес зависит, по крайней мере частично, от объема этого столба жидкости размером в один квадратный сантиметр в площади поперечного сечения и высотой в h сантиметров. Объем этого столба равен h кубических сантиметров.

Однако из того, что мы знаем об объеме вещества, отнюдь не следует, что знаем его вес. Общеизвестно, что вес тела данного объема изменяется в зависимости от материала, из которого состоит это тело. Например, мы готовы признать, что железо «более тяжелое», чем алюминий. Но при этом, конечно, предполагается, что данный объем железа является более тяжелым, чем тот же самый объем алюминия. (Если мы уберем это ограничение равенства объемов, то тут же столкнемся с фактом, что

¹ Если мы возьмем достаточно мощный микроскоп, шероховатость становится явной, в чем легко убедиться. В частности, это происходит потому, что материя в действительности не непрерывна, а состоит из дискретных частиц, называемых «атомами». В данном контексте нас это не волнует, а позже в этой книге данный вопрос будет рассмотрен более подробно.

большой слиток алюминия обладает гораздо большим весом, чем железный гвоздь.)

Для любого объекта существует характеристика, которая выражает количество его веса в единице его объема и называется «плотностью тела»; в метрической системе единицей измерения плотности обычно является грамм (веса) на кубический сантиметр или килограмм (веса) на кубический метр. Поэтому было бы более верно сказать, что железо скорее «более плотное», чем «более тяжелое», чем алюминий.

Если высота столба жидкости, опирающейся на единицу площади поверхности, определяет ее объем, а плотность этой жидкости является ее весом на единицу объема, то полный вес на единице площади, или давление (p), равен высоте столба жидкости (h), умноженной на ее плотность (d)¹:

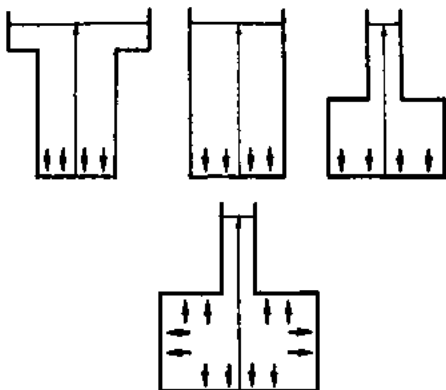
$$P = hd. \quad (\text{Уравнение 9.1})$$

Давление жидкости на основание контейнера поэтому зависит только от высоты и плотности жидкости, а не от формы контейнера или полного количества жидкости в этом сосуде. Это означает, в частности, что на приведенном рисунке различные сосуды, обладающие одинаковым основанием, но различной формой и содержащие различное количество жидкости, будут испытывать равное давление на свое основание.

Легко видеть, что сосуд с расширенной верхней частью должен испытывать то же самое давление на основание, поскольку верхняя горизонтальная часть сосуда явно содержит дополнительное ее количество. Но отнюдь не кажется логичным тот факт, что сосуд с зауженной верхней частью также должен испытывать то же самое давление на основание. Жидкость, которая отсутствует из-за сужения сосуда, ведь не вносит свой вклад в общее давление? Каким же образом тогда получается, что величина давления остается такой же, как если бы жидкость там присутствовала?

Чтобы объяснить этот факт, мы должны понять, что давление в жидкостях распространяется по-другому, не так, как в твердых телах. Твердое тело сопротивляется деформирующему действию собственного веса. Большая мраморная колонна (столб) может стоять прямо на каменном полу и передавать на этот пол достаточно большое давление, но сама она под действием собственного веса перемещаться не будет. Колонна не будет также выпирать

¹ Подразумевается, что давление по столбу не меняется с его высотой, по крайней мере когда мы рассматриваем жидкости; действительно, для малых давлений эта величина настолько мала, что ею можно пренебречь. Однако для газов это будет не так.



Давление и форма (гидростатический парадокс)

посередине, и если мы приложим к ней ладони, то не почувствуем никакого бокового давления.

Давайте теперь представим себе такой же столб, но сделанный из воды. Понятно, что он не просуществует и доли секунды. Под силой своего собственного веса он «выпятится» в разные стороны наружу, в каждой точке по всей его длине и «рассыплется». Если же водяной столб заключен в замкнутый алюминиевый сосуд, то свойство воды «выпячиваться наружу», очевидно, проявит себя в виде некоторой поперечной силы. Если в алюминиевом цилиндре просверлить отверстие, то вода будет выплескиваться вбок под влиянием этой самой силы. Применяя ту же логику рассуждений, мы можем показать, что и по отношению к наклоненной диагонально стенке вода при контакте проявит себя подобным же образом.

Жидкость действительно осуществляет давление во всех направлениях, и особенно в направлении, перпендикулярном к любой поверхности, с которой она вступает в контакт. Величина давления, приложенного в любой данной точке, зависит от высоты жидкости над этой указанной точкой. Таким образом, если в цилиндрическом сосуде с водой просверлено отверстие, то жидкость будет выплескиваться с большей силой, если отверстие около основания (высота жидкости над отвер-

ствием) больше, и с меньшей, если это отверстие находится около поверхности воды (высота жидкости над отверстием — меньше).

Таким образом, как изображено на рисунке, в горизонтальной секции сосуда с зауженной частью имеется давление жидкости. Величина этого давления зависит от высоты жидкости над этой горизонтальной секцией. В соответствии с третьим законом Ньютона верхняя горизонтальная секция прикладывает равнос давление вниз на жидкость. Направленное вниз давление горизонтальной секции равно тому, которое было бы вызвано отсутствующей жидкостью, если бы она там была, и, таким образом, давление на дне сосуда остается тем же.

Плаву́честь

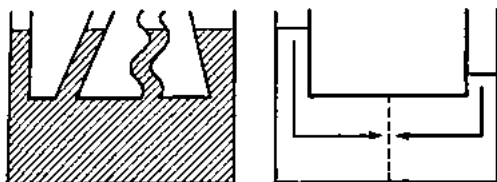
Обобщение, рассматривающее давление в жидкостях, которое мы привели в предыдущем абзаце, впервые было использовано и ясно обосновано французским математиком Блезом Паскалем (1623—1662) и поэтому часто упоминается как «принцип Паскаля».

Это обобщение может быть выражено следующим образом: давление жидкости в замкнутом сосуде распространяется одинаково во все стороны, одинаково по всей его граничащей с жидкостью поверхности и направлено под прямым углом к стенкам сосуда.

Этот же принцип можно использовать для объяснения такого известного факта, что, если сосуд с жидкостью содержит два или более отверстий, к которым подсоединены трубки различной формы, по которым жидкость может свободно подниматься, и если в сосуде находится достаточное количество жидкости, то уровень жидкости в трубках будет точно соответствовать уровню жидкости в сосуде, невзирая на разницу в форме¹.

Чтобы объяснить это явление, давайте рассмотрим частный случай сосуда с двумя отверстиями и представим себе, что этот сосуд разделен пополам подвижной вертикальной стенкой, проходящей посередине между этими двумя отверстиями. Давление слева от разделения будет зависеть от высоты жидкости слева, в то время как давление справа будет зависеть от высоты жидкости справа. Если столб жидкости слева выше, то давление жидкости на левой стороне больше, чем таковое на правой сто-

¹ Это не совсем точно, так как имеется капиллярный эффект, но о нем позже



Вода «ишет» свой уровень

роне, соответственно имеется разность давлений слева направо. Жидкость вынуждена смешать разделение в этом направлении так, чтобы высота столба жидкости на левой стороне уменьшилась, а справа — увеличилась. Когда высоты обоих столбов жидкости сравняются, то разность давлений исчезает и стенка перестает перемешаться.

Этот эффект издавна известен в народе, что подтверждает пословица: «Каждая вода ишет свой уровень».

Прошу вас обратить внимание на тот факт, что я считаю само собой разумеющимся, что жидкости будут двигаться, или течь, в ответ на воздействие некоей внешней силы. Законы движения применяются к жидкостям так же, как к твердым телам, и изучение механики, в его широком смысле, включает в себя изучение сил и движений не только в твердых телах, но и в жидкостях. Однако общим правилом является ограничение использования термина «механика» только твердыми телами. Механике жидкостей посвящена специальная область науки, называемая «гидродинамика» (от греческих слов, означающих «движение воды»), а механике газов — своя область, называется «пневматика» (от греческого слова, означающего «воздух»). Иногда эти две области науки группируют вместе под общим названием «гидроаэромеханика».

Не только собственно вес жидкости может быть преобразован в давление всех ее частей, но и всякая другая внешняя сила.

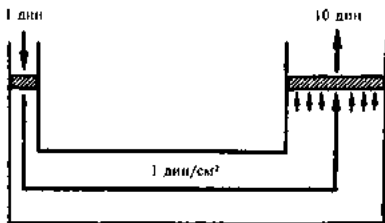
Например, предположим, что жидкость полностью заполняет сосуд с двумя отводами, каждый из которых закупорен подвижным поршнем; для простоты будем считать поршни невесомыми. Предположим, кроме того, что отводы имеют различную ширину, так что поршень в большем отводе имеет площадь поперечного сечения, равную 10 см^2 , в то время как поршень в меньшем отводе имеет площадь поперечного сечения, равную всего лишь 1 см^2 .

Теперь представьте себе, что к меньшему поршню приложена сила, равная одной дине. Так как площадь поверхности меньшего поршня равна 1 см^2 , то давление на него, полученное в результате приложения этой силы, равно 1 дин/см^2 . В соответствии с принципом Паскаля это давление передается через все тело жидкости неизменным и направлено перпендикулярно ко всем стенкам. В частности, данное давление перпендикулярно той части стенок, которая представляет собой больший поршень. И поскольку поршень меньшего размера перемещается вниз, то поршень большего размера будет перемещаться вверх.

Восходящее давление против большего поршня должно быть тем же самым, что и нисходящее давление против меньшего поршня, то есть 1 дин/см^2 . Однако площадь поверхности большего поршня равна 10 см^2 . Поэтому полная сила, которая действует на больший поршень, равна 1 дин/см^2 , умноженной на 10 см^2 , или 10 дин . Полная сила была умножена в десять раз, и соответственно вес, который могла поднять первоначальная сила, также будет увеличен в десять раз. Приспособление, которое называется «гидравлическим прессом», основано на этом эффекте, означаящем, что тяжелые грузы могут быть подняты при помощи разумного количества силы.

Что же, мы опять получаем нечто из ничего? Нисколько! Предположим, что мы нажимаем на маленький поршень (площадью 1 см^2) и заставляем его переместиться на расстояние в 1 см .

Объем жидкости, которую это заставило переместиться, равен 1 см^2 , умноженному на 1 см , то есть одному кубическому сантиметру (1 см^3). Большой поршень (площадью 10 см^2) может переместиться вверх лишь на расстояние, достаточное для того, чтобы вместить этот перемещенный 1 см^3 жидкости. Тре-



Гидравлический пресс

буемос расстояние равно 1 см^3 поделить на 10 см^2 , или $0,1 \text{ см}$. Таким образом, создалась такая же ситуация, как в случае рычага. Да, полученная сила стала десятикратно увеличенной, но расстояние, на котором действует эта сила, уменьшилось в десять раз. Полная работа (сила, умноженная на расстояние), полученная на выходе гидравлического пресса, остается такой же (если мы пренебрегаем такими вещами, как трение), как полная работа на его входе.

Давление жидкости передается не только стенкам сосуда, но также и (перпендикулярно) поверхностям любого твердого объекта, находящегося в пределах жидкости. Представьте себе железный куб, опущенный в жидкость таким образом, что верхняя поверхность и основание куба совершенно горизонтальны, а другие четыре поверхности — совершенно вертикальны. Давление на каждую из четырех вертикальных поверхностей зависит от высоты жидкости над ними, а она является одинаковой для всех. Таким образом, для вертикальных поверхностей мы имеем равные давления, направленные попарно и противоположно. Следовательно, в любом из направлений не существует никакого суммарного поперечного давления.

Но что, если мы рассмотрим две горизонтальные поверхности — верхнюю и основание? Ясно, что для нижней поверхности высота жидкости больше, а для верхней поверхности — меньше. Поэтому возникает сравнительно большое восходящее давление, приложенное к нижней поверхности, а ему противостоит сравнительно небольшое нисходящее давление, приложенное к верхней поверхности. В результате на тело, погруженное в жидкость, начинает действовать результирующая сила, направленная вверх. (Это наиболее легко проследить в случае твердого куба, но можно показать, что такое утверждение справедливо для твердого тела любой формы или, если это имеет значение, для погруженной капли жидкости или пузырька газа.) Эта выталкивающая вверх сила, с которой жидкость действует на погруженные в нее объекты, называется «плавучесть».

Насколько же велика эта выталкивающая сила? Рассмотрим твердое тело, погруженное в жидкость, содержащуюся в контейнере. Твердое тело должно создать место для того, чтобы разместить собственный объем, раздвигая или перемешая эквивалентный объем жидкости; уровень жидкости в контейнере соответственно повышается, чтобы разместить этот перемещенный объем.

Из рассмотренного следует, что твердое тело при погружении прикладывает к жидкости направленную вниз силу, достаточно большую, чтобы сбалансировать вес собственного объ-

ема твердого тела жидкостью. В соответствии с третьим законом Ньютона ожидается, что жидкость, в свою очередь, приложит к твердому телу эквивалентную выталкивающую силу, равную весу все того же количества жидкости.

Первоначальный вес погруженного тела равен его объему (V), умноженному на его плотность (D). Вес вытесненной жидкости равен ее объему (который является равным объему погруженного твердого тела и, следовательно, также равен V), умноженному на ее плотность (d). Вес тела после погружения (W) равен его первоначальному весу минус вес вытесненной воды:

$$W = VD - Vd. \quad (\text{Уравнение 9.2})$$

Решая данное уравнение для D (плотность погруженного твердого тела), мы имеем:

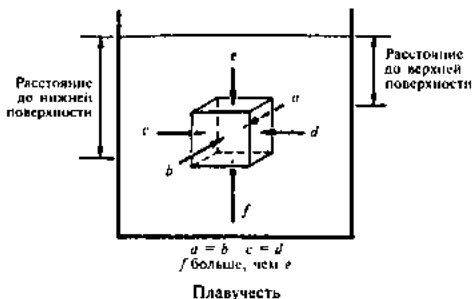
$$D = \frac{W + Vd}{V}. \quad (\text{Уравнение 9.3})$$

Вес погруженного тела (W) может быть непосредственно измерен, объем вытесненной жидкости (V) — получен сразу после измерения повышения уровня жидкости и площади поперечного сечения сосуда, а плотность жидкости (d) также может быть легко измерена. Имея эти данные, мы легко можем рассчитать из уравнения 9.3 плотность погруженного тела.

Этот метод измерения плотности был открыт в III столетии до н. э. великим греческим математиком Архимедом. История гласит, что царь Гиерон из Сиракуз, получив золотую корону от ювелира, заподозрил того в нечестности. Царь чувствовал (а точнее, ему донесли), что ювелир сплавил золото с более дешевым серебром и присвоил себе разницу. Царь дал указание Архимеду определить: так ли оно было сделано. Естественно, корону повреждать было нельзя.

Архимед знал, что плотность короны, сделанной из серебряного сплава, будет меньше, чем золотой, но он не мог найти способ измерить плотность короны. Для определения плотности ему было необходимо знать как вес, так и объем короны. Однако если вес короны он мог узнать легко, то как узнать объем короны, не придавая ей формы куба, сферы или другой формы, для которой геометрией того времени была разработана методика расчета объема, он не знал. Кроме того, Гиерон не одобрил бы такое «изменение формы» со всеми вытекающими из этого факта последствиями.

Как гласит легенда, принцип плавучести пришел в голову Архимеду, когда он лег отдохнуть в полную ванну и увидел вытесненную из нее на пол воду. История донесла до нас зрели-

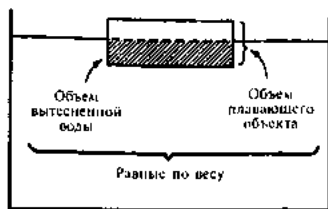


ше голого, бегущего по улицам Сиракуз Архимеда. Он бежал, крича: «Эврика! Эврика!» («Я нашел! Я нашел!») Погрузив в воду корону и измерив повышение уровня воды, а также зная ее вес, и сделал то же самое с куском чистого золота равного веса, он сразу смог сообщить, что плотность материала, из которого была сделана корона, значительно меньше, чем у золота; соответственно ювелир был наказан. А основные принципы плавучести с тех пор называются «законы Архимеда».

Погруженное тело имеет большую плотность, чем плотность жидкости, в которую оно погружено, то есть D больше, чем d , и VD , естественно, больше, чем Vd . Из уравнения 9.2 мы видим, что в этом случае вес (W) погруженного тела должен быть положительным числом. Вес тела уменьшается, но все же он еще больше, чем нуль, и тело тонет в жидкости. (Подобным образом, твердый — железный или алюминиевый — предмет тонет в воде.)

Однако если погруженное тело имеет меньшую плотность, чем плотность жидкости, в которую оно погружается, то есть D меньше, чем d , VD меньше, чем Vd , то погруженное тело имеет вес, который выражается отрицательным числом. С отрицательным весом тело в ответ на поле тяготения скорее перемещается вверх. (Таким образом, деревянная палочка или пузырек воздуха, погруженные в воду, будут «падать вверх», как только мы перестанем их удерживать под водой и позволим им свободно двигаться.)

Тело, обладающее меньшей плотностью, чем окружающая его жидкость, будет плавать, частично погруженное, на поверхности этой жидкости; в этом состоянии вес воды, которую это тело вытеснило, равен его собственному первоначально-



Плавание

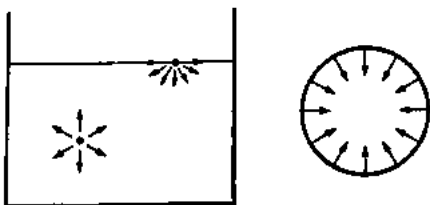
му весу; в таком случае его вес в воде равен нулю и оно не всплывает и не тонет. Твердое тело плавает, когда оно вытеснило такое количество воды (меньшее, чем его собственный объем), чтобы оно равнялось его собственному первоначальному весу.

Однако, несмотря на то что стальное судно плавает, это не означает, что плотность стали меньше, чем плотность воды. Ведь не сталь в одиночку вытесняет воду. Внутри судна находится воздушная полость, то есть по мере погружения в воду находящийся там воздух вытесняет воду так, как это делает стальной корпус. Суммарная плотность же сплава «сталь плюс вложенный воздух» является меньшей, чем плотность воды, хотя плотность стали в одиночку конечно же нет; вот поэтому стальные суда и плавают.

Сила плавучести, между прочим, это не только вопрос вычислений и теории; ее можно легко почувствовать. Поднимите тяжелый камень из воды, и вы почувствуете, как он внезапно увеличился в весе, едва попав на воздух. Опустите в воду большой кусок древесины и попробуйте его утопить; вы увидите, что дерево как бы «сопротивляется» вашим попыткам, — это сила плавучести выталкивает дерево из воды, и вы можете почувствовать ее «своими руками».

Когезия и адгезия

Твердые тела, как я уже сказал в начале главы, действуют как единое сплошное целое. Каждый фрагмент твердого объекта крепко сцепляется с любым другим его фрагментом; таким образом, если вы схватили один участок камня и поднимаете его, то поднимается целиком и весь камень. Это свойство фрагмен-



Поверхностное натяжение

тов — сцепляться вместе — называется «когезией» (*cohesion* — от латинских слов, означающих «сцепляться»).

В жидкостях нет ничего подобного когезии твердых тел. Если вы опустите руку в воду, стараясь «зацепить» ее, надеясь на то, что вся жидкость поднимется из сосуда вслед за вашей рукой, вы только намочите пальцы — и все. Однако из этого нельзя заключить, что в жидкостях сила когезии полностью отсутствует. Эта сила в большинстве жидкостей намного меньше, чем в твердых телах, но она не равна нулю. Это наиболее четко можно увидеть, когда мы рассматриваем поверхность жидкости.

В теле жидкости, даже совсем рядом с ее поверхностью, данная часть жидкости связана силами сцепления с другими частями жидкости, которые окружают ее, одинаково во всех направлениях. В любом заданном направлении мы не можем обнаружить никакой суммарной неуравновешенной силы¹. На поверхности же жидкости, однако, силы сцепления направлены только внутрь, в тело жидкости, и не направлены наружу, где никакой жидкости, чтобы вызвать к жизни силы сцепления, нет. (Наиболее часто с другой стороны поверхности жидкости находится только воздух, а силы притяжения между воздухом и жидкостью настолько малы, что их можно игнорировать.) Результирующая этой полусферы сил сцепления, построенной относительно частицы жидкости на поверхности, направлена внутрь жидкости и расположена перпендикулярно этой поверхности.

¹ В твердых телах различные частицы, составляющие их сущность, выровнены в установленных и организованных положениях (в то время как в жидкостях они перемещаются практически свободно). По этой причине силы сцепления между соседними частицами в твердых телах ориентированы в определенных направлениях и имеют очень значительную величину.

Чтобы дать возможность поверхности жидкости противстоять этой внутренней силе, требуется выполнить работу, поэтому поверхность представляет собой форму потенциальной энергии. Такая специфическая форма потенциальной энергии обычно называется «поверхностной энергией»¹.

Такая поверхностная энергия распределена по площади поверхности, таким образом, ее единицы измерения — работа на площади. В системе МКС это джоули на квадратный метр ($\text{Дж}/\text{м}^2$), а в системе СГС это будут эрги на квадратный сантиметр ($\text{эрг}/\text{см}^2$). В случае поверхностной энергии чаще используется система СГС, как более удобная. Один эрг равен 1 дин·см, или $1 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{с}^2$, так что $1 \text{ эрг}/\text{см}^2$ равен $1 (\text{г}\cdot\text{см}^2/\text{с}^2)/\text{см}^2$. Если мы сократим на одну из единиц измерения (сантиметры), то получим $1 (\text{г}\cdot\text{см}/\text{с}^2)/\text{см}$, или 1 дин/см; фактически наиболее часто пользуются последними из представленных единиц измерения поверхностной энергии — дин/см (дина на сантиметр).

Предоставленная самой себе поверхностная энергия приходит к минимуму способом, аналогичным тому, как гравитационная потенциальная энергия приходит к минимуму всякий раз, когда шар, находящийся высоко в воздухе, падает на землю или когда водяной столб снижается и растекается, если целостность сосуда с жидкостью нарушена. Небольшое количество жидкости, когда оно находится во взвешенном состоянии, в воздухе, приобретает форму сферы; поскольку сфера обладает для данного объема самой маленькой площадью поверхности, то поверхностная энергия тоже становится минимальной. Такая сфера из жидкости, однако, искажается в «неправильный» объект неуравновешенным нисходящим напряжением силы тяжести. Если она падает в воздухе, как это делает, например, дождевая капля, то ее основание будет сплющено благодаря восходящей силе сопротивления воздуха. Чем меньше капелька жидкости, тем в меньшей степени воздействуют на нее относительные эффекты силы тяжести и сопротивления воздуха, и она становится все более сферической. Мыльные пузыри — полые, жидкие структуры, которые являются настолько легкими для их объема (из-за находящегося в них воздуха), что силы тяжести (необычно низкая в этом случае) и сопротивления воздуха (необычно высокая в этом случае) компенсируют друг друга. Мыльные пузыри поэтому дрейфуют по воздуху относительно медленно и имеют практически точную сферическую форму.

¹ Это авторский термин. У нас принято название «свободная поверхностная энергия», или «свободная энергия пограничного слоя», или просто — «свободная энергия». (Примеч. пер.)

Значительное количество жидкости склонно к равномерному сглаживанию. Потребность в уменьшении гравитационной потенциальной энергии стоит выше потребности в уменьшении поверхностной потенциальной энергии; поэтому поверхность стоящего в покое ведра воды (или водоёма с водой) кажется нам плоскостью. Фактически же это — сегмент сферы, но большой сферы, такой, которая имеет радиус, равный радиусу Земли. Посмотрите, как расположен Тихий океан на глобусе Земли, и вы увидите, что его поверхность почти сформировала полусферу.

Если энергия в любой форме добавляется к жидкостям, то некоторые из них умеют хорошо увеличивать поверхностную энергию, расширяя площадь своей поверхности за пределы ее минимума. Таким образом, ветер заставляет поверхность океана или озера стать неровной и поэтому увеличиться в площади. Поверхность в стакане воды будет пениться, если стакан взболтать.

Поскольку поверхность жидкости «растягивается» в большую, когда осуществляется такой ввод энергии, и потому, что она отступает к минимуму, когда ввод энергии прекращается, можно провести безошибочную аналогию между поверхностью жидкости и упругой оболочкой под растяжением (например, очень тонкая пленка из натянутой резины). Поэтому о поверхностных эффектах часто говорят как об эффектах, скорее вызванных «поверхностным натяжением», чем поверхностной энергией.

Те же самые силы сцепления, которые действуют, удерживая отдельные части жидкости через поверхностное натяжение, также удерживают части жидкости в контакте с частями соседствующего твердого тела. В этом, последнем, случае, когда сила притяжения скорее существует между твердым телом и жидкостью (не так, как между частицами), чем между частями жидкости (подобно частицам), такое явление называется «адгезией» (название это также, подобно когезии, происходит от латинских слов, означающих «сцепляться»). Силы прилипания (адгезии) могут быть столь же большими, как силы сцепления (когезии), или даже большими. В частности, адгезия воды к чистому стеклу — больше, чем когезия воды к самой себе.

Это вызывает эффект формы поверхности жидкости (воды) в стеклянном сосуде. В тех местах, где вода соприкасается со стеклом, притяжение воды к стеклу — достаточно большое, чтобы преодолеть силы сцепления воды. В результате поверхность воды повышается, чтобы в максимально возможной степени увеличить контакт на границе вода—стекло (или так на-

зываемую поверхность раздела) за счет более слабых «межмолекулярных» сил сцепления. Если бы не имелось никаких противодействующих сил, то вода бы повысилась до края сосуда и далее. Однако ей противодействует сила тяжести. Таким образом, существует некоторая точка, где вес поднятой воды, добавленный к силам сцепления воды, уравнивает досходящее натяжение «липких» сил, и эта точка равновесия достигается вскоре после того, как уровень жидкости поднимется на очень небольшой градус.

Если сосуд достаточно широк, то этот изгиб поверхности внутрь ограничен только окрестностями водно-стеклянного контакта. Водная же поверхность в середине остается плоской. Когда же сосуд относительно узкий, поверхность жидкости целиком находится в области водно-стеклянного контакта; в этом случае поверхность жидкости не имеет плоских участков, вместо этого она формирует полусферу, прогнутую в центре трубки к ее нижней части. При взгляде со стороны поверхность походит на полумесяц, и поэтому это явление называется «мениском» (*meniscus* — от греческого слова, означающего «маленькая луна»).

Силы сцепления во многих случаях также могут быть значительно больше, чем силы прилипания. Например, силы сцепления в жидкой ртути намного больше, чем у воды; они также больше, чем силы прилипания между ртутью и стеклом. Если мы посмотрим на ртуть, находящуюся в стеклянной трубке, то увидим, что на поверхности раздела, где ртуть встречается со стеклом, ртуть отталкивается от стекла, уменьшая ртутно-стеклянную поверхность раздела. Ртутный мениск в такой трубке прогибается вниз по границе со стеклом и достигает максимальной высоты в центре трубки. Тот же самый эффект наблюдается даже для воды, если стеклянный сосуд имеет восковое покрытие, так как силы прилипания между водой и воском — меньше, чем внутренние силы сцепления в воде.

Если мы нальем воду на плоскую стеклянную поверхность, то она распространится в разные стороны, превратившись в тонкую пленку, чтобы создать наибольший возможный контакт, увеличивая полную силу прилипания за счет более слабой силы сцепления. Вода, другими словами, смачивает стекло. Однако когда мы нальем на поверхность стекла ртуть (или воду на шероховатую поверхность), то она старается уменьшить контакт со стеклом, насколько это возможно, приобретая форму маленьких искривленных тяжестью сфер и увеличивая полную силу сцепления за счет более слабой силы прилипания. Ртуть не смачивает стекло, а вода не смачивает воск. Все эти явления являются результатом минимизации величины полной поверх-

ностной энергии (энергии на границе жидкость/воздух плюс то же самое, но на жидкой/твердой поверхности раздела).

Если присоединить достаточно тонкую трубку к резервуару с водой, то мы сможем увидеть значительное повышение уровня воды в трубке над ее «естественным уровнем», вызванное восходящей силой адгезии.

Мы можем вычислить, какой должна быть высота подъема (h) уровня воды в данной трубке. Адгезия — форма поверхностного натяжения (обозначим ее греческой буквой «сигма» — σ), действующая по окружности трубки, там, где вода соприкасается со стеклом. Эта окружность имеет длину $2\pi r$, где r — радиус трубки. Тогда суммарная подъемная сила, вызванная адгезией, равна поверхностному натяжению поверхности раздела вода—стекло, σ дин/см, умноженному на длину окружности, по которой происходит соприкосновение воды и стекла, то есть $2\pi r \sigma$ см, или, иными словами, полная сила равна $2\pi r \sigma$ дин.

Этой восходящей силе противодействует направленная вниз сила тяжести, которая равна весу (mg дин) поднятой воды. Масса водяного столба, поднятая адгезией, равна его объему (V), умноженному на плотность (d) воды. Подставляя Vd для m , мы получаем, что вес воды равен Vdg дин. Так как поднятый в трубке столбик воды имеет форму цилиндра, мы можем использовать геометрическую формулу для объема цилиндра и сказать, что объем поднятой воды равен высоте столбика воды (h), умноженной на площадь поперечного сечения трубки (πr^2), где r — радиус водяного столба. Заменив $\pi r^2 h$ на V , мы получаем, что вес воды равен $\pi r^2 h dg$ дин.

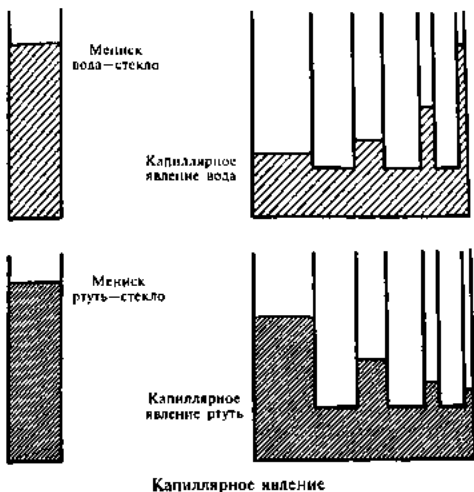
Как только вода в узкой трубке поднимется на свою максимальную высоту и остановится, восходящая сила прилипания будет сбалансирована нисходящей силой тяготения, так что мы можем написать следующее равенство:

$$2\pi r \sigma = \pi r^2 h dg. \quad (\text{Уравнение 9.4})$$

Решив данное уравнение для h , получаем:

$$h = \frac{2\sigma}{rdg}. \quad (\text{Уравнение 9.5})$$

Ускорение свободного падения (g) является фиксированной величиной для любой данной точки земной поверхности и для любой специфической жидкости, поверхностное натяжение (σ) и плотность (d) являются данными для специфических условий эксперимента. Важной переменной величиной является радиус трубки (r). Как вы видите, высота, на которую столб воды поднимается в узкой трубке, обратно пропорциональна



радиусу трубки. То есть чем уже трубка, тем на большую высоту поднимается жидкость. Следовательно, данный эффект наиболее ярко проявляет себя в трубках (естественных или искусственно созданных) микроскопической толщины. Такие трубки называются «капиллярными трубками» (от латинского выражения, означающего «похожие на волосы»), а повышение уровня водяного столба в таких трубках называется «капиллярным явлением». Именно благодаря капиллярному явлению вода поднимается по узким каналам куска сахара или впитывается промокательной бумагой и (в большой степени) благодаря капиллярному явлению жидкости поднимаются по стеблям и стволам растений.

Опять же, если мы знаем значение плотности данной жидкости и высоту подъема ее столба в трубке известного радиуса (и высоту и радиус мы легко можем измерить), то из этого следует, что поскольку значение g нам также известно, то мы всегда можем рассчитать из уравнения 9.5 значение величины поверхностного натяжения (σ).

В случае ртути, где силы прилипания к стеклу направлены вниз, уровень ее уходит ниже, чем «естественный уровень». Степень же понижения уровня увеличивается по мере уменьшения радиуса трубки.

Вязкость

Мы уже знакомы с понятием существования силы трения как силы, которая направлена против той, что вызывает движение твердого тела по другому твердому телу. Такое трение имеет тенденцию замедлять, а затем и совсем прекращать движение тела, если только действующая на него сила не будет постоянной.

В случае, когда твердое тело двигается сквозь жидкость, например, судно рассекает воду, тоже существует трение. Несмотря на то что вода кажется настолько гладкой и недостаточно прилипчивой, чтобы «ухватиться» за судно, судно, однажды приведенное в движение, быстро остановится, его энергия будет поглощена преодолением трения с водой, если толькодвигающая его сила не будет энергично поддерживаться.

Это трение является результатом следующего факта: для того чтобы «раздвинуть» воду на промежуток, необходимый для движения судна (или любого другого объекта), необходимо израсходовать энергию, направленную на преодоление ее собственных сил сцепления. Израсходованная энергия изменяется в зависимости от формы объекта, перемещающегося сквозь жидкость. Если жидкость «раздвигают» таким образом, что при этом образуются водовороты и другие неровности движения (называемые «турбулентностью»), израсходованная энергия умножается, и движение прекращается гораздо скорее; чтобы предотвратить остановку, двигающая сила должна быть в значительной мере увеличена. Если же, напротив, жидкость «раздвигают» постепенно, передним краем перемещающегося объекта, и позволяют ей сомкнуться сразу позади объекта, так что турбулентность снижена до минимума, израсходованная энергия значительно снижается, и сила, требующаяся для того, чтобы поддерживать движение, соответственно снижается. «Обтекаемая» форма тела — это такая форма, которая представляет собой гладко изогнутый, сужающийся фронт и резко сужающийся тыл — форма капли воды, падающей сквозь воздух, рыб, пингвинов, тюленей и китов, плывущих сквозь воду. Такая форма используется и в устройствах, сделанных человеком, тогда, когда требуется добиться максимально экономичного движения сквозь жидкую среду. Эта форма, необхо-

димая человеку, была получена методом проб и ошибок задолго до того, как было выдвинуто теоретическое обоснование всего процесса.

Величина трения между перемещающимся твердым телом и окружающей его жидкостью увеличивается вместе со скоростью. Таким образом, на тонущий объект действует ускорение силы тяжести, которое преодолевает сопротивление силы трения тела с водой. Однако в то время как скорости падения (а тонущее тело фактически «падает» сквозь воду) тела увеличивается, соответственно увеличивается и трение; сила же тяжести, конечно, остается постоянной. В конечном итоге сила сопротивления трения возрастает до такого значения, когда она компенсирует силу тяжести, а ускорение тогда становится равным нулю. Когда это происходит, тело начинает «проваливаться» в жидкость с постоянной «предельной» скоростью.

Мы сами не раз встречались с проявлением силы трения, возникающей при движении твердого тела сквозь жидкость. Любой, кто пробовал идти по пояс в воде, не может не чувствовать необычно большого потребления требуемой энергии и эффекта «замедленной съемки».

Трение проявляет себя даже тогда, когда сама жидкость — единственная вовлеченная в процесс сущность. Когда жидкость движется, она не перемещается «единым целым», как это делает твердое тело. Вместо этого данная часть жидкости будет перемещаться относительно соседней части, и «внутреннее трение» между этими двумя частями будет противостоять движению. Когда силы сцепления, которые являются источником этого внутреннего трения, низки, как в воде, мы обычно не очень ощущаем их. Когда же они высоки, как, например, в глицерине или в сахарном сиропе, жидкость льется медленно, так медленно, что мы, приученные к сравнительно быстрому водному потоку, обычно начинаем проявлять нетерпение. Внутреннее трение становится выше при низких температурах и меньше — при высоких температурах. Как говорят в народе: так медленно, как патока в январе (*as slow as molasses in January*) — это выражение ярко отражает нашу нетерпеливость.

О такой медленно наливающейся жидкости говорят как о «вязкой», от латинского слова *viscosity*, означающего липкую разновидность птичьего клея, который имеет такое свойство. Внутреннее трение, определяющее манеру, в которой будет литься жидкость, называется «вязкостью». Существуют жидкости, которые являются настолько вязкими, что силы тяжести недостаточно, чтобы заставить их литься потоком, преодолевая силы внутреннего трения. Стекло — образец такой жидкости;

ее вязкость такова, что оно, с обычной, ненаучной точки зрения, кажется нам твердым телом¹.

Чтобы рассмотреть измерение величины вязкости, представим себе два параллельных слоя жидкости, каждый из которых является прямоугольником площадью, равной a , и разделенных расстоянием, равным d . Чтобы заставить один из этих прямоугольников двигаться относительно другого со скоростью, равной v , преодолевая сопротивление внутреннего трения, потребуется сила, равная f . Оказывается, что связь между всеми этими величинами может быть выражена следующим уравнением:

$$\frac{fd}{a} = \eta, \quad (\text{Уравнение 9.6})$$

где η (греческая буква «эта») является постоянной величиной (константой) при данной температуре и представляет собой меру вязкости.

Единицу измерения вязкости мы можем вывести из уравнения 9.6. Выражение fd в числителе дроби в уравнении 9.6 представляет собой силу, умноженную на расстояние, то есть работу. Единица работы в системе СГС равна (дина-см) или $(\text{г}\cdot\text{см}^2/\text{с}^2)$. Выражение va в знаменателе дроби представляет собой объем $(\text{см}^3/\text{с})$, умноженный на площадь (квадратные сантиметры). Таким образом, мы получаем, что единицей измерения η поэтому является $(\text{см}^2/\text{с}) \times (\text{см}^2)$, или $\text{см}^4/\text{с}$.

Чтобы получить единицу вязкости в системе СГС, мы должны разделить единицы измерения fd на таковые va . Оказывается, что выражение $(\text{г}\cdot\text{см}^2/\text{с}^2)/(\text{см}^3/\text{с})$ можно при помощи обычного алгебраического преобразования привести к виду $\text{г}/\text{см}\cdot\text{с}$, или граммы на сантиметр в секунду. Один $\text{г}/\text{см}\cdot\text{с}$ назван «пуазом» в честь французского врача Жан-Луи-Мари Пуазейля (1799—1869), который в 1843 году был первым, кто произвел количественное изучение вязкости. (Как врач, он был прежде всего заинтересован перемещением хорошо нам известной вязкой жидкости — крови — по узким кровеносным сосудам.)

¹ Стекло не является твердым телом, несмотря на то что это кажется очевидным, доказательством этого является отсутствие некоторых характеристик, свойственных твердым телам. Стекло, например, не имеет кристаллической структуры или фиксированной точки плавления. Указанный случай стекла — достаточное свидетельство того, что различие между твердым телом и жидкостью не столь уж четко, как могло бы ожидать, исходя из наиболее общих примеров. Действительно, большинство различий в жизни и в науке — искусственно созданные человеческим соглашением и упрощения, приложенные к очень сложно организованной Вселенной; такие различия не могут не стать нечеткими, как только мы начинаем внимательно вникать во все детали.

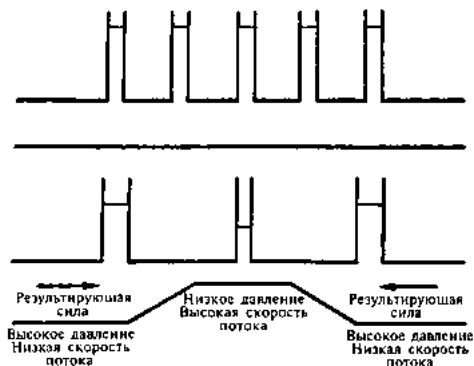
Поскольку пауз слишком велик, чтобы быть удобным, когда мы имеем дело с большинством жидкостей, то для удобства используют сантипауз (размером в одну сотую долю пауза) и даже миллипауз (размером в одну тысячную долю пауза). Таким образом, вязкость воды при комнатной температуре равна примерно одному сантипаузу. При той же самой температуре вязкость диэтилового эфира (обычный обезболивающий препарат) равна 0,23 сантипауза, или 2,3 миллипауза, в то время как вязкость глицерина равна приблизительно 1500 сантипаузам, или 15 паузам.

Движение жидкости оказывает влияние на ее давление. Вообразите столб воды, текущей через горизонтальную трубку некоего данного диаметра. Вода находится под давлением, иначе она бы не перемещалась, и давление (сила на единицу площади) — одно и то же во всех точках, поскольку вода течет с одной и той же скоростью во всех пунктах. Это можно продемонстрировать, если проткнуть трубку через некоторые интервалы и вставить в каждое отверстие еще одну трубку. В каждой трубке вода поднимется на один и тот же уровень.

Но предположим, что трубка имеет в середине некую сжатую область. Тот же самый объем воды был бы должен пройти через сжатую область за то же самое время, что и через равную длину несжатой области. Если бы этого не было, то вода накопилась бы на входе в сжатую область, чего, конечно, не происходит. (Если бы сжатие было достаточно узкое, чтобы перекрыть поток в целом, то поток бы остановился, и объем воды, проходящей через данное сечение, был бы равен 0 см³/с — одинаково в сжатых и несжатых областях.)

Но для того чтобы один и тот же объем воды прошел через сжатые и несжатые области за данное время, поток воды должен быть более быстрым при прохождении через сжатую область (подобно тому, как широкая, медленно текущая река становится бурным потоком при прохождении через узкое ущелье). Так как при прохождении через узкую область скорость воды увеличивается, это показывает на ускорение и соответственно это должно быть вызвано силой. Мы можем достаточно легко найти такую силу, основываясь на разности в давлении. Если давление в несжатой части больше, чем в сжатой части, то имеется результирующая сила, направленная от несжатой части (высокое давление) к сжатой части (низкое давление), и жидкость действительно ускоряется в то время, как входит в сжатие.

Далее, когда жидкость оставляет сжатие и входит в новую несжатую область, ее скорость снова должна уменьшиться. Это



Принцип Бернулли

снова показывает на ускорение, а значит, чтобы вызвать такое замедление скорости, должна существовать сила, направленная против потока. Однако поскольку новая несжатая область снова является областью высокого давления, такую силу можно выявить.

Короче говоря, все это можно выразить в виде некоего важного обобщения, что давление жидкости (или жидкость вообще) падает по мере увеличения ее скорости. Это называется принципом Бернулли, названным так в честь швейцарского математика Даниила Бернулли (1700—1782), который был первым, кто изучил данное явление в 1738 году и кто при изучении данного феномена изобрел термин «гидродинамика».

Глава 10

ГАЗЫ

Плотность

Свойства жидкости, описанные в предыдущей главе, являются весьма важными в связи с фундаментальным вопросом рассмотрения структуры строения материи — вопросом, который больше всего волновал ученых уже во времена древних греков.

Насколько можно видеть невооруженным глазом, материя может быть разделена на части неопределенное количество раз. Частица бумаги может быть порвана пополам, на четверть, на восемь частей — и все еще оставаться бумагой. Капля воды может быть разделена на две меньшие капли или на четыре еще меньшие капли — и все еще оставаться водой. Может ли такое деление продолжаться вечно? Действительно ли материя непрерывна даже в своей окончательной микрости? Так как не имелось никакой технической возможности, при помощи которой древние мыслители могли бы проверить это практическим путем, они обратились к логическим аргументам, основанным на том, что они считали первыми принципами.

Некоторые философы, особенно Демокрит из Абдерры (V столетие до н. э.), поддерживали ту точку зрения, что материя не может быть разделена вечно навсегда, что в конечном счете можно достигнуть некоторой очень маленькой части, которую уже невозможно будет далее разделить. Такую частицу материи он назвал «атомос» (в буквальном переводе — «неделимая часть»), и теперь мы говорим о его взглядах, что они представляют «атомизм», или «теорию атома».

Другие греческие философы, особенно Аристотель, приволили доводы против этого понятия, однако приведенные против атомистической идеи контрдоводы кажутся нам нелогичными. Но, вообще говоря, неатомистическое представление о материи добилось успеха и оставалось в среде ученых преобладающим мнением в течение двух тысяч лет.

Если мы ограничимся изучением свойств твердых тел, то вполне можно принять аристотелевское представление о материи, потому что, когда разговор идет о твердом теле, мы не видим никаких признаков чего-либо, что заставляло бы нас сделать логический вывод о том, что оно состоит из скопления мелких частиц. Больше того, если бы это было так, то мы должны бы были предположить, что частицы твердого тела крепко связаны между собой, потому что все твердые тела ведут себя «как одно целое». Ну а если мы предполагаем, что частицы твердого тела так крепко связаны между собой, то почему бы нам не отказаться от теории существования мелких частиц в целом и не сделать вывод о том, что твердое тело в первую очередь представляет собой единую часть непрерывной материи?

Совершенно другая ситуация возникает в случае, когда мы рассматриваем жидкости. Сам факт того, что жидкости не двигаются «как одно целое», уже заставляет нас предположить, что они могут состоять из отдельных частиц. Масса крошечных металлических опилок или куча порошка тоже примут форму

любого сосуда, в который их поместить, и, если мы наклоним сосуд, они будут «литься» так, как это делала бы жидкость. Если бы частицы были достаточно липкие, то они «слились» бы подобно вязкой жидкости.

Фактически многие свойства жидкостей можно было бы легко объяснить, если предположить, что они состоят из субмикроскопических частиц, которые каким-либо образом притягивают друг друга. Например, таким образом можно было бы объяснить поверхностное натяжение.

Однако те свойства жидкостей, которые заставляют нас предположить в них явление атомизма, с большей вероятностью, чем в твердых телах, становятся еще более усиленными в газах. И фактически именно изучение газов, которым активно занимались ученые в XVII и XVIII столетиях, наконец вынудило ученых полностью изменить свое раннее решение, принятое в пользу Аристотеля, и снова, уже в начале XIX столетия, отдать предпочтение незаслуженно отвергнутому представлению Демокрита.

Наиболее ясное и очевидное отличие газов от жидкостей — их плотность. По сравнению с жидкостями газы менее плотные — более разреженные.

В английской системе измерений плотность воды равна 62,43 фунта на один кубический фут. Если мы используем метрические единицы измерения, то это — один грамм на кубический сантиметр (1 г/см^3)¹ в системе СГС и десять килограммов на кубический метр (10 кг/м^3) в системе МКС. Наименее плотная жидкость, которая существует при комнатной температуре или ниже, — жидкий водород, в то время как самой плотной является ртуть. Первая имеет плотность $0,07 \text{ г/см}^3$, а последняя обладает плотностью, равной $13,546 \text{ г/см}^3$. (При повышенной температуре некоторые металлы, такие как платина, плавятся, превращаясь в жидкости с плотностью, достигающей 20 г/см^3 .)

Плотности твердых тел попадают также главным образом в пределы этого диапазона. Самое легкое из твердых тел — твердый водород — имеет плотность $0,08 \text{ г/см}^3$, в то время как самый тяжелый — металлический осмий — имеет плотность, равную $22,48 \text{ г/см}^3$.

Такие плотности также характеризуют при помощи «удельного веса» тела — термина, возникшего еще в Средневековье. Удельный вес может быть определен как отношение плотности вещества к плотности воды. Другими словами, если плотность

¹ Это не совпадение. При введении метрической системы в 1790 году французские ученые определили грамм как вес одного кубического сантиметра воды при постоянных, установленных температурных условиях.

ртути равна $13,546 \text{ г/см}^3$, а плотность воды — 1 г/см^3 , то удельный вес ртути равен $(13,546 \text{ г/см}^3)/(1 \text{ г/см}^3)$, или 13,546.

Поскольку плотность воды равна 1 г/см^3 , удельный вес тела получается численно равным плотности в системе СГС, но не следует вводить себя в заблуждение этим очевидным равенством, поскольку в единицах измерения содержится важная разница. При делении плотности на плотность единицы измерения (г/см^3 , в случае, рассматриваемом в предыдущем параграфе) сокращаются, поэтому значение для удельного веса является безразмерным, то есть просто числом.

Единицы измерения сокращаются при расчете удельного веса независимо от того, какая система единиц измерения используется для выражения плотности. В системе МКС плотность ртути и воды равна соответственно $135,46 \text{ кг/м}^3$ и 10 кг/м^3 . Решив это отношение, мы получаем, что удельный вес ртути, как и прежде, равен 13,546. В английской системе единиц измерения плотность ртути и воды равна 845,67 фунта на кубический фут и 62,43 фунта на кубический фут, а их отношение по-прежнему равно 13,546.

Именно этим и удобны безразмерные величины — они универсально используются с любыми системами единиц измерения.

Удельный вес газов намного меньше, чем жидкостей или твердых тел. Наиболее часто встречающийся газ — воздух — имеет удельный вес, равный при нормальных условиях 0,0013. Самый легкий газ — водород — имеет при нормальных условиях удельный вес, равный 0,00009. Примером очень плотного газа является вещество под названием «гексафторид урана», который при нормальных условиях является жидкостью, но если его слегка нагреть, то он переходит в газообразную форму с удельным весом, равным 0,031.

Таким образом, при нормальных условиях даже самые плотные газы обладают вдвое меньшей плотностью, чем наименее плотные жидкости или твердые тела, в то время как обычный газ, типа воздуха, имеет плотность, равную только $1/790$ плотности наиболее обычной жидкости, типа воды, и только $1/2000$ плотности наиболее обычных твердых тел, типа камней, составляющих поверхность Земли.

Давление в газах

Газы обладают всеми свойствами жидкости, но в уменьшенной степени, как и могло бы ожидать, принимая во внимание разницу в их плотности. Например, газы оказывают давлe-

ние так же, как это делают жидкости, но для данной высоты столба газа давление значительно меньше, чем таковое для водяного столба той же высоты. Столб воздуха высотой в метр создаст давление на основание, равное всего лишь $\frac{1}{100}$ давления такого же, метрового, водяного столба.

Однако мы живем на дне океана воздуха высотой во много миль. Его давление должно быть значительно, и это действительно так; давление воздуха эквивалентно давлению, которое произвел бы водяной столб высотой в десять метров. Впервые это давление было измерено итальянским физиком Эванджелистой Торричелли (1608—1647) в 1644 году.

Торричелли взял длинную трубку, закрытую с одного конца, и наполнил ее ртутью. Затем он перевернул ее вверх ногами, опустив открытый конец в чашку с ртутью. Под воздействием направленной вниз силы тяжести ртуть частично вылилась из трубки. Однако на поверхность ртути в чашке действовало давление атмосферы, представлявшее собой противосилу. Это давление было передано во всех направлениях, в пределах тела ртути (согласно принципу Паскаля), включая давление вверх ртути, находящейся в трубке.

По мере того как ртуть выливалась из трубки, масса ртутного столба и поэтому величина давления, вызванного силой тяжести, уменьшалась, пока оно просто не сравнялось с силой восходящего давления, вызванного давлением атмосферы на поверхность ртути в чашке. В этой точке силы уравновесились, а значит, ртуть больше не перемещалась. Столб ртути, который остался, выдерживал давление (из-за своего веса), равное давлению атмосферы (из-за ее веса). Полный вес атмосферы, конечно, во много миллионов раз больше, чем полный вес ртути, но нас здесь, как вы помните, больше всего интересует давление на единицу площади.

Оказывается, что давление атмосферы на уровне моря равно таковому ртутного столба высотой примерно 30 дюймов (или 76 сантиметров); Торричелли, в действительности, изобрел барометр. Атмосферное давление часто измеряется, особенно метеорологами, в дюймах ртутного столба или в сантиметрах ртутного столба, обычно сокращенно пишут «in Hg» или «см Hg» соответственно¹. Естественно было установить, что 30 in Hg, или 76 см Hg, равняется одной «атмосфере». Миллиметр ртутного столба (мм Hg) был назван в честь великого физика «1 торричелли», так что можно сказать, что одна атмосфера равна 760 торричелли.

¹ Hg — этим химическим символом обозначается ртуть.

Атмосферное давление может быть измерено так же, как давление веса на площадь поверхности. В таком случае нормальное атмосферное давление на уровне моря равно 14,7 фунта веса на квадратный дюйм, или 1033 грамма веса на квадратный сантиметр ($g(w)/cm^2$). Выраженная в более формальных единицах измерения силы, действующей на площадь, одна атмосфера равна 1 013 300 дин/ cm^2 . Было принято считать один миллион дин на квадратный сантиметр равным одному бару (от греческого слова, обозначающего «тяжелый»), таким образом, получается, что одна атмосфера равна 10 133 барам.

Вполне естественно, что если именно давление атмосферы балансирует давление ртутного столба, то, когда любой человек, несущий в руках барометр, поднимается, скажем, в гору, высота ртутного столба должна уменьшиться. По мере подъема по крайней мере часть атмосферы становится ниже уровня барометра, а высота оставшейся выше барометра атмосферы становится все меньше и меньше. Вес оставшейся атмосферы соответственно становится все меньше и меньше, поэтому его давление становится более низким, как и то, что давит на ртутный столбик и которое он балансирует.

Это утверждение было практически проверено Паскалем в 1658 году. Он послал своего родственника на соседнюю возвышенность с барометром в руке. На высоте в один километр высота ртутного столба понизилась на десять процентов, с 76 до 68 сантиметров.

Кроме того, атмосфера Земли распределена вокруг нее неравномерно. Движения воздушных масс, которые вызваны неравномерностью их прогрева, приводят к тому, что в одном месте накапливается большее количество атмосферного воздуха, а в другом соответственно меньше. Снимая показания барометра, находящегося на уровне моря, мы можем получить и такое «высокое» давление, как 31 in Hg, и такое «низкое», как 29 in Hg. (В центре урагана давление может быть даже еще ниже, вплоть до 27 in Hg.) Эти «высоты» и «понижения» давления в основном путешествуют с запада на восток по земному шару, а потому мы можем использовать их движение для того, чтобы предсказывать погоду. Прибытие областей высокого давления (повышающийся барометр) обычно означает хорошую погоду, в то время как прибытие областей низкого давления (падающий барометр), как правило, обещает ухудшение погоды, бури и штормы.

Несмотря на то что на каждый дюйм поверхности человеческого тела давит вес в 14,7 фунта, человечество, привыкшее к этому давлению с самого своего рождения, не замечает его. В

течение тысячелетий люди полагали, что воздух — невесомый. (До сих пор мы все еще говорим «легкий как воздух» или «легкий, воздушный» или «надутый» в смысле «наполненный ничем».)

Причиной этого является то, что воздух прикладывает свое давление во всех направлениях, как это делают и все жидкости. Пустой воздушный шар, несмотря на то что на него давит воздух высотой во много миль, не сомнется, если развязать его, потому что давление воздуха внутри его и давление снаружи — равны. «Откачайте» ртом давление внутри шара так, чтобы давление внутри его было меньше, чем давление снаружи, и тогда его стенки сомнутся. Теперь шар больше не расправлен — его стенки плотно сжаты.

Точно такое же явление происходит и с людьми. Воздух в наших легких, кровь в наших венах, жидкость, которой насыщены наши тела (а живая ткань — это, по существу, плотная, вязкая жидкость), находятся под действием атмосферного давления и создают внутреннее давление в теле, которое направлено наружу и равно давлению атмосферы, направленному внутрь. Суммарное же давление, приложенное к нам, равно нулю, и поэтому мы его не ощущаем и не чувствуем веса давящего на нас воздуха.

Если же мы погрузимся в воду, то давление извне быстро увеличится, а это не может быть скомпенсировано давлением изнутри нашего тела без нанесения ущерба нашим тканям. По этой причине не защищенный ничем, кроме водолазного костюма, человек может проникнуть только на строго ограниченную глубину, независимо от того, настолько хорошо он снабжается кислородом. С другой стороны, живые формы, приспособленные к жизни на глубине, существуют в самых экстремальных безднах океана, там, где водяное давление превышает тысячу атмосфер. Эти формы жизни также не сознают огромного давления (поскольку оно сбалансировано снаружи и изнутри), которое оказывается на них, и также беспрепятственно перемешаются, как это делаем мы, не замечающие давления воздуха.

Как только было признано, что воздух имеет вес и способен создавать давление, было также быстро признано, что это можно легко продемонстрировать, если обеспечить разность давлений снаружи и изнутри. Другими словами, казалось, что возможно полностью удалить воздух изнутри сосуда, создав там «вакуум» (латинское слово, означающее «пустой»), так чтобы атмосферное давление извне осталось не уравновешенным каким-либо заметным давлением изнутри. Торричелли получил (по случайной неосторожности) первый искусственно создан-

ный вакуум, когда он перевернул вверх ногами свою трубку с ртутью. Ртутный столбик, который выливался в чашку, оставлял после себя небольшой объем «ничего» (если не считать небольших завихрений паров ртути): это явление до сих пор называется «Торричеллиева пустота».

Всего на несколько лет позже, в 1650 году, немецкий физик Отто фон Герике (1602—1686) изобрел механическое устройство, которое постепенно отсасывало воздух из контейнера. Это позволило ему по желанию формировать вакуум различной требуемой величины и демонстрировать эффекты неуравновешенного атмосферного давления. Он создал такое разрежение, что внешнее атмосферное давление удержало от расщепления два металлических полушария, которые пытались разорвать две упряжки по восемь лошадей, прицепленные к полушариям канатами и подгоняемые кнутами возниц. Когда доступ воздуха в полость, образованную полушариями, был открыт, они развалились на части просто под действием собственного веса.

Еще один показательный опыт состоял в том, что пятьдесят человек тщетно пытались удержать канат, привязанный к поршню, который под действием атмосферного давления входил в цилиндр, из которого выкачивали воздух.

В других отношениях газ, подобно воздуху, также проявляет свойства жидкостей, только в уменьшенной форме. Например, это показывает явление плавучести. Сами мы перемещаем объем воздуха, который равняется нашему собственному объему, а эффект плавучести позволяет человеку весом в 150 фунтов весить приблизительно на три унции меньше, чем он был бы, находясь в вакууме. Конечно, этого обычно недостаточно, чтобы стать очень заметным, но для объектов, обладающих очень низким удельным весом, такой эффект очень значимый.

Это особенно истинно для веществ (типа некоторых газов), которые легче воздуха. Газообразный водород, например, имеет только $\frac{1}{14}$ плотности воздуха. Если заключить водород в пределы некоего сосуда, то он будет подвергнут действию некоторой восходящей силы, подобно тому как на кусок древесины, погруженной в воду, действует выталкивающая сила. Если сосуд достаточно легкий, то он будет поднят вверх действием этой восходящей силы. И если взять достаточное количество водорода, то этой силы хватит, чтобы поднять вверх прикрепленную к контейнеру гондолу, содержащую инструменты или даже людей. Впервые такой «воздушный шар» был запущен во Франции в 1783 году.

В тех случаях, когда между газом и твердым телом существует относительное движение, возникает и трение, так же как это

происходит при движении твердого тела в жидкости, хотя и снова возникающий эффект намного меньше, чем тот, который возникает при движении в жидкости. Однако трения твердого тела о газ («сопротивления воздуха») вполне достаточно, чтобы замедлить скорость снаряда, летящего в цель, и артиллерист должен скорректировать свой прицел с учетом такого явления. Сопротивление воздуха также препятствует полному и точному обмену кинетической и потенциальной энергией, рассеивая часть энергии в виде теплоты.

Направленная вниз сила поля тяготения пропорциональна полной массе тела, в то время как восходящая сила сопротивления воздуха пропорциональна области контакта перемещающегося тела с воздухом в направлении его движения. Для компактного и относительно тяжелого тела, типа камня, кирпича или глыбы металла, сила тяжести высока, в то время как контакт с воздухом достаточно мал из-за того, что область, по которой оно контактирует с воздухом, достаточно ограничена; поэтому сопротивление воздуха также достаточно низкое. Когда мы рассматриваем такой тип движения, как это делал Галилео во время своих экспериментов, то можно сказать, что оно по характеристикам достаточно близко к движению в вакууме, поэтому заключения, которые сделал Галилео из своих экспериментов, достоверны.

Если же мы рассмотрим легкие тела, то для них сила тяготения относительно невелика. Если же такие тела являются еще и тонкими и плоскими (например, как листья или перья), то они подставляют воздуху относительно большую площадь поверхности контакта, и сопротивление воздуха приобретает относительно высокое значение. В таких случаях сопротивление воздуха почти компенсирует силу тяжести, и поэтому эти легкие тела падают медленно (в вакууме они падали бы быстро); эта медленная скорость падения и ввела в заблуждение древнегреческих философов, наблюдавших за ней, заставив поверить в то, что между весом тела и скоростью свободного падения имеется тесная взаимосвязь.

При движении тела сквозь воздух под действием силы тяжести имеется некая предельная скорость, так как сопротивление воздуха не остается постоянным, а увеличивается вместе с увеличением скорости движения объекта. По мере увеличения скорости сопротивление воздуха в конце концов компенсирует силу тяжести. Для тяжелых, компактных объектов эта предельная скорость очень высока, но для легких, плоских объектов ее значение весьма невелико. Снежинки быстро достигают своей низкой предельной скорости и в дальнейшем несколько не ус-

коряются, хотя они падают много миль. Если компактный объект прикреплен к легкому и плоскому, то эти два объекта вместе достигают гораздо более низкой предельной скорости, чем это было бы, если бы компактный объект падал в одиночку; вот именно поэтому парашют делает возможным благополучное падение с весьма больших высот.

И снова, для газов, как и для жидкостей, действует эффект Бернулли, и величина давления воздуха снижается по мере увеличения скорости перемещения воздуха. Струя воздуха, направленная поперек отверстия, охватывает это отверстие областью низкого давления («частичный вакуум»). Если трубка, в отверстии которой возникает это падение давления, связана с жидкостью, находящейся под нормальным атмосферным давлением, то эта жидкость будет втянута в трубку и выйдет наружу в виде мелких распыленных капель¹.

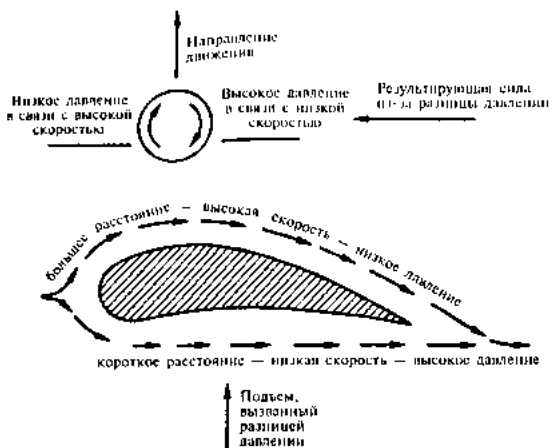
Когда бейсбольный мяч или мяч для гольфа летит, вращаясь, сквозь воздух, то одна сторона его вращается вместе с движением воздуха, текущего мимо мяча во время движения; другая же сторона мяча вращается против этого движения. Сторона, которая крутится против движения, имеет большую скорость относительно воздуха, и сопротивление воздуха в этом направлении, меньше. Шар бросают в направлении более низкого давления, так чтобы бейсбольный мяч «изогнулся» во время своего полета (чего обычно и добивается питчер², бросающий мяч), в то время как мяч для гольфа «идет крючком» или «мажет» (что обычно нежелательно).

В тех случаях, когда нам необходимо поддерживать высокую скорость движения сквозь воздух с использованием минимума силы, большое значение приобретает обтекаемость тела. Важность этого увеличивается одновременно с увеличением скорости, потому что сопротивление воздуха также увеличивается. Таким образом, лошадь и фургон не требуют никакой обтекаемости, автомобили же требуют ее в малой степени. (Тенденция к созданию автомобиля с абсолютно обтекаемой формой, появившаяся в конце 1930-х годов, была скорее вопросом подачи формы, а не предметом необходимости и вскоре была оставлена.)

Однако когда разговор касается самолетов, вопрос об обтекаемости приобретает первостепенное значение, а при достижении сверхзвуковых скоростей в первую очередь происходит

¹ Этот эффект называется «эффектом карбюратора», и именно на нем построены все карбюраторы, работающие в двигателях внутреннего сгорания. (Примеч. пер.)

² П и т ч е р — в бейсболе игрок, бросающий мяч. (Примеч. пер.)



Эффект Бернулли в газах

развитие не столько мощности тяги, сколько надлежащего изменения формы для уменьшения сопротивления воздуха. Больше того, крылья самолета (в свою очередь, обтекаемые) разработаны таким образом, чтобы воздух проходил большее расстояние над верхней частью крыла, чем под нижней, и поэтому скорость его движения над крылом больше, чем под крылом. В соответствии с принципом Бернулли это означает, что над крылом самолета получается меньшее давление воздуха, чем под ним, а это вызывает возникновение «подъемной силы», которая помогает поддержать самолет в воздухе.

Закон Бойля

Свойства газов имеют принципиальную важность при рассмотрении возможной атомистической природы материи. Если материя неатомна, то вариации в плотности должны быть вызваны непосредственно свойствами только ей различиями в самой материи. Однако каждая частица этой материи, сколь

малой бы она ни была, должна быть столь же плотной, как и любая другая частица. В материи не может существовать ни пустот, ни отверстий, как это будет в случае, если материя состоит из атомов.

Если материя состоит из атомов, то между ними имелось бы пространство, содержащее только вакуум. Материю можно было бы сделать менее плотной, если каким-либо образом растянуть атомы в разные стороны, чтобы увеличить пропорциональное содержание пустот в пределах данного объема. И наоборот, материю можно было бы сделать более плотной, сдвигая атомы вместе и, таким образом, уменьшая пропорциональное содержание в ней пустот.

Действительно, могло бы показаться, что плотность данной некоторой материи можно изменить таким образом при помощи нагрева или охлаждения. Плотность обычно уменьшается при нагревании и увеличивается при охлаждении. Действительно, хотя плотность холодной воды равна 1 г/см^3 , плотность такой же, но горячей воды равна всего лишь приблизительно $0,96 \text{ г/см}^3$.

Опять же твердые тела, если их достаточно нагреть, в расплавленном виде превращаются в жидкости, а жидкости снова становятся твердыми телами, будучи охлаждены. Это изменение в «состоянии материи» сопровождается внезапным изменением в плотности. Таким образом, лед имеет плотность $0,92 \text{ г/см}^3$, но, как только мы расплавим его, он превращается в воду с резким увеличением плотности — до $1,00 \text{ г/см}^3$. И снова твердое железо имеет плотность $7,8 \text{ г/см}^3$, но она резко уменьшается, когда железо расплавлено и перешло в жидкую форму, которая имеет плотность всего лишь $6,9 \text{ г/см}^3$. Ученый-атомист мог бы указать на то, что существует готовое объяснение этого эффекта — в одном состоянии вещества, составляющие его атомы, являются более компактными, чем в другом. (Согласитесь, обычно твердое тело обладает большей плотностью, вода является собой довольно любопытное исключение.)

Однако во всех таких изменениях плотность меняется только на несколько процентов, а это не слишком убедительно. Против атомиста работает и тот факт, что жидкости и твердые тела являются относительно несжимаемыми. Требуется большое увеличение давления (достижимое только при помощи специального оборудования), чтобы вызвать даже маленькое уменьшение в объеме. По этой причине в обычной материи не может существовать значимого количества пустот между атомами, и даже атомисты вынуждены признать, что в жидкостях и твердых телах атомы, если они существуют, находятся в непосред-

ственном контакте. Так как жидкости и твердые тела остаются несжимаемыми при любой температуре, то мнение о том, что атомы находятся на больших расстояниях в горячей воде по сравнению с холодной или в жидком железе по сравнению с твердым, скорее всего, неправильное. Если бы оно не было неправильно, то горячая вода и жидкое железо были бы, по крайней мере, умеренно сжимаемы, а они не ведут себя таким образом.

Однако совсем другое дело получается, когда разговор переходит от жидкостей и твердых тел к газам. Когда жидкая вода закипает и формируется газообразный пар, изменение в плотности — разительное и радикальное. В то время как вода в точке кипения имеет плотность $0,96 \text{ г/см}^3$, пар при той же самой температуре имеет плотность не более чем $0,0006 \text{ г/см}^3$. То есть пар имеет плотность, равную всего лишь $1/1,500$ плотности воды.

Этому можно найти разумное объяснение с точки зрения атомистического представления о материи. Можно предположить, что составляющие воду атомы (или группы атомов) отдаляются на значительное расстояние при переходе воды из жидкого состояния в газообразный пар, и пар имеет столь низкую плотность, так как состоит главным образом из пустот между атомами. Мы могли бы обобщить это представление и сказать: принимая во внимание, что в жидкостях и твердых телах атомы находятся фактически в тесном контакте, то в газах они находятся далеко друг от друга. Такое расположение атомов частиц газа объяснило бы не только чрезвычайно низкую плотность газов, но также и их низкое давление, небольшие силы трения и так далее.

Если это атомистическое представление верно и если частицы газа широко распространены, то газы должны быть легко сжимаемы. То есть если приложить к данному объему газа давление, то этот объем должен значительно уменьшиться. Это действительно так, и этот факт был впервые представлен научному сообществу английским физиком Робертом Бойлем (1627—1691) в 1660 году.

Он налил ртуть в открытый длинный конец J-образной трубки и запер некоторое количество воздуха в закрытом коротком конце. Добавляя дополнительное количество ртути, он повышал давление на запертый воздух на величину, которую мог измерить через разность между высотой ртути в открытом и закрытом концах. Он обнаружил, что удвоение давления на запертый газ вдвое уменьшало его объем, утраивание давления приводило к тройному уменьшению объема и так далее.

Запертый газ был всегда способен поддерживать ртутный столб, находившийся с другой стороны, и, как только его

объем уменьшался на соответствующее количество, давление, создаваемое им, становилось равным давлению, приложенному к нему. (Это и должно ожидаться вследствие третьего закона Ньютона, который, однако, во времена Бойля еще не был провозглашен.)

Следовательно, мы можем сказать, что для данного количества газа давление (P) обратно пропорционально объему (V); таким образом, увеличение любого из них ведет к уменьшению другого ($P = k/V$), поэтому произведение этих двух величин остается постоянным:

$$PV = k. \quad (\text{Уравнение 10.1})$$

Это уравнение называется законом Бойля¹.

Другая формулировка закона Бойля приводится ниже. Предположим, что вы имеете образец газа с давлением, равным P_1 , и объемом, равным V_1 . Если вы изменяете давление, увеличивая или уменьшая его, до значения, равного P_2 , то вы обнаружите, что объем газа автоматически изменяется до значения, равного V_2 . Однако согласно уравнению 10.1 произведение давления на объем должно остаться константой, так что мы можем сказать, что для данного количества газа:

$$P_1V_1 = P_2V_2. \quad (\text{Уравнение 10.2})$$

И это также является формулировкой закона Бойля.

Действительно, газ так легко сжать, что давление верхних слоев столба газа сожмет более низкие слои. В отличие от столба фактически несжимаемой жидкости, который имеет постоянную плотность повсюду, столб газа значительно изменяется по плотности на разной высоте. Это особенно заметно при рассмотрении непосредственно нашей атмосферы.

Если бы газ был несжимаем как жидкость и если бы его плотность была одинаковой по всей высоте столба газа, равной, скажем, плотности на уровне моря, было бы достаточно легко подсчитать, чему же равна высота нашей атмосферы. Атмосферное давление равно 1033,2 грамма веса на квадратный сантиметр. Это означает, что столб газа с поперечным сечением в один квадратный сантиметр и длиной до конца атмосферы весит 1033,2 грамма. Столб с таким поперечным сечением, но только высотой в один сантиметр имеет вес 1,3 миллиграмма. Каждое дополнительное увеличение высоты столба на один сантиметр добавило бы дополнительные 1,3 миллиграмма, то есть потребуется суммарная

¹ Закон Бойля, как выяснилось, только аппроксимация, но это очень полезная аппроксимация и в случае некоторых газов очень близкая к истине.

высота приблизительно в 800 000 сантиметров, чтобы обеспечить эти 1033,2 грамма атмосферного давления. Это — высота примерно в пять миль.

Однако это не может быть правдой, потому что воздушные шары поднимаются на высоту более чем 20 миль, а менее прямые методы измерения показали существование заметного количества воздуха на высотах более чем в 100 миль.

Все дело в том, что атмосфера обладает непостоянной плотностью. По мере продвижения вверх обнаруживается, что данное количество газа находится под меньшим давлением, потому что количество воздуха выше этого уровня стало меньше. Если следовать закону Бойля, то данное количество газа должно поэтому занимать больший объем. Следовательно, по мере повышения количество атмосферы, остающейся выше точки нашего измерения, одновременно с быстрым уменьшением в весе достаточно медленно уменьшается в объеме. По этой причине действительно атмосфера не имеет никакого четко определенного верхнего предела, но постепенно уменьшается на протяжении сотен миль от поверхности Земли, уменьшаясь в плотности, пока не превратится в неслышно тонкие струйки газа, которые составляют межпланетное пространство.

Начав свой рассказ с атомистической теории, я пробовал сделать абсолютно ясным важность и значение эксперимента Бойля. Однако не следует предполагать, что один эксперимент сразу склонил мировое научное мнение к атомизму. Только в первые десятилетия XIX столетия, через полтора века после эксперимента Бойля, скопился такой вес свидетельств очевидности этой теории, что ученые наконец не смогли уже больше избегать понятия «атомизм».

Когда говорят об окончательном установлении атомизма, обычно называют имя английского химика Джона Дальтона (1776—1844), который между 1803-м и 1808 годами, основываясь в основном на своем изучении свойств газов, в которых он оттолкнулся от экспериментов Бойля, детально разработал «современную атомную теорию». (На самом деле можно сказать, что сам закон Бойля призвал атомизм к жизни, а все, что было после него, всего лишь способствовало более красивой подаче этой теории.)

В наше время повсеместно признано, что вся материя состоит из атомов, что эти атомы могут существовать в одиночку, но более часто они находятся в группах, размером от двух до многих сотен и тысяч атомов, что эти группы атомов называются «молекулами», что эти молекулы при нормальных

условиях идентичны и составляют то, что мы называем «частницами материи»¹.

Именно благодаря исследованиям свойств газов было выяснено, что они состоят из широко расставленных молекул (а точнее — из широко расставленных индивидуальных атомов), а это дало возможность посмотреть на такие физические явления, как звук и тепло, с другой и более фундаментальной точки зрения.

Глава II

ЗВУК

Волны в жидкостях

Жидкости могут двигаться различными способами, подобными тем, которыми движутся твердые тела. Они могут подвергаться поступательному движению, как это делают текущие реки или дующие ветра. Они могут подвергаться вращательному движению, как это делают водовороты или торнадо. Наконец, они могут быть подвергнуты колебательному движению. Вот это, последнее, мы сейчас и будем рассматривать, поскольку вибрация в жидкостях может создавать изменение формы, которое будет направлено изнутри тела наружу. Такое перемещающееся изменение формы называется «волна». Несмотря на то что волны можно создать и в твердых телах, наиболее ясно видимы и заметны они на поверхностях жидкостей. Наши далекие доисторические предки были прекрасно знакомы с волнами на поверхностях воды и научились их бояться.

Если бросить камень в середину спокойного водоема, то вес камня толкает вниз воду, с которой он вступил в контакт, и создает понижение уровня воды в этом месте. Вода фактически несжимаема, так что воде, которая идет вниз, необходимо место, чтобы «отступить». Это можно сделать только одним способом: поднятием воды в непосредственной близости от брошенного камня, поэтому центральное понижение всегда окружено кольцом приподнятой воды.

Кольцо приподнятой воды опускается назад под воздействием силы тяжести, и его вес действует подобно весу первоначально брошенного камня. Оно перемещает воду ниже себя вниз и

¹ При определенных условиях молекулы различаются по своей природе, а атомы изменяют свои комбинации и расположение на новые. Эти изменения в структуре и расположении атомов в молекулах являются предметом изучения науки, называемой «химия».

«выбрасывает» вверх более широкое кольцо воды немного дальше от первоначального центра возмущения.

По мере того как это продолжается, кольцо приподнятой воды расходится все дальше и дальше от центра. По мере перемещения все дальше и дальше наружу полная масса приподнятой воды распространяется по все большей и большей окружности, а высота приподнятого кольца поэтому становится все меньше и меньше.

Но при этом из центра возмущения не выходит одна-единственная волна. Поскольку начальный вал приподнятой воды немедленно опускается относительно центра возмущения, это не только выталкивает вал воды вне себя, но также выталкивает воду и в центре. Центр поднимается, а затем снова опускается; действие это, если можно так выразиться, подобно тому, если бы мы бросили второй камень, что приводит к возникновению второго кругового вала воды, который распространяется по внутренней части направленного наружу первого вала. Это, в свою очередь, приводит к возникновению третьего вала... и так далее. Каждый последующий вал — более низкий, чем предыдущий, так как с каждым повышением и падением части воды часть энергии используется на преодоление внутреннего трения воды и преобразуется в теплоту. В то время как данный вал воды распространяется наружу, часть его энергии также непрерывно преобразовывается в теплоту. В конечном итоге все волны заглохнут и водная гладь снова станет тихой; однако вода станет немного более теплой, потому что поглотила кинетическую энергию падающего камня.

Чтобы создать волну, нам требуется создать начальное возмущение. Если это начальное возмущение в процессе «самоисправления» нарушает соседнюю область способом, подобным первоначальному возмущению, то мы получаем новую волну — первоначальная волна «размножается».

Если мы сконцентрируем наше внимание на некоторой точке, находящейся в пределах этой порожденной волны, то мы увидим, что некоторые свойства в этой точке возрастают и убывают, часто — периодически. В случае волн в жидкости, например, если мы рассмотрим некоторую часть водной поверхности, то обнаружим, что таким изменяющимся свойством является потенциальная энергия, поскольку эта часть поверхности сначала поднимается, а затем опускается, чтобы снова подняться.

Важно понять, что вода перемещается только вверх и вниз. Возмущение распространяется по направлению наружу, поперек поверхности воды, и поэтому случайному наблюдателю ка-

жется, что вода перемещается по направлению наружу; однако этого не происходит! Существует только возмущение поверхности. Деревянная щепка, плавающая на воде, по которой пошла рябь, будет двигаться вверх и вниз вместе с водой, на которую она опирается, но перемещающаяся по поверхности воды рябь не будет нести щепку вслед за собой. Безусловно, волны, прибывающие к берегу ряску и камыш, несут их на себе, иной раз даже с достаточной силой; мы можем наблюдать, как волны бьют эти предметы о скалы или выбрасывают на морской песок. Однако происхождение этих волн иное — они порождены горизонтальной силой ветра, а мы рассматриваем рябь, которая возникает в водоеме от брошенного туда вертикально камня.

Представим себе поперечное сечение поверхности воды, в которой происходит возмущение от упавшего камня. В идеальном случае, если не принимать во внимание потерю высоты при увеличении окружности или потерю энергии за счет теплоты, мы имеем равномерное повышение и падение. Эти повышения и падения и являются тем, что мы обычно понимаем под словом «волна», а также и тем, что мы имеем в виду, когда говорим «волнистая линия».

В своей самой простой форме такая волнистая линия идентична той, что возникает, если мы проецируем значение синуса равномерно изменяющегося угла на миллиметровую бумагу. Для угла в 0° значение синуса равно 0. По мере увеличения угла синус его также увеличивается, сначала быстро, а затем все более медленно, пока оно не достигнет своего максимума, равного единице, при значении угла, равном 90° . При дальнейшем возрастании угла значение синуса начинает уменьшаться, сначала медленно, а затем все более быстро, снова достигая 0 при 180° , переходя после этого и в область отрицательных значений. Оно достигает своего минимума, равного -1 , при 270° , а затем продолжает увеличиваться, чтобы снова достигнуть 0 при 360° . Угол в 360° может рассматриваться эквивалентным углу в 0° , так что весь процесс можно рассматривать как начавшийся снова и продолжающийся неопределенное время. Тогда в проекции графика движения мы получаем волнообразную фигуру, которая простирается по направлению наружу на неопределенное расстояние и совершает регулярные колебания между значениями $+1$ и -1 . Именно эта волнообразная фигура (синусоида) и представляет собой форму идеализированной жидкостной волны.

Волны, подобные жидкостной волне, в которой движение каждой ее части происходит в одном направлении (в этом случае — вверх и вниз) и направление распространения возмущения находится под прямым углом к этому направлению движе-

ния (в нашем случае — направлено наружу поперек поверхности жидкости), называются «поперечными волнами» (*transverse wave* — от латинских слов, означающих «лежащий поперек»; движение воды происходит «поперек» линии распространения).

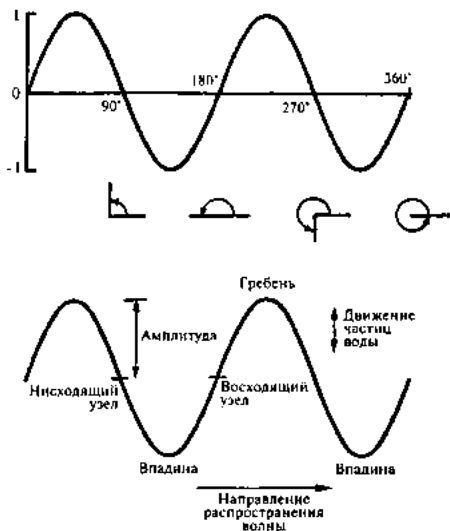
Точка, в которой возмущение является наибольшим в восходящем направлении (+1 на синусоиде), называется «гребнем» волны, а точка, в которой оно является наименьшим в нисходящем направлении (-1 на синусоиде), называется «впадиной»¹. Между гребнем и впадиной находятся точки, где вода на мгновение находится на «нулевом» уровне, то есть она уже не поднимается, но еще не опускается (точка 0 на синусоиде); такие точки называются «узлами». В жидкостных волнах имеются два вида таких узлов, поскольку вода проходит через узел по мере продвижения к впадине и по мере продвижения к вершине гребня. Мы можем назвать их «восходящие узлы» и «нисходящие узлы» (позаимствовав термины, используемые для аналогичной цели в астрономии). Вертикальное расстояние от узла до гребня волны или до впадины называется ее «амплитудой».

Если две или более точки занимают одни и те же взаимные положения в синусоиде, то про такие точки говорят, что они находятся в фазе. Например, все точки на различных вершинах одной волны находятся в фазе, так же как и все точки на различных впадинах. Все восходящие узлы находятся в фазе; все нисходящие узлы находятся в фазе. Все точки, находящиеся на одном расстоянии между восходящим узлом и гребнем, находятся в фазе и так далее. Если существуют две таких волны, у которых в любой момент времени каждый гребень совпадает в пространстве или по форме с гребнем другой в тот же самый момент времени, то говорят, что части этих двух волн находятся в фазе. Возможен даже такой случай, что обе волны могут быть в фазе на всем своем протяжении таким образом — гребень в гребень и впадина во впадину.

Естественно было бы назвать точки, расположенные на одной и той же волне и находящиеся не в фазе, точками «не в фазе». И пару волн, у которых гребень в данный момент времени не совпадает с гребнем другой волны, — волнами «не в фазе».

Синусоида может рассматриваться как состоящая из одной специфической маленькой части, которая повторяет себя неопределенное число раз. Например, часть синусоиды от одного гребня до следующего может быть воспроизведена в виде печати, и если вам захочется, то полную синусоиду можно воспроизвести.

¹ Авторские термины. (Примеч. пер.)

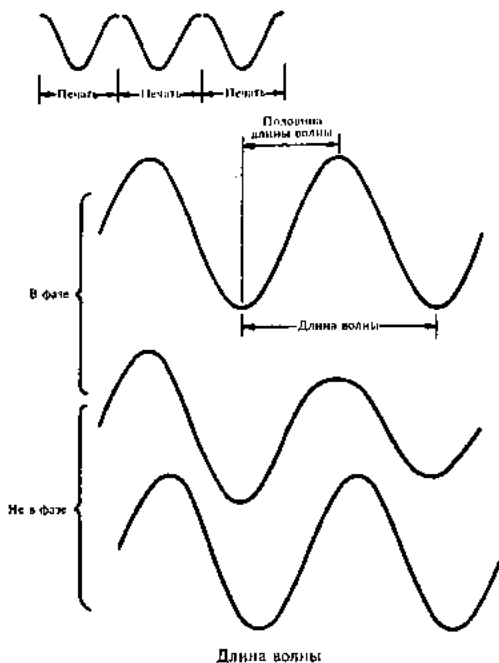


Синусоидальная форма волны

отпечатывая одну эту часть, присоединяя печать справа к окончанию предыдущей, к ее окончанию — следующую и так далее. Тот же самый эффект мы получим, если возьмем часть синусоиды от впадины до впадины, или от восходящего узла до восходящего узла, или от нисходящего узла до нисходящего узла и так далее. Мы всегда можем получить соответствующий шаблон, если возьмем участок от одной точки на синусоиде до второй, находящейся с ней в фазе.

Для любой взятой синусоиды расстояние от некоторой произвольной точки до следующей такой же — величина постоянная. Эта длина (для простоты возьмем длину от гребня до гребня) определяет «длину волны». Длина волны обычно обозначается греческой буквой «лямбда» (λ).

Если узлы не отличаются друг от друга (а в физике они обычно не различаются), то расстояние между последователь-



ными узлами равно половине длины волны (полуволне). Если восходящий узел одной волны при наложении совпадает с нисходящим узлом другой волны (такое иногда тоже случается), то говорят, что волны находятся «в противофазе», но расстояние между последовательными узлами все равно составляет половину длины волны.

В ланной волне гребень движется по направлению наружу по поверхности воды (хотя вода непосредственно, хочю повторить, не движется наружу вместе с ним); расстояние, которое

он проходит за одну секунду, называется скоростью распространения волны.

Давайте представим себе, что скорость распространения данной волны составляет десять метров в секунду и что длина волны (то есть расстояние от гребня до гребня) равняется двум метрам. Если мы обратим наше внимание на некоторую точку на поверхности воды, мы увидим, что в ней через некоторое время образуется гребень. Он начинает перемещаться, и, когда он переместится на два метра по направлению наружу, его место займет второй гребень, еще два метра вперед, и в точке появится третий гребень и так далее. После того как пройдет одна секунда, первоначальный гребень окажется на расстоянии в десять метров, а его место займет пятый гребень (10 разделить на 2).

Количество гребней (или количество впадин, восходящих узлов, нисходящих узлов или любых других последовательных точек в фазе), которые прошли через данную точку за одну секунду, называется «частотой колебаний» волны. Частота обычно обозначается греческой буквой «ню» (ν).



Из того, что я только что сказал, должно быть ясно, что скорость распространения волны, поделенная на ее длину, равняется частоте ее колебаний, то есть:

$$\nu = \frac{V}{\lambda}. \quad (\text{Уравнение 11.1})$$

Единицы измерения скорости в системе МКС — метры в секунду, единицы измерения длины волны — метры. Поэтому

единицы измерения частоты получаются равными $(\text{м/с})/\text{м}$, или $1/\text{с}$. Поскольку в алгебре $1/a$ называется величиной, «обратной» a , величину $1/\text{с}$ иногда называют «обратными секундами». Более часто, конечно, мы просто говорим «в секунду». Например, частота упомянутой выше волны может быть записана как $5/\text{с}$ и читаться как «5 раз в секунду» или как «5 обратных секунд».

Звуковые волны

Еще на сравнительно ранней стадии развития поисков знания у исследователей возникли мысли о том, что звук представляет собой один из видов волнового движения. Впервые эксперименты со звуком начали проводить еще древние греки, и замечательно то, что созданная ими для изучения звука ветвь физики с самого начала развивалась в правильном направлении даже с точки зрения современных критериев.

Уже в VI столетии до н. э. Пифагор Самосский изучал звук, который издают струны. Как мы можем заметить, если струну «ушипнуть», то она начинает вибрировать. Движения струны выглядят как размытое пятно, но даже в этом случае можно получить некоторые полезные факты, связанные со звуком. Похоже на то, что ширина этого размытого пятна, созданного движением струны, соответствует громкости звука. По мере того как вибрация утихает, а ширина пятна сужается, звук становится менее громким. А когда вибрация прекращается, не важно — естественным замедлением или резкой остановкой струны рукой, — звук также прекращается. Кроме того, легко выяснить, что чем короче натянутая струна, тем более быстро она вибрирует, и более быстрая вибрация, как кажется, производит более пронзительный звук; в то же время более длинная струна, как кажется, вибрирует медленнее, а звук издает более низкого тона.

В 400 году до н. э. Архит Тарентский (ок. 420—365 до н. э.), член пифагорейской школы, предположил, что звук производится благодаря соударению тел — быстрое движение порождает высокий тон, а медленное движение — низкий тон. Примерно в 350 году до н. э. Аристотель предположил, что вибрирующая струна ударяет по воздуху и что та часть воздуха, которая была подвержена удару струны, в свою очередь, перемещается от удара, чтобы ударить соседнюю часть, которая, в свою очередь, ударит следующую часть и так далее. Аристотель далее пришел к выводу, что воздух является средой, необходимой для того, чтобы звук

распространялся, и что в безвоздушном пространстве никакого распространения, а значит, и самого звука не будет. (И в этом Аристотель был, несомненно, прав.)

Поскольку вибрирующая струна, двигаясь в быстром темпе, ударяет воздух не однажды, а многократно, то воздух должен провести не один удар, а целый длинный ряд ударов. Римский архитектор Витрувий, живший в I столетии до н. э., предположил, что воздух просто не двигается, а вибрирует и что он ведет себя таким образом в ответ на колебания струны. Он утверждал далее, что именно эти воздушные колебания мы и слышим как звук.

Ну и наконец, приблизительно в 500 году н. э. римский философ Северин Боций (480—524?) сделал сравнительную аналогию проводимости звука сквозь воздух с волнами, которые возникают в спокойной воде от брошенного туда камня. Несмотря на то что данная аналогия достаточно справедлива и до сих пор можно рассматривать распространение звука в воздушной среде именно таким образом (и именно так, например, мы рассматриваем его в этой книге), все-таки следует отметить, что такой подход надо рассматривать только как предварительный, потому что между жидкостными волнами и звуковыми волнами на самом деле имеются достаточно важные различия.

Поперечные волны, типа жидкостных водн, могут появляться только при некоторых определенных условиях. Эти волны представляют собой такие состояния тел, при которых одна часть тела (а точнее — его поперечное сечение) перемещается боком относительно другой части, а затем совершает такое же движение, но в противоположную сторону. (Можно воспроизвести поперечную волну, если взять очень высокую стопку карт и переместить каждую карту вбок на нужное расстояние.) Такое поперечное движение производится определенным типом силы, называемым «сдвиг». Но для того чтобы воздействие сдвига закончилось появлением поперечной волны, необходимо, чтобы силе, производящей сдвиг, противостояла другая сила, которая сдвигает части тела обратно, на первоначальные места.

Например, в пределах твердого тела удар может заставить одну часть материи тела сдвигаться вбок относительно соседней части. Однако сильные силы сцепления между молекулами твердого тела, которые имеют тенденцию удерживать каждую молекулу на одном месте, будут возвращать сдвинутую часть. Она отскакивает назад, проходит свое «нулевое» положение, отскакивает назад снова, проходит мимо «нулевого» положения и так далее. Явившаяся результатом этого вибрация распространяется таким же образом, каким волны распростра-

няются по поверхности жидкости; результатом является возможность передать поперечные волны через материю твердого тела

Однако в жидкостях и газах силы сцепления гораздо более слабые, чем в твердых телах, и не способны восстановить сдвиг. Если мы переместим часть воды или воздуха вбок относительно соседней части, то некоторое дополнительное количество воды или воздуха просто натечет в область, которую перемещаемая часть оставила «пустой», а новое взаимное расположение частей останется. Поэтому в телах жидкостей не существуют никаких поперечных волн.

Точнее говоря, поперечные волны будут перемещаться по горизонтальной верхней поверхности жидкостей, поскольку там мы имеем особый случай — существование внешней силы — силы тяжести, которая сопротивляется сдвигу «вверх и вниз». Однако в пределах тела жидкости сила тяжести не может выполнять эту работу, поскольку каждый из фрагментов воды поддерживается на поверхности окружающей его водой. Так как плотность каждой частицы воды равна плотности окружающей ее воды, то вес каждой частицы воды равен нулю, и она не отвечает на воздействие силы тяжести. Если часть воды в пределах тела жидкости поднята на сдвиг, она остается в новом положении, несмотря на силу тяжести. Таким образом, распространение поперечных волн ограничено поверхностью жидкости, а так как газы не имеют никакого определенного объема и поэтому никакой определенной поверхности, то из этого следует, что поперечные волны не передаются газами ни при каких условиях.

Следовательно, если звук передается сквозь воздух в форме волны (а все свидетельствует, что так оно и есть), то форма этой волны не может быть поперечной. Логично было бы предположить существование альтернативной формы волны, такой, чтобы она состояла из периодических сжатий и разрежений.

Рассмотрим, например, колебания камертона. Ножка камертона создает быстрые периодические колебания, перемещаясь влево-вправо, влево-вправо и так далее. По мере того как она перемещается вправо, молекулы воздуха, находящиеся непосредственно справа от нее, смещаются, сдвигаясь вместе и формируя маленький объем сжатия. Давление в пределах этого сжатого объема больше, чем в соседнем объеме нормального воздуха. Молекулы в сжатом объеме «разворачиваются» и «толкают» молекулы примыкающего к ним объема, сжимая его. Соседний объем, по мере того как «разворачивается», сжимает следующего за ним соседа и так далее. Таким образом, данный

объем сжатия распространяется наружу по всех направлениях, формируя вокруг источника возмущения расширяющуюся сферу так же, как в жидкости вокруг источника возмущения формируется расширяющийся круг, состоящий из гребней воды. (Атмосфера является трехмерной средой, а поверхность воды — двумерной, вот почему мы в одном случае имеем расширяющуюся сферу, а в другом случае — расширяющийся круг.)

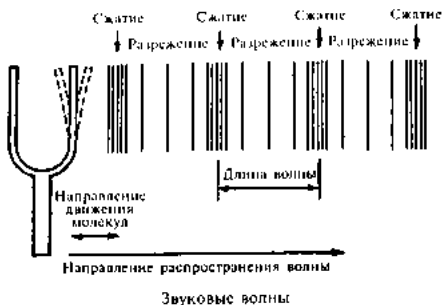
Тем временем ножка камертона, которая переместилась вправо и создала расширяющийся объем сжатия, перемещается влево. Направо от ножки образуется большее количество места, а находящийся там объем воздуха расширяется и становится более разреженным. Давление, которое в соседнем, неразрезанном, объеме выше, толкает воздух в разреженное место и разрежается в процессе этого само. Таким образом, объем разрежения расширяется по направлению наружу, вслед за объемом сжатия.

И снова ножка камертона перемещается вправо, затем — опять влево, снова — вправо, то есть таким образом, что объемы сжатия и разрежения в быстром чередовании следуют друг за другом по направлению наружу все то время, пока ножка камертона продолжает вибрировать. Каждый период движения ножки (одно движение назад и одно вперед) вызывает образование одной комбинации «сжатие—разрежение».

В этих волнах, основанных на принципе «дополнительного сжатия и разрежения», индивидуальные молекулы воздуха двигаются в одном направлении по мере сжатия, а затем в обратном направлении по мере разрежения; объемы сжатия и разрежения двигаются по направлению наружу и распространяются в направлении, параллельном возвратно-поступательному движению молекул. Такие волны, в которых частицы двигаются параллельно распространению волны в большей степени, чем перпендикулярно в направлении к нему, называются «продольными», или «компрессионными», волнами.

Продольные волны гораздо труднее проиллюстрировать и труднее воспринять, чем поперечные волны, поскольку в обычной жизни мы не сталкиваемся ни с какими внешними проявлениями их существования, как это было, например, с жидкостными волнами. Однако, поняв детально принцип распространения поперечных волн, мы можем по аналогии перенести этот принцип и на продольные волны.

Точки максимального сжатия аналогичны гребням поперечных волн, а точки максимального разрежения — впадинам. Между ними имеются области, где давление на мгновение становится нормальным, и мы можем их сопоставить.



Расстояние между точками максимального сжатия (или между точками максимального разрежения) называется длиной продольной волны. Количество точек максимального сжатия (или максимального разрежения), проходящих через данное положение за одну секунду, называется частотой продольной волны.

Так как молекулы жидкостей и твердых тел, как и молекулы газов, при сжатии формируют противосилу, старающуюся восстановить их форму, продольные волны могут передаваться и в газах, и в жидкостях, и в твердых телах. Звуковые волны особенно хорошо распространяются в воде и металле, равно как и воздушным путем. (Волны, произведенные в теле Земли колебаниями, вызванными землетрясениями, состоят из обоих типов волн — и поперечных и продольных. Они передаются твердой материей Земли, но было выяснено, что, когда волны проникают на некоторую глубину ниже поверхности земли, только продольные продолжают распространяться на дальние расстояния, в то время как поперечные волны внезапно и полностью останавливаются. Именно благодаря этому геологи пришли к выводу, что Земля содержит жидкое ядро, и оказались способными измерить его диаметр со значительной точностью.)

Однако звуковые волны не могут переноситься при полном отсутствии молекул. Если мы поместим электрический звонок под колокол воздушного насоса, то сначала мы будем слышать его звон через стекло, но затем, по мере того как воздух будет откачиваться, звучание звонка будет становиться все более и более тихим. Звучок может продолжать неистово ударять по звонку, и сам звонок может даже начать вибрировать, но из-за

отсутствия воздуха образование продольных волн невозможно. В результате никакого звука не будет слышно.

(Часто повторяют, что Луна, на которой практически нет атмосферы, является беззвучным миром. Однако звук может быть передан по поверхности Луны, и космонавт сможет услышать отдаленный взрыв, если он надлежащим образом создаст контакт с ее поверхностью.)

Громкость звука

Предположим, что мы рассматриваем звуковую волну, в которой последовательность сжатий и разрежений является регулярной. Она была бы аналогична поперечной волне, имеющей форму правильной синусоиды. Такую звуковую волну слышим мы как устойчивую музыкальную ноту, и именно такой звук производит камертон. Действительно, если мы закрепим какой-либо пишущий инструмент на ножке камертона таким образом, что он сможет писать на рулоне бумаги, перемещаемой с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном к направлению вибрации ножки, то на бумаге получится изображение синусоидальной волны.

Камертон может издавать звуки, которые отличаются по громкости. Если мы ударим его лишь слегка, он издаст мягкий звук; если же мы ударим ножку камертона сильнее, то он испустит звук, который будет совершенно идентичным первому и будет отличаться от него только уровнем громкости. Когда мы слегка ударим камертон, его ножка движется вперед и назад по сравнительно небольшой дуге; при более сильном ударе ножка будет двигаться вперед и назад по гораздо большей дуге. Согласно тому, как и должны проявлять себя простые гармонические колебания, эти два движения будут иметь одинаковый период, несмотря на разницу в амплитуде, иначе говоря, одинаковое количество сжатий и разрежений в одну секунду. То есть частота произведенного звука в любом случае будет той же самой.

Однако тот камертон, который мы ударили более сильно, по мере перемещения по большей дуге сжимает воздух более активно и сильно. Поэтому более громкая нота отличается от более тихой ноты тем, что сжимаемые объемы в первой — более сжаты, а разрежаемые объемы — более разрежены. Разница в степени сжатия в продольной волне аналогична разнице в амплитуде в поперечной волне. Это можно легко визуализировать, если снова провести эксперимент с камертоном и прикрепленной к нему ручкой. Слабо вибрирующая ножка нари-

сует синусоиду маленькой амплитуды, а сильно вибрирующая, то есть двигающаяся по большей дуге в результате более сильного удара, отметит синусоиду большей амплитуды.

Чтобы сжать воздух, преодолевая сопротивление его давления, потребуется затратить энергию. Таким образом, сжатый воздух является аккумулятором энергии, то есть может запасать некоторое количество энергии, которую он может израсходовать, расширяясь и толкая все, что находится в непосредственной близости от него. По этой причине звуковые волны могут рассматриваться как форма энергии.

Чем сильнее сжат воздух, тем больше количество энергии, которую он содержит и может израсходовать. Если подойти к данному вопросу с другой стороны, то можно сказать, что вибрирующий камертон обладает кинетической энергией, которая тратится на сжатие воздуха¹. Если ножка камертона колеблется по большей дуге, но период ее колебаний заканчивается в одно и то же время, что и у ножки, двигающейся по меньшей дуге, то это означает, что она перемещается с большей средней скоростью и обладает большим количеством кинетической энергии, которую она может израсходовать на сжатие воздуха. Независимо от точки зрения, с которой мы подходим к данному вопросу, мы можем прийти к выводу, что громкость — вопрос количества энергии и что громкий звук содержит большее количество энергии, чем тихий.

Громкость, или «интенсивность звука», измеряется в единицах количества энергии, проходящих каждую секунду через один квадратный сантиметр площади области, находящейся перпендикулярно к направлению распространения звука. Энергия, израсходованная в единицу времени, представляет собой мощность, но величина мощности, которую несет с собой звук, очень мала. Для того чтобы показать, насколько она мала, давайте рассмотрим некоторые единицы измерения мощности.

В системе единиц измерения МКС ватт — единица мощности, равен одному джоулю в секунду. Мы хорошо знакомы с ваттами применительно к мощности электрических лампочек; мы знаем, что про лампочку мощностью 75 ватт нельзя сказать, что она слишком яркая для чтения, а что касается лампочки мощностью 40 ватт, то она выглядит довольно-таки тускло. Ночные «дежурные» фонари достаточно яркие, чтобы хоть чуть-чуть рассеять глубокую тень и позволить нам добраться до ван-

¹ Камертон или любое другое воспроизводящее звук устройство также разредит воздух, действуя против его собственного давления, что также требует затрат энергии. Аргументы при рассмотрении этого аспекта абсолютно аналогичны тем, которые мы используем при рассмотрении сжатия.

ной, не стучаись о мебель, имеют мощность в $\frac{1}{2}$ ватта. Один микроватт — это $\frac{1}{1000000}$ часть ватта, то есть такой «дежурный» свет имеет мощность в 250 000 микроватт.

С этой позиции обычная разговорная речь обладает мощностью не более 1000 микроватт, а тихие звуки опускаются до незначительных долей микроватта.

Человеческое ухо скорее обнаруживает различия в громкости звуков по отношению друг к другу, чем чувствует фактическую разницу. Таким образом, звук мощностью в 2000 микроватт будет казаться некоторым громче, чем звук мощностью в 1000 микроватт, но звук мощностью в 3000 микроватт не будет казаться настолько же громче предыдущего. Потребуется звук мощностью в 4000 микроватт, чтобы создать у нас впечатление возрастания мощности настолько, насколько звук мощностью в 2000 микроватт громче, чем звук мощностью в 1000 микроватт. Чтобы достичь звука, который является настолько же более громким, насколько громче предыдущий 4000-микроваттный звук, мы должны усилить его до величины в 8000 микроватт. Отношения 2000/1000, 4000/2000 и 8000/4000 равны друг другу, но различия не одинаковы, а наше ухо судит о звуке не по величине, а по различию.

Все это означает, что человеческое ухо воспринимает не мощность звука, а логарифм¹ этой мощности. Когда один звук обладает мощностью в десять раз большей, чем мощность другого звука, отношение мощности первого к мощности второго равно 10, а десятичный логарифм этого отношения равен 1. Разница в интенсивности звука, таким образом, является равной одному

¹ Логарифмом числа называется его экспонента, выраженная в степенях числа 10. Например, 10^2 равно 10×10 , или 100; 10^3 равно $10 \times 10 \times 10$, или 1000. Поэтому логарифм 100 равен 2, а логарифм 1000 равен 3. Благодаря использованию логарифмов мы преобразуем геометрический ряд (такой ряд, в котором каждый член получен посредством умножения предыдущего на некоторую установленную величину) в арифметический (где каждый член получается из предыдущего посредством сложения с некоторой величиной). В ряде $10-100-1000-10\ 000-100\ 000$ и т. д. каждый следующий член получен посредством умножения предыдущего на число 10. Если вместо этого написать логарифмы чисел, то мы получим ряд вида $1-2-3-4-5$ и т. я., где каждый следующий член получен посредством прибавления к предыдущему единицы. Наши органы чувств в целом работают, производя преобразование геометрического ряда в арифметический. Если какое-либо раздражение в 100 000 больше, чем другое того же самого вида, то орган чувств, воспринимающий это раздражение, обнаруживает его как, скажем, в пять раз более интенсивное, что соответствует логарифмическому подходу. Таким образом, органы чувств могут воспринимать огромный диапазон интенсивностей. Расказанное выше является сутью «закона Вебера—Фехнера», названного так в честь двух немецких ученых. Эрнста Генриха Вебера (1795—1878), который впервые сформулировал этот закон, и Густава Теодора Фехнера (1801—1887), который популяризировал его.

«белу», единице, названной так в честь Александра Грэхема Белла (1847—1922) — ученого, изучавшего физику звука и изобретателя телефона. В соответствии с вышесказанным мы получаем, что увеличение мощности звука в 100 раз дает нам увеличение громкости на 2 бела, увеличение мощности в 1000 раз — 3 бела и так далее. Этот тип единицы измерения отражает логарифмические свойства восприятия звука человеческим ухом.

Бел представляет собой довольно крупную единицу измерения, чтобы быть удобной. Обычно употребляют единицу, равную десятой части бела и называемую «децибелом». Когда говорят, что один звук громче другого на один децибел, это означает, что первый звук мощнее второго в 1,26 раза, поскольку логарифм 1,26 примерно равен 0,1.

Из-за того что даже громкие звуки несут в себе очень малое количество энергии, звуковая энергия не является чем-то, чего мы обычно опасаемся. Энергии, заключенной в раскате грома, вполне может быть достаточно, чтобы заставить объекты заметно вибрировать. Телефон представляет собой пример того, как человеческая изобретательность сумела использовать преобразование звуковой энергии в электрическую энергию и обратно с пользой для себя.

Однако звуки, которые непрерывно окружают нас, независимо от того, созданы ли они людьми, другими формами жизни или неодушевленными предметами, просто исчезают и преобразуются в теплоту.

Если бы звук оставался неконвертированным в другие формы энергии, мы смогли бы легко увидеть, как громкость звука уменьшается по мере удаления от его источника. Звуковые волны распространяются по направлению наружу в виде расширяющейся сферы, исходящей из источника звука, и полная мощность каждой представленной звуковой волны распространяется по этой поверхности. Поверхность сферы равна $4\pi r^2$, где r — радиус сферы, то есть расстояние до источника. Если расстояние от центра увеличить в три раза, то площадь поверхности увеличивается в девять раз и, таким образом, через квадратный сантиметр поверхности проходит только девятая часть мощности. Интенсивность звука, как ожидалось бы, изменится обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Таким же образом, например, уменьшается интенсивность гравитационного притяжения. Однако тяжесть не поглощается материей, а звук может быть легко поглощен большинством объектов, с которыми он вступает в контакт, даже непосредственно воздухом. В результате звук уменьшается гораздо быстрее, чем можно было бы ожидать.

Глава 12

ВЫСОТА ТОНА

Скорость звука

Каждый объект имеет некоторый собственный период колебаний, и, по крайней мере, в случае простых гармонических колебаний этот период пропорционален к квадратному корню из массы объекта, деленного на силу упругости (см. уравнение 8.4). В случае маятника, где силой упругости является сила тяжести (которая увеличивается вместе с массой тела), период колебаний изменяется, как квадратный корень из длины маятника, разделенной на ускорение свободного падения (см. уравнение 8.9).

Это означает, что если мы рассматриваем два однотипных объекта, то ожидаем, что больший и более массивный из них будет иметь и более длинный период колебаний. Следовательно, он произведет меньшее количество звуковых волн в единицу времени, и индивидуальные волны будут иметь большую длину волны и более низкую частоту.

Период колебаний также может быть изменен, если мы изменим величину силы упругости: по мере увеличения силы упругости период колебаний становится короче. То, что тугую струну более трудно вывести из положения равновесия, чем слабо натянутую, иллюстрирует то, что сила, имеющая тенденцию восстанавливать струну к «нулевому» положению, увеличивается по мере возрастания натяжения струны. Из двух одинаковых струн более тугая струна сокращается также быстрее, и если это — тетива лука, то позволяет лучнику выстрелить дальше. (Именно поэтому тетиву лука содержат натянутой настолько туго, насколько это возможно, когда лук находится в действии.) Тугая струна, более быстро «отскакивая» назад, естественно, имеет и более короткий период колебаний, чем слабо натянутая, она и звуковые волны производит с более высокой частотой и более короткой длиной волны.

Однако из опыта мы знаем, что все приспособления, которые служат для того, чтобы производить звуковую волну низкой частоты, также издают низкий тон, в то время как те, что производят звуковую волну высокой частоты, также издают высокий, пронзительный тон. Большие объекты с длинными периодами вибрации производят низкие тоны, в то время как подобные им маленькие объекты производят высокие: сравните звон церковного колокола со звяканьем колокольчика на салазках, низкий тон струны на контрабасе с пронзительностью струны на скрипке. В

живой жизни сравните трубные звуки, которые издает слон, с писком мыши; «гудение» гуся — с чириканьем канарейки. Голос мужчины, с его более длинными голосовыми связками, глубже, чем голоса женщин и детей, с их более короткими. Но каждый индивидуум может изменить высоту звука, который он издает, регулируя натяжение своих голосовых связок (хотя он и не знает, что поступает именно таким образом), а звук свободно вибрирующей струны можно сделать более пронзительным, если потуже натянуть эту струну.

Это свойство пронзительности, или глубины тона, называется «высотой звука», и весьма очевидно, что человеческое ухо дифференцирует частоты звуковых волн по их высоте. По мере увеличения частоты звук, который мы слышим, кажется нам все более и более пронзительным. По мере уменьшения частоты, наоборот, слышимый нами звук кажется нам все более и более низким.

Частоту звуковой волны определить достаточно легко. Действительно, колебания камертона можно подсчитать несколькими различными способами, включая (наверное, самый простой метод) нанесение линии непосредственно самописцем, закрепленным на ножке камертона на перемещающейся миллиметровой бумаге, и подсчет волн, произведенных в единицу времени. Таким образом, и частота, и высота звука могут быть согласованы. Например, можно показать, что и механический камертон, и духовой камертон — трубочка с язычком, в которую дуют, а она издает звук — «стандартное ля», по которому музыканты настраивают свои инструменты, — имеют частоту 440 раз в секунду.

Для того чтобы вычислить фактическую длину волны звука некоторой высоты, можно использовать уравнение 11.1. Как мы видим из него, частота (ν) является равной скорости распространения волны V , деленной на длину волны (λ). Решая уравнение 11.1 для (λ), мы находим, что:

$$\lambda = \frac{V}{\nu} \quad (\text{Уравнение 12.1})$$

Чтобы сделать уравнение 12.1 более полезным, нам необходима дополнительная информация, а именно: скорость звука. Эта скорость может быть определена со значительной точностью в результате прямого эксперимента, который впервые был успешно осуществлен в начале XVII столетия.

Предположим, что на одном холме установлено орудие (пушка), а на другом холме размещены наблюдатели; расстояние между холмами может быть измерено и известно. Когда орудие стреляет, то вспышка будет замечена сразу (предположение о том, что

свет распространяется настолько быстро, что его перемещение от одного холма до другого займет фактически нулевое время, сделанное еще в те времена, оказалось абсолютно правильным). Звук выстрела орудия, однако, будет услышан только спустя некоторый интервал времени, который можно измерить. Если разделить расстояние между орудием и наблюдателями на число секунд задержки между появлением вспышки и звуком от выстрела, то (при условии обладания точными часами) это и даст нам величину скорости звука.

Безусловно, если имеется ветер, то волны сжатия будут ускорены вперед движением воздуха или, наоборот, замедлены в зависимости от направления ветра. Однако это можно учесть, если сначала расположить орудие на одном холме, а затем наоборот. Таким образом, независимо от направления ветра мы можем исключить его влияние, взяв среднее значение из этих величин, то есть полученная величина (из-за взаимного исключения скоростей) и даст нам скорость звука в стоячем воздухе.

В настоящее время общепринятая скорость воздуха при нормальной температуре (скажем, 20 °С, или, что является эквивалентным, 68 °F)¹ равна 344 метрам в секунду (или 1130 футов в секунду, или 758 миль в час). При изменении температуры эта скорость также немного изменяется. В холодный зимний день она может опуститься до 330 метров в секунду, в то время как в жаркий летний день она может подняться до 355 метров в секунду.

Разница температур оказывает достаточно важный эффект на скорость звука. В течение дня верхние слои атмосферы в целом более холодные, чем воздух вблизи поверхности Земли. Поскольку направленная вверх часть пучка звуковых волн проникает в холодную стратосферу, она замедляется; эффектом этого является то, что весь пучок отклоняется вверх. (Представьте себе, что вы идете, а кто-то захватывает вашу левую руку, замедляя эту часть вашего тела, при этом вы автоматически измените направление своего движения — влево.) Ночью ситуация обратная, поскольку верхние слои становятся теплее нижних: верхняя часть пучка звуковых волн ускоряется, и весь пучок изменяет направление — отклоняется вниз. По этой причине ночью звук обычно можно услышать более ясно и на большем расстоянии, чем днем.

Однако если мы ограничимся комнатной температурой, то мы можем записать уравнение 12.1 в виде:

$$\lambda = \frac{344}{\nu} \quad (\text{Уравнение 12.2})$$

¹ Более подробно вопрос температур и температурных шкал будет рассмотрен дальше.

До недавнего времени скорость звука намного превосходила скорость любого транспортного средства, сделанного человеком, поэтому она не имела никакого практического применения. Однако с изобретением самолета и с постоянным увеличением скоростей, на которые он был рассчитан, важность скорости звука возросла, причем по причинам, напрямую не связанным со скоростью сообщения.

Скорость, с которой сжатая область восстанавливает себя до нормального состояния и сжимает следующую область, определяется скоростью естественного восстановления молекул после упругой деформации (сжатия); таким образом, именно эта скорость восстановления и определяет скорость звука. Также эта скорость определяет способность воздуха «уйти с пути» летящего на него самолета. По мере того как скорость самолета приближается к скорости звука, его скорость приближается к той, с которой молекулы воздуха могут «отступать». Самолет начинает «догонять» «отступающие» молекулы воздуха и по мере дальнейшего возрастания скорости все больше и больше настигает их. Такой самолет постоянно как бы сжимает воздух перед собой (или, по крайней мере, пока поддерживает данную скорость движения) по причине того, что воздух не может «уйти с его пути». Этот объем сжатого воздуха, находящийся перед самолетом, оказывает огромное влияние на структуру материала, из которого самолет сделан; одно время, в 1940-х годах, даже возникло мнение, что при достижении скорости звука самолет распадется. Появление понятия «звуковой барьер» обязано собой именно этому факту, как если бы скорость звука представляла собой стену, через которую самолет не сможет прорваться.

Отношение скорости движения объекта к скорости звука в среде, в которой перемещается объект, называется «числом Маха», названным так в честь австрийского физика Эрнста Маха (1838—1916), который в конце XIX столетия первым исследовал теоретические последствия движений на таких скоростях. Тело, двигающееся со скоростью звука, перемещается «со скоростью в один мах», со скоростью в две скорости звука — «в два маха» и так далее. Число Маха не представляет собой определенной скорости, оно зависит от природы, температуры и плотности среды, через которую перемещается объект. Для обычного воздуха при комнатной температуре один мах равен 344 метра в секунду, или 758 миль в час.

По мере улучшения конструкций самолетов они смогли противостоять все большим напряжениям на высоких скоростях, и 14 октября 1947 года специально подготовленный самолет «пробил звуковой барьер», двигаясь со скоростью более одного маха.

С тех пор были достигнуты скорости в три маха и больше. (Можно сказать, что астронавт, летящий над Землей со скоростью пять миль в секунду, движется со скоростью 25 махов, если использовать сравнение со скоростью в воздушной среде. Однако астронавт перемещается сквозь вакуум, а вакуум в значительной мере не передает звук, поэтому число Маха в действительности к такому движению неприменимо.)

Самолет, двигающийся со «сверхзвуковой» скоростью (скоростью более одного маха), несет звуковые волны за собой, если так можно выразиться, так как он перемещается быстрее, чем они. Объемы сжатия соединяются, и вместо плавного нарастания от сжатия до разрежения и обратно, как в обычных звуковых волнах, возникает резкая граница разделения между объемом сильных сжатий и окружающей нормальной атмосферой. Эти сильные потоки сжатия, направленные назад в виде конуса, угол которого зависит от числа Маха, и называются «ударной волной». Подобные потоки ударной волны возникают также от летящих пуль, или, например, от зигзага молнии, или других движений, которые энергично расширяют воздух при скоростях больше чем один мах. (Кстати, ударная волна — пример непериодической формы волны.)

Однако если самолет, летящий со сверхзвуковой скоростью, замедлится или изменит направление, ударная волна превратится в обычные звуковые колебания, переносящие при этом объемы необычно сильного сжатия и разрежения. В этой серии колебаний звуковые волны расширяются и ослабляются по мере того, как они распространяются, но если они начинаются довольно близко от земли или, случается, направлены вниз, то они ударят в землю со значительной силой, произведя эффект, известный как «акустический удар».

Гром, который производит молния, — один из примеров звукового удара, «щелчок» пастушеского кнута тоже представляет собой миниатюрный звуковой удар, так как было установлено, что у правильно сделанного кнута кончик перемещается со скоростью выше скорости звука.

Обычно, когда мы говорим о скорости звука, мы подразумеваем скорость его распространения сквозь воздух. Однако звуковые колебания распространяются сквозь любое материальное тело, и скорость их распространения изменяется в зависимости от природы этого тела. Межмолекулярные силы в жидкостях и твердых телах гораздо более сильные, чем в газах, а значит, восстановление их после сжатия происходит гораздо быстрее. Следовательно, звук распространяется в жидкостях и твердых телах с гораздо большей скоростью, чем в любом газе, и чем

более твердой материей обладает тело (и, следовательно, с чем более сильными межмолекулярными силами), с тем большей скоростью звук распространяется сквозь него. В воде звуковые колебания распространяются со скоростью 1450 метров в секунду (3240 миль в час), а в металле — со скоростью приблизительно 5000 метров в секунду (или 11 200 миль в час).

Музыкальная шкала

В музыкальных инструментах звуки различной высоты тона могут быть воспроизведены посредством удара или шипка за струны различной длины и толщины, как это делается на фортепьяно или арфе, или, как в случае со скрипкой, используя немного струн, но изменяя их эффективную длину, зажимая пальцем один конец струны в различных точках, или позволяя звуковой волне заполнять трубки, которые могут удлиняться или сокращаться в зависимости от положения руки исполнителя, как это делается в тромбоне; или закрывая и открывая дополнительные объемы в трубке, закрывая отверстие пальцем, как во флейте, или нажимая на вентиль, как в трубе.

Когда на каком-либо инструменте берутся две ноты вместе или одна за другой, их комбинация кажется нам иногда приятной, а иногда — неприятной. Это, конечно, вопрос очень субъективный, к тому же основанный на культурном наследии слушателя, поскольку мы любим то, к чему мы привыкли, и множество типов музыки, начиная от рок-н-ролла и кончая, например, традиционной японской, могут показаться неприятными для непосвященного, но весьма нравятся их приверженцам. Однако если мы ограничимся рассмотрением «серьезной» классической западной музыки, то мы можем прийти к некоторым обобщениям и заключениям относительно ее.

Если две ноты прозвучали вместе, то результатом этого не являются два отдельных ряда звуковых волн, каждый из которых путешествует сквозь воздух независимо от другого, — мы имеем результирующую волну, которая произошла от сложения двух волн вместе.

Чтобы еще упростить, предположим, что мы каким-то образом создали две звуковых волны, каждая из которых одной и той же частоты, но звучит таким образом, что отстает от другой на половину длины волны. Всякий раз, когда одна звуковая волна формирует область сжатия в одной точке, другая — формирует там же область разрежения, и наоборот. Два эффекта взаимоуничтожают друг друга, и воздух не движется. В ре-

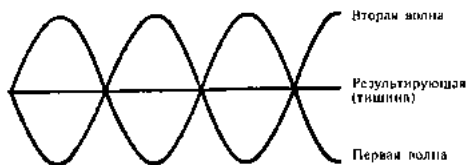
зультате взятые вместе два звука производят тишину; такое явление называется «интерференцией». Трудно представить это себе, если мы говорим о продольных волнах. Однако если изобразить продольные волны как аналогичные им поперечные волны (поскольку для данной цели такая замена вполне приемлема), то интерференцию достаточно легко изобразить. Во всех случаях, когда синусоида одной звуковой волны идет вверх, синусоида другой звуковой волны идет вниз, и если сложить эти два участка, то в результате мы получим ровную линию, то есть никакой волны вообще.

С другой стороны, если две волны одной и той же частоты звучат точно в фазе, они складываются друг с другом, так что сжимаемые области еще больше сжимаются, а разрежаемые области разрежаются еще больше, чем это бы было, если бы любой из этих звуков воспроизводился в одиночку. На аналогичной поперечной волне гребни и впадины отдельных волн совпадают и суммарные гребни будут выше, а впадины глубже, чем у любой из них. Наше ухо услышит один звук той же высоты тона, но более громкий. Это явление называется «укреплением» (*reinforcement*)¹.

На самом деле полная интерференция, или укрепление, маловероятна. Вместо этого две или более волн объединяются, укрепляясь здесь, уменьшаясь там, и в результате формируют окончательные образцы очень сложной формы, которая несколько не будет походить на периодические синусоидальные волны ни одной из исходных нот. Однако сколь сложными бы эти образцы ни были, они останутся периодическими. То есть если взять небольшой повторяющийся отрезок из части образца, то повторением этого отрезка можно составить весь образец целиком.

В 1807 году французский физик Жан Батист Жозеф Фурье (1768—1830), изучая общие формы волны, показал, что любой периодический образец волны, каким бы сложным он ни казался, может быть разложен соответствующими математическими методами на составляющие его синусоидальные волны. Такие математические методы получили название «гармонический анализ», поскольку их можно применять по отношению к музыкальным звукам. (Образцы волн музыкальных звуков составлены из отдельных синусоидальных волн, которые демонстрируют организованный набор взаимосвязей. В тех случаях, когда этого не происходит, то есть когда составляющие синусоидальные волны выбираются и объединяются хаотически, результа-

¹ Авторский термин. (Примеч. пер.)



Интерференция



Укрепление

том является не музыка, а «шум». Разница аналогична той, что существует между сложной, но правильно организованной геометрической фигурой и набором тех же линий, но начерченных случайным образом, — в последнем случае мы получаем обыкновенные каракули. Однако методы, разработанные Фурье, могут использоваться и для анализа образцов шумовых волн, поэтому для обозначения их часто употребляют более нейтральный термин — «волновой анализ».)

Давайте ограничимся рассмотрением очень простых примеров и не будем вовлекать сложные математические вычисления. Рассмотрим две ноты различной высоты тона, а потому — различной частоты, звучащие вместе. Сжатые области звуковой волны (или гребни, если мы будем говорить в более легко визуализируемых аналогиях поперечной волны) движутся с более короткими интервалами — в случае ноты с более высокой частотой, а значит, они достигнут таковой звуковой волной с более низкой частотой.

Предположим, что одна нота имеет частоту 250 раз в секунду, а другая нота — частоту 251 раз в секунду, и предположим, что они начинают звучание в фазе. Первый гребень появляется одновременно у обеих нот. Второй гребень у ноты 251/с появляется только чуть-чуть раньше, чем второй гребень у ноты 250/с. Тре-

тий гребень появляется еще раньше, а четвертый гребень -- раньше, чем третий. Однако в конце первой секунды и одна и другая ноты закончили точно 250 и 251 колебание соответственно. Они опять в фазе, но нота 251/с получает в каждую секунду один полный дополнительный гребень¹. И за каждую следующую секунду нота 251/с получает еще один новый дополнительный полный гребень.

В точке, где две ноты находятся в фазе, гребень к гребню, имеется короткий период полного укрепления, и нота звучит громко. По мере прохождения секунды и падения гребней они все более и более выходят из фазы, то есть интерференция все более и более увеличивается, а звук становится более тихим. В полуминутной точке, на полпути между двумя синфазными периодами, ноты полностью выходят из фазы и гребень одной располагается напротив впадины другой ноты; в этой точке имеется короткий период полной интерференции. Результатом ее является полное затухание и пропадание звука, причем периодичность затухания происходит с интервалом, следующим за тем, когда гребни совпадают. Такое периодическое изменение громкости, когда две ноты звучат вместе, называется «биением».

Давайте рассмотрим еще две ноты с частотами 250/с и 252/с соответственно. Тогда после половины секунды одна нота закончит 125 колебаний, а другая — 126 колебаний, и они возвратятся в фазу, соответствующую гребню. Это будет повторяться каждую половину секунды, то есть будут получаться два биения в секунду. Число биений в секунду, в случае одновременного звучания двух нот, равно разности в частоте этих двух нот.

Если биения настолько редкие, что их можно различимо слышать, то они создают звуковые комбинации, неприятные для слуха. Наиболее неприятным является, очевидно, 30 биений в секунду. Однако в том случае, когда число биений в секунду больше 60, они взаимопроникают друг в друга, и для человеческого уха их комбинация кажется приятной или гармоничной.

Теперь давайте рассмотрим две ноты, у которых одна имеет частоту точно в два раза больше другой. Например, первая имеет частоту 220/с, а вторая — 440/с; отношение частот равно 1:2. Число биений, когда ноты звучат вместе, равно 440—220, или 220 раз в секунду. Биения дублируют ноту более низкого тона, так что кажется, что две ноты «сплавляются» друг с другом и

¹ Две ноты «гоняются друг за другом» только с точки зрения числа гребней, создаваемых в единицу времени, а не в смысле скорости. Обе ноты распространяются в пространстве с одной и той же скоростью. В действительности скорость звука не зависит от частоты.

начинают представлять собой одну и ту же ноту. Они гармонируют друг с другом.

Именно Пифагор был первым, кто заметил, что гармонирующие ноты связаны между собой целочисленными отношениями небольшой величины. У него не было никакой аппаратуры для непосредственного измерения самой частоты, но он рассмотрел струны различной длины. Он обнаружил, что две струны с длинами, относящимися как 1:2, производят приятную комбинацию, так же как струны с соотношением длин 2:3 и 3:4.

(Результаты этих наблюдений за звуком были истолкованы Пифагором с мистической точки зрения. Он рассматривал роль взаимодействий небольших целочисленных отношений в создании благозвучий в соответствии со своими взглядами о том, что вся Вселенная управляется числами. Он и его ученики предполагали, что и сами планеты способны создавать звуки — так называемую «музыку сфер», ноты в которой основаны на их расстояниях относительно Земли. Наука не могла освободиться от этих заблуждений в течение 2000 лет.)

Предположим тогда, что мы начинаем с ноты, частота которой равна 440/с (стандартная частота для музыкантов); назовем эту ноту А. Нота вдвое большей частоты звучит настолько подобно этой, что мы можем предположить, что это — тоже А, то есть мы можем использовать эту букву для обозначения ноты с частотой, равной половине А. Таким образом, фактически мы получим целый ряд значений такого А, с частотами, равными 110/с, 220/с, 440/с, 880/с, 1760/с и так далее, расширяя диапазон, из которого мы выбираем, на неопределенное значение вверх и вниз.

Между любыми двумя последовательными нотами А мы можем поставить другие ноты с частотами, которые состоят в некоторых других последовательных арифметических отношениях к нотам А и друг к другу. Общепринято подставлять в этот интервал шесть других нот; они обозначаются буквами В, С, D, E, F и G. Таким образом, в интервале от А до А мы имеем ноты: А, В, С, D, E, F, G, А. В интервале от А до А располагаются восемь нот (считая и А), между которыми находятся семь интервалов. Поэтому интервал от А до А называется октавой (от латинского слова, означающего «восьмой».) Другие интервалы называются по-английски. Интервал от С до G (С, D, E, F, G), который включает в себя пять нот, называется «пятым», в то время как интервал от С до F — «четвертым». В нашей стране, да и во всем остальном мире, кроме США, общепринята латинская система обозначения музыкальных интервалов. Согласно ей сама нота С (представляющая собой интервал от себя до

себя) называется «прима», интервал от С до D называется «секунда», от С до E — «терция», от С до F — «кварта», от С до G — «квинта», от С до A — «секста», от С до B — «септима» и, наконец, от С до C — «октава». (Все названия музыкальных интервалов происходят от латинских слов, означающих соответственно: «первый», «второй», «третий», «четвертый», «пятый», «шестой», «седьмой» и «восьмой». — *Пер.*)

Частоты, соответствующие нотам, в диапазоне от A (220/с) до A (880/с):

| | | |
|-----------|---------|---------|
| A = 220 | A = 440 | A = 880 |
| B = 247,5 | B = 495 | |
| C = 264 | C = 528 | |
| D = 297 | D = 594 | |
| E = 330 | E = 660 | |
| F = 352 | F = 704 | |
| G = 396 | G = 792 | |

Диапазон от 220/с до 440/с составляет одну октаву, а диапазон от 440/с до 880/с — другую октаву. Каждая нота в верхней октаве представляет собой удвоенную по частоте соответствующую ноту в более низкой октаве, так что интервал от B до B представляет собой октаву, так же как интервал от C до C, от D до D и так далее. Если вы запомните, что удвоение частоты создает ноты для каждой следующей более высокой октавы, а деление пополам — ноты для каждой более низкой октавы, вы сможете написать частоты для любой ноты в любой октаве.

Если мы послушаем ноты, идущие последовательно в пределах любой октавы, то обнаружим, что они звучат точно так же, как соответствующие ноты в пределах любой другой октавы: выше или ниже. Стандартная клавиатура фортепьяно охватывает диапазон немногим более семи октав; если мы будем нажимать одну за другой белые клавиши, то легко обнаружим, что одна и та же «мелодия» последовательно будет повторяться семь раз, только переходя на все более высокие тоны звуков.

Все частоты связаны между собой отношениями, которые могут быть выражены в небольших целых числах. Отношение G к C, например, равно 396:264, или 3:2; а отношение F к C равно 352:264, или 4:3. Именно эти простые отношения изучал Пифагор, и именно простота отношений обосновывает величину биений, при которых ноты «укрепляются» и хорошо «смешиваются» между собой. Именно поэтому квинты (3:2) и кварты (4:3) очень часто используются для построения благозвучных интервалов между последовательными нотами.

ТАБЛИЦА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ПО ОКТАВЕ

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|---|----------|---|-------|---|-------|---|----------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|----------|---|----|---|----|--|
| | | | | | | | | | | до | = | ре | = | ми | = | фа | = | соль | = | ля | = | си | = | до | |
| A | = | B | = | C | = | D | = | E | = | F | = | G | = | A | = | B | = | C | | | | | | | |
| | | целый | | половина | | целый | | целый | | половина | | целый | | целый | | целый | | целый | | половина | | | | | |

Но тогда также и отношения между тремя нотами (сочетание которых называется «основным трезвучием» или «аккордом»), С, Е и G, равное 264:330:396, или 4:5:6, будет благозвучным. F, A и C также составляют мажорное трезвучие, так же как и G, B и D. Фактически интервалы между нотами задуманы таким образом, что каждая нота может быть частью одного из этих трех мажорных трезвучий¹.

Если мы рассмотрим отношение частот смежных нот, то оказывается, что B:A относится как 9:8. Отношения между D и C, так же как и G:F, равны 9:8. Отношения E:D и A:G — не совсем такие же, но очень близки — 10:9. Другими словами, из семи интервалов между нотами в пределах одной октавы пять имеют примерно равный размер; мы можем назвать их «целыми интервалами».

Частотное отношение F:E, однако, является только половиной, поскольку оно равно 352:330, или 16:15; это также истинно и для отношения C:B. (Более просто можно объяснить это другими словами. Отношение 9:8 представляет собой увеличение в частоте на 12,5 процента, а отношение 10:9 представляет собой увеличение на 11,1 процента. Однако отношение 16:15 представляет собой увеличение только на 6,7 процента.) То есть при переходе от B к C или от E к F мы преодолеваем только «половину интервала»².

Если мы начнем с A и будем подниматься по октаве вверх через ноты B, C и так далее, то мы будем проходить интервалы в следующем порядке: тон, полутон, тон, тон, полутон, тон, тон, полутон, тон, тон, полутон и так далее. Полутона последовательно отделены двумя целыми тонами, затем — тремя целыми тонами, двумя тонами, тремя тонами и так далее.

Когда мы поем гамму, используя традиционные имена для нот (до, ре, ми, фа, соль, ля, си, до), благодаря многовековой

¹ В нашей стране принято обозначение этих трезвучий соответственно как «тоника», «доминанта» и «субдоминанта». (Примеч. пер.)

² У нас существуют гораздо более удобные понятия «тона» и «полутон». Таким образом, отношения, указанные в предыдущем абзаце, составляют «тон», а указанные в данном абзаце — «полутон». В дальнейшем мы будем для удобства пользоваться русской терминологией. (Примеч. пер.)

привычке мы настаиваем на размещении полутоновых интервалов между ми и фа и между си и до. Любая другая последовательность кажется нам звучащей неправильно. Таким образом, мы хотим, чтобы семь интервалов октавы располагались по следующему образцу: тон, тон, полутон, тон, тон, тон, полутон. Если вы посмотрите назад, то увидите, что такая специфическая последовательность может существовать, только если мы начинаем гамму с ноты до, то есть до на ноте С (на которой из С — не имеет никакого значения). Тогда ре становится D, ми — E, фа — F, соль — G, ля — A, си — B и снова до становится C. Малый интервал «ми—фа», в котором расстояние между нотами равно полутону, переписывается в EF, а интервал «си—до», в котором расстояние равно тому же полутону, соответствует BC. Расположение нот, которые вы поете, теперь соответствует последовательным нотам, из которых состоит октава, если начинать ее с С и играть на белых клавишах фортепьяно. Если вы начнете играть ноты на любой другой клавише, кроме С, и будете нажимать последовательно белые клавиши, то и фортепьяно, и вы будете извлекать полутона в непривычных местах, а потому — звучание (фортепьяно, конечно, а не ваше) будет казаться вам ужасным.

Желательно быть способным играть гамму от любой точки на клавиатуре фортепьяно, например, для того, чтобы приспособить диапазон фортепьяно к конкретному человеческому голосу. По этой причине в каждую октаву вставлены пять черных нот, расстояния между «белыми» клавишами и «черными» клавишами равны одному полутону, что позволяет разбить любую октаву на пять больших интервалов. Это позволяет нам сохранить привычную последовательность двух (CD, DE) и трех тонов (FG, GA, AB) — тон, тон, полутон, тон, тон, тон, полутон — до всей клавиатуре. Теперь можно начинать играть гамму с любой клавиши фортепьяно, не важно — с черной или с белой; не забывайте только выбирать ноты тщательно и нажимать иногда черную, а иногда белую. И только если вы начинаете с С, вы можете сыграть всю гамму, всего лишь нажимая последовательно белые клавиши.

Именно по той причине, что С оказывается естественной до, игра в «ключе С» является самой простой для начинающих (главным образом — только белые клавиши). До первой октавы¹

¹ У нас принято отсчитывать интервалы от до большой октавы, частота которой равна 64/с, то есть частота до первой октавы равна 256/с. Однако в музыке более важной является не частота звука, а точное соотношение между звуками, то есть величина интервала. Поэтому данная разница не имеет большого значения. (Примеч. пер.)

является специфической нотой, которая находится примерно в середине клавиатуры фортепиано, частота этой ноты равна $264/\text{с}^4$.

Преобразование звука

Высота тона изменяется, если источник звука перемещается относительно слушателя. Предположим, что стоящий вдалеке поезд издает гудок, который имеет частоту $344/\text{с}$. В этом случае, когда звуковая волна достигает нас, в нашу барабанную перепонку каждую секунду будут ударять 344 комбинации сжатия/разрежения. Поскольку звук (при комнатной температуре) движется со скоростью 344 метра в секунду, последовательные области сжатия будут располагаться на расстоянии одного метра.

Предположим теперь, что поезд начинает быстро двигаться по направлению к нам со скоростью 34,4 метра в секунду (75,8 мили в час), или, иначе, — со скоростью, равной одной десятой скорости звука. Он все еще продолжает издавать гудок. Одна область сжатия перемещается перед ним; ко времени, когда она переместилась на один метр, испускается другая область сжатия. Однако к этому времени поезд продвинулся вперед на десятую часть метра, и вторая область сжатия будет находиться на расстоянии только 0,9 метра позади первой. Если поезд движется с постоянной скоростью, то же самое происходит и со всеми остальными последовательными областями сжатия. По этой причине наших барабанных перепонок достигает сначала первая область, а затем — следующая, но звуковые волны исходят от движущегося поезда, а потому вторая волна достигнет наших барабанных перепонок на 0,1 секунды раньше,



Клавиатура фортепиано

¹ Физики часто используют для C частоту $256/\text{с}$, потому что, такое число является степенью числа 2. Оно представляет собой $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$, или 2^7 .

то есть до нас доходит $344/0,9$, или 382 колебания. Человек, едущий на поезде и поэтому перемещающийся вместе с источником звука, получает за одну секунду все те же 344 области сжатия. Отношение $382/344$ близко к 9:8, так что звук гудка поезда представляется более пронзительным для человека, наблюдающего подход поезда, чем для человека, который едет на поезде, и разница составляет почти целый тон.

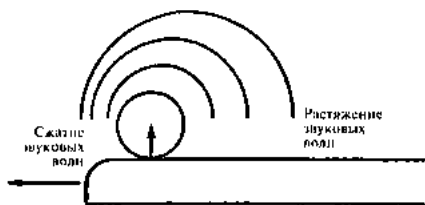
С другой стороны, если поезд удаляется от слушателя, то за то время, когда первая область сжатия переместилась на метр к слушателю, возникает новая область, поезд отдалится на десятую часть метра и расстояние между двумя областями сжатия будет 1,1 метра. Частота звука составит тогда $344/1,1$, или 312 раз в секунду. Теперь это ниже почти на целый тон, чем было бы слышно человеку на поезде.

Если бы мы стояли на перроне, то звук гудящего и проносящегося мимо нас поезда изменился бы внезапно: от частоты 382/с по мере приближения и прохождения к частоте 312/с по мере удаления. Это явление называется эффектом Доплера, названным так в честь австрийского физика Йоганна Кристиана Доплера (1803—1853), который первым изучил и дал правильное объяснение данному эффекту в 1842 году.

Высота тона также может изменяться и гораздо более тонким способом. Одна и та же нота, сыгранная с одной и той же громкостью на фортепьяно, скрипке или кларнете, звучит для нас по-разному. При наличии хотя бы минимального опыта мы можем легко определить, на каком из инструментов была сыграна данная нота. Эта разница в звуках, которые являются идентичными по высоте и громкости, определяется разницей в «качестве», или «тембре», звука.

Чтобы объяснить это, мы должны учесть, что колебания струны или любого другого устройства, производящего звук, на самом деле более сложные, чем я их описал. Струна, например, может действительно вибрировать целиком, чтобы создать вибрацию и поэтому звуковую волну данной частоты. По аналогии с поперечной волной это была бы простая синусоида и то, что называется «основным тоном». Именно основной тон мы обычно и имеем в виду, когда говорим о частоте какой-то специфической ноты.

Однако струна может вибрировать так же, как состоящая из двух половинок: одна половина смещается вправо, в то время как другая половина смещается влево, и наоборот; средняя же точка струны, разграничивающая эти две половины, выступает в роли неподвижного узла. Каждая из половинок струны вибрирует с частотой в два раза большей, чем частота целой струны, так



Эффект Доплера

что звучащий тон будет по высоте в два раза выше, чем основной тон. Струна может также вибрировать с периодом в три, четыре, пять и так далее раз меньшим, производя при этом тон в три, четыре, пять и так далее раз более высокий, чем основной. Все эти ноты более высоких частот называются «обертонами». Основной тон и различные обертоны звучат одновременно, и в реальности движение струны является их комбинацией. Основной тон остается доминирующим, но обертоны добавляют свои формы волны, и поэтому окончательная форма волны является гораздо больше сложной, чем простая синусоида. Кроме того, при различных условиях в струнах (пока мы не будем говорить о других источниках звука) обертоны могут обладать различной громкостью звука, в некоторых случаях обертон может даже звучать громче, чем основной тон, так что окончательная форма звуковой волны будет различной для разных инструментов. Разница в звучании является вполне достаточной, чтобы мы могли ее заметить при помощи наших барабанных перепонок.

Эту разницу можно усилить при помощи различных методов отбора некоторых обертонов и их последующего усиления. Давайте посмотрим, как это делается.

Один источник звуковых колебаний может заставить другой вибрировать совместно с ним, издавая ту же самую звуковую волну, что и первый, и воспроизводить тот же самый звук. Если вибрирующий камертон посадить на основание ручки вниз, то его звук внезапно становится громче, потому что теперь вместе с ним вибрирует все основание.

Такие «вынужденные колебания» не являются даже результатом прямого физического контакта между твердыми телами. Вполне достаточно косвенного контакта сквозь воздух. Данная вибрация создает пульсацию воздуха в виде продольных волн;

эти волны, в свою очередь, заставляют совместно вибрировать барабанную перепонку. Барабанная перепонка будет двигаться внутрь, когда на нее воздействует область сжатия, и наружу, когда на нее воздействует область разрежения; она способна отклониться на большие расстояния от положения равновесия, по мере того как области становятся более сжатыми или более разреженными. Таким образом, через такие принудительные колебания, при которых барабанная перепонка точно дублирует первоначальную вибрацию, благодаря сложному механизму восприятия звуков человеком (который мы не будем описывать здесь), мы способны судить о высоте тона, громкости и даже тембре звука.

Однако существуют случаи, когда некоторая определенная частота может быть «вызвана» на втором объекте еще более легко. Представьте себе, например, что вы раскачиваете качели с ребенком. Ребенок на качелях представляет собой разновидность маятника и имеет собственный период колебаний. Если вы начинаете последовательно, через произвольные интервалы времени подталкивать его, то иногда вы будете создавать встречное движение, «притормаживая» его, поскольку ваше движение и движение качелей будут направлены противоположно. Продолжая далее, вы обратите внимание на тот факт, что такие толчки расходуют большое количество вашей энергии. Однако если вы так рассчитали свои толчки, что прикладываете их в тот момент, когда качели начинают двигаться от вас, то есть они действуют вместе с собственными колебаниями качелей, то таким образом добавляете приращение к их скорости, все более увеличивая ее с каждым колебанием и с каждым ритмичным толчком. Потратив гораздо меньшее количество энергии, вы получите значительно более быстрое и расширенное колебание. (Когда рота солдат пересекает мост, звучит команда: «Сбить шаг!» Иначе если все солдаты идут в ногу, то может быть как в случае, когда сильный стук шагов роты совпал с собственным периодом колебаний моста, мост начал раскачиваться все больше и больше и в конечном итоге разрушился.)

Аналогичная ситуация существует и для звуковых волн. Звуковая волна определенного тона каждой своей областью сжатия и разрежения будет подталкивать другой объект. Если ритм «толчков и натяжений» не будет соответствовать периоду собственных колебаний объекта назначения, то вынужденные колебания могут быть получены только за счет затрат значительного количества энергии, используемой для того, чтобы преодолеть эти собственные колебания. Однако если частота звуковых колебаний соответ-

ствует периоду собственных колебаний объекта назначения, то последний начинает вибрировать все больше и больше. Это явление называется «резонансом» (от латинских слов, означающих «звучать снова»).

Любая данная звуковая волна произведет гораздо большее количество колебаний в объекте резонирования, чем в любом другом. фактически только объект резонирования может начать издавать звуковые волны достаточно громкие, чтобы быть слышимыми. Предположим, например, что вы поднимаете крышку пианино, открываете струны и нажимаете ногой на педаль громкости, чтобы дать возможность этим струнам свободно вибрировать. Теперь спойте короткую, громкую ноту. Только те из струн, которые вибрируют в частоте этой ноты, будут резонировать, и когда вы прекратите петь, то услышите, что пианино тихо отзывается той же самой нотой.

Звук музыкальных инструментов зависит от резонанса материалов, из которых они сделаны, их структура усиливает и добавляет богатую окраску к извлекаемым из инструмента звукам. Фортепьяно имеет специальный «резонансный щит», называемый «декой», находящийся под струнами и способный резонировать с различными нотами. Если бы дека не существовало, то звуки, которые издавали бы струны фортепьяно при игре на нем, были бы гораздо тише.

Естественно, эффективность звуковой отдачи резонирующих частей каждого инструмента является весьма различной для различных нот (однако резонирующие части инструментов делаются такими по форме и устройению, чтобы максимально совместить собственный период колебаний резонирующих частей музыкального инструмента со звуками, издаваемыми этим инструментом). Дерево, из которого делают скрипки, резонирует от нот, которые издает этот инструмент, но оно может еще более эффективно резонировать от некоторых обертонов. Не существует двух скрипок, которые имели бы точно ту же форму, совершенно ту же структуру древесины или были бы покрыты точно таким же лаком. Как результат, от инструмента к инструменту имеются тонкие различия в резонансе. Великий итальянский скрипичный мастер Антонио Страдивари (1644—1737) изготавливал скрипки, которые до сих пор приводят в отчаяние мастеров, пытающихся подражать его работам или копировать их, поскольку до сих пор не представилось возможным создать инструмент, который дублировал бы богатство их тона.

Сами звуки, которые мы издаем, производят резонансы в воздухе, заполняющем пустоты в горле, рту и в носовых полостях. Собственные колебания воздуха зависят от формы и раз-

мера полостей, а так как ни у каких двух индивидуумов эти полости не являются в точности теми же самыми по форме и размеру, то соответственно различаются и человеческие голоса; в то же время наше ухо обладает огромной избирательной способностью, позволяющей нам, например, распознать голос друга, кричащего нам из большой толпы.

Отражение звука

Рыбь на поверхности водяного резервуара поворачивают обратно, когда она ударится о стенку резервуара; если мы скажем, что, например, до удара она распространилась влево, то после контакта она продолжает распространяться вправо, подобно тому как отражается бильярдный шар, ударившись о борт стола. То, что произошло, называется «отражением» (*reflected*) жидкостной волны (от латинских слов, означающих «согнуться назад»).

Звуковые волны также могут отражаться. Например, они могут отразиться от стены горы. Если, стоя в долине, мы прокричим какое-то слово, то в первый раз мы услышим его практически мгновенно, по мере того как оно оставляет наши губы, поскольку воздух тут же передаст от губ до уха. Второй раз мы услышим его через несколько секунд, когда звуковая волна достигнет горы, отразится и пересечет долину второй раз. Это явление называется «эхо». При определенном расположении стен гор можно услышать эхо еще не один раз.

Подобное эхо можно услышать в туннелях, в больших пустых комнатах и в любых других местах, где поверхности состоят из твердого материала, который скорее отражает звук, чем поглощает его. В эллипсоидальных комнатах звук, произнесенный в одном фокусе эллипса, распространяется во всех направлениях; однако, отражаясь от различных частей стен и потолка, он снова концентрируется в другом фокусе эллипса. Двое людей, стоящие в фокусах, могут разговаривать шепотом, несмотря на то что они разделены большим расстоянием. Такие «шепталые галереи» всегда поражают тех, кто прежде никогда с ними не сталкивался.

В комнатах умеренного размера отрезок времени, за который звуковая волна распространяется до стены, отражается к противоположной стене, снова отражается по направлению к первой стене и так далее, является настолько коротким, что четко различимое эхо услышать невозможно. Вместо этого последовательность очень коротких эхо сливается в монотонный, глу-

кой шум, который может сохраняться в течение довольно значительного времени после того, как первоначальный звук уже прекратился. Это явление сохранения звука называется «реверберацией». Изучение поведения звука в определенных, заданных местах, особенно в отношении того, насколько возможно возникновение такой реверберации, называется «акустикой» (от греческого слова, означающего «слушать»), сам термин «акустика» иногда применяют и к изучению звука вообще.

Реверберация может создавать большие неудобства. Например, лектор может обнаружить, что его слова невозможно разобрать из-за затухающего звука его предыдущих слов. Оркестранты могут обнаружить, что все их усилия сошли на нет из-за того, что сыгранные ноты накладываются на те, которые играют в данный момент. Реверберацию можно уменьшить, если задропировать стены, использовать мягкий, пористый материал для потолка или даже просто присутствием в аудитории людей в зимней одежде. Когда звуковые волны проникают в маленькие промежутки в ткани или другом пористом материале, контакт перемещающихся молекул воздуха с твердыми частями материала происходит по чрезвычайно расширенной области. Трение резко увеличивается, и звуковая энергия преобразовывается в теплоту. Звуковые волны, другими словами, скорее поглощаются, чем отражаются.

Однако тут существует другая опасность — чрезмерное уменьшение реверберации. Если реверберацию приводят к слишком низкому уровню, то это создает эффект «мертвого звука». Обычно стремятся достигнуть времени реверберации, равного одной секунде или даже двум секундам, если помещение очень большое.

Звуковые волны не всегда отражаются или поглощаются (так же как и жидкостные волны), они могут огибать препятствия и продолжать двигаться вперед. Именно поэтому мы и не испытываем никаких трудностей, чтобы услышать кого-то, обращающегося к нам из-за дерева или из-за угла. Эта способность огибать препятствия не является характерной для любых видов волн.

В 1818 году французский физик Огюстен Жан Френель (1788—1827) смог показать, в рамках исследований о движении волн вообще, что от сравнительного размера длины волны и препятствия зависит — была волна отражена или нет. Когда препятствие было размером с длину волны или меньше, оно не отражало волну, волна вместо этого огибала препятствие. С другой стороны, если препятствие было значительно больше, чем длина волны, то волна отражалась от него.

Если мы рассмотрим повседневные звуки, которые нас окружают, и сопоставим их с частотами, скажем, в средней части

клавиатуры фортепьяно, то они попадут в диапазон от до большой октавы до до третьей октавы, то есть в диапазон четырех октав. Диапазон частот простирается от 66/с до 1056/с. Если мы воспользуемся уравнением 12.2, то увидим, что диапазон длин волн по этим четырем октавам — от 5,2 до 0,32 метра (примерно — от 1 до 18 футов). Размер физических препятствий, которые мы обычно встречаем в жизни, попадает в пределы этого диапазона размеров, и поэтому они не отражают звук в большой степени, а звук огибает их.

Это огибание, конечно, более вероятно для более низких звуков, чем для более высоких. Мы судим о направлении звука по разнице в их громкости по отношению к нашим двум ушам. Автоматически мы поворачиваем голову до тех пор, пока оба наших уха не услышат звук с равной громкостью. Наша голова достаточно крупная для того, чтобы отражать в небольшой степени пронзительный звук, приходящий к нам с одной стороны. Тогда возникает значительная разница во времени доступа для звука, приходящего к одному уху, и для другого, огибающего нашу голову по пути к другому уху. Поэтому нам не представляет никаких трудностей определить местонахождение ребенка, зашедшегося пронзительным криком. С другой стороны, звуки глубокого тона, например низкого регистра органа, легко двигаются вокруг нашей головы и одинаково интенсивны в обоих ушах. Звук кажется нам приходящим со всех сторон; это добавляет органу возвышенности и величественности.

Полный диапазон фортепьяно охватывает 7,5 октавы. Самая низкая нота в этом диапазоне обладает частотой 27,5/с и длиной волны 12,5 метра. Мы можем слышать даже еще более низкие звуки, однако обычно пределом слышимости является 15/с звук с длиной волны 22 метра. Самая высокая нота фортепьяно обладает частотой 4224/с и длиной волны 0,081 метра, или 8,1 сантиметра. Ухо взрослого человека способно слышать звуки с частотой вплоть до 15 000/с (длина волны равна 2,2 сантиметра), а ребенок может иногда слышать частоты высотой до 20 000/с (длина волны равна 1,7 сантиметра). Такие чрезвычайно пронзительные звуки очень хорошо отражаются объектами, которые слишком малы для того, чтобы отражать звуки в среднем звуковом диапазоне. Высокий по тону скрип сверчка может быть так хорошо отражен различными объектами, что почти невозможно точно определить, откуда доносится первоначальный звук.

Несомненно, различные объекты могут вибрировать с частотой меньше чем 15/с и больше чем 20 000/с; когда это случается, то получаемые в результате звуковые волны нам не слышны. Те звуковые волны, которые находятся ниже порога нашего

слухового восприятия, называются «инфразвуковыми волнами» (*infrasonic* — от латинских слов, означающих «ниже звука»), в то время как те волны, которые являются слишком высокими для того, чтобы мы их слышали, называются «ультразвуковыми волнами» (*ultrasonic* — от латинских слов, означающих «выше звука»). В повседневной жизни более приняты упрощенные названия: «инфразвук» и «ультразвук».

Инфразвуковые волны играют сравнительно незначительную роль в повседневной жизни, кроме случаев, когда они становятся достаточно энергичными, чтобы нанести физические повреждения, например при землетрясениях. Ультразвуковые же волны воздействуют на нас более часто и различными способами. Во-первых, они неслышимы не для всех форм жизни; многие животные могут и слышать их, и воспроизводить. «Беззвучные» свистки, на которые реагируют собаки, производят волны ультразвуковой частоты, которые мы не слышим, но которые прекрасно слышат собаки. Поющая канарейка воспроизводит ультразвуковые волны, которые, несомненно, очень украсили бы ее песни, если бы мы могли их слышать. Писк мыши содержит ультразвук, который мы не слышим, зато его слышит кот, что весьма увеличивает эффективность его охоты.

Ультразвуковые волны, длины волн которых даже короче, чем таковые самых пронзительных звуков, которые мы можем слышать, весьма эффективно отражаются даже достаточно маленькими объектами. Летучие мыши пользуются преимуществами этого факта. При полете они испускают непрерывный писк, который представляет собой ряд ультразвуковых импульсов с частотами от 40 000 до 80 000/с, то есть с длиной волны от 8 до 4 миллиметров. Даже тонкий прутик или мелкое насекомое будут иметь тенденцию отражать звуки столь короткой длины волны; летучая мышь, чей писк имеет чрезвычайно короткую продолжительность, ловит слабое отраженное от предметов эхо. Таким образом, летучая мышь летит на слух и может точно и эффективно продолжать полет, даже в условиях полной слепоты. Процесс, посредством которого летучая мышь ориентируется в пространстве, называется «эхолокацией».

Люди научились использовать этот эффект, испуская при помощи специального прибора пучки ультразвуковых волн под водой. Они отражаются от различных морских объектов: дна моря, выступов на нем, камней, лежащих на морском дне, или плывущих косяков рыбы или субмарин. Такой прибор называется «гидролокатором» или «сонаром». SONAR (*Sound Navigation And Ranging*) — это аббревиатура, расширяющаяся как «звуковая навигация и размерность» (в данном случае слово

«размерность» означает определение геометрических размеров тел, но, зная геометрические размеры и скорость распространения звука в воде, мы всегда можем определить и расстояние до объекта).

Глава 13

ТЕМПЕРАТУРА

Тепло и холод

Несколько раз в данной книге я упоминал понятие теплоты, особенно в конце седьмой главы, когда рассматривал сохранение энергии. Однако я не остановился на этом понятии и не стал рассматривать его подробно, так как для этого сначала требовалось подробно рассмотреть свойства жидкостей и особенно газов. Теперь мы уже достаточно хорошо познакомились с этими свойствами, а поэтому желательнее опять вернуться к рассмотрению понятия «теплота».

Теплота наиболее хорошо знакома нам по личным ощущениям. Мы чувствуем горячее и холодное и знаем, что подразумеваем, когда говорим, что один объект «более горячий», чем другой. Характеристика объекта, которая определяет, насколько данный объект горячий или холодный, называется его «температурой».

Температура имеет огромное значение для физиков, потому что очень многие из свойств материи, с которой они имеют дело, изменяются вместе с температурой. В предыдущей главе, например, я упомянул, что скорость звука изменяется в зависимости от температуры. Еще, например, объем данной массы воды увеличивается, когда температура ее находится вблизи точки кипения, а значит, плотность ее уменьшается. Горячая вода обладает более слабыми силами сцепления, чем холодная, так же ведут себя и вязкость, и поверхностное натяжение, которые уменьшаются по мере повышения температуры. Даже такие кажущиеся неизменяемыми величины, как длина железного прута, тоже изменяются в зависимости от температуры.

Из этого всего следует, что, если физик собирается сделать некие надлежащие обобщения, рассматривающие всю Вселенную, он должен знать, как свойства материи изменяются в зависимости от температуры, и, конечно, должен быть способен точно измерить эту температуру. Наши субъективные чувства недостаточны точны в зависимости от разных условий и иногда чрезвычайно неточны, поэтому для этой цели они непригодны.

Например, полированная металлическая поверхность, подвергнутая воздействию температуры замерзания воды, при прикосновении будет казаться нам намного более холодной, чем полированная деревянная поверхность, подвергнутая воздействию тех же самых условий. Еще больший парадокс можно получить в результате известного эксперимента. Если вы поместите одну руку в ледяную воду, а другую руку — в горячую и поддержите их там в течение нескольких секунд, затем поместите обе руки в один и тот же сосуд с теплой водой, вы будете одновременно чувствовать, что теплая вода стала горячей (вашей холодной рукой) и холодной (вашей горячей рукой).

Поэтому появляется необходимость в средствах, которые позволили бы объективно измерять величину температуры. Логический метод состоит в том, чтобы найти некое свойство, которое изменяется в очевидно однородной манере одновременно с изменением температуры, а затем связать установленные изменения в температуре с установленными изменениями в этих свойствах. Для этой цели физики используют множество различных температурно зависимых свойств, но наиболее часто используемое свойство, характерное для диапазона температур, с которым мы встречаемся в повседневной жизни, — это свойство объемного расширения. Объем данной массы материи обычно увеличивается с повышением температуры и уменьшается по мере ее падения. (Я говорю «обычно», потому что и из этого правила встречаются некоторые исключения.)

В случае жидкостей и твердых тел изменение в объеме в зависимости от температуры весьма невелико и фактически неразличимо глазом. Таким образом, стальной прут длиной в один метр при нагревании его от температуры таяния льда до температуры кипения воды увеличится в длине на один миллиметр, то есть на одну тысячную часть. Так как расширяющийся прут обладает объемом, то другие измерения также увеличатся на одну тысячную часть, и если стальной прут обладает круглым сечением с радиусом в один сантиметр, то этот радиус увеличится на одну сотую миллиметра.

Несмотря на то что такие изменения крайне невелики, не следует недооценивать их значительность. Длинные металлические прогоны типа тех, что используют в мостах, или длинные рельсы типа тех, что используют на железнодорожных путях, расширятся и согнутся под горячим летним солнцем, если жестко закрепить оба их конца. Чтобы избежать этого, между сопряженными деталями оставляют небольшое свободное пространство, куда они могли бы расширяться. Даже незначительное изменение в длине маятника часов слегка изменит его пе-

риод, поскольку этот период зависит от его длины. Ошибка в измерении времени, которая этим вызвана, является совокупной и создает необходимость периодической корректировки часов летом, несмотря на то что при более холодных температурах они показывают точное время.

При одном и том же изменении температуры разные материалы расширяются по-разному. Сплав железа и никеля (в соотношении от 5 до 3), например, расширяется только на одну десятую того, что показали бы железо или сталь. По этой причине такой сплав весьма полезен, чтобы делать из него измерительные ленты, прутки стандартной длины и так далее. Поскольку его длина более постоянная, чем таковая у большинства металлов, торговое название для этого сплава — инвар¹.

Стекло расширяется в зависимости от температуры почти в той же степени, что сталь. Если стеклянный сосуд подвергнуть значительному температурному воздействию, одна часть этого сосуда будет расширяться (или сокращаться), в то время как другая часть, на которую температура еще не воздействует, останется в прежнем состоянии. По абсолютному значению, это расширение или сокращение будет весьма невелико, но его будет достаточно для того, чтобы создать внутреннее напряжение, которому силы сцепления стекла не способны противостоять, поэтому стекло треснет.

Одним из путей решения этой проблемы является использование относительно тонкого стекла, чтобы при нагревании одной части сосуда другая часть также нагревалась достаточно быстро². Более удачный путь состоит в том, чтобы использовать боросодержащее стекло, обычно известное под торговым названием «пирекс», который при том же изменении температуры изменит свой объем только на треть от того, насколько изменится обычное стекло. Поэтому пирексное стекло гораздо более устойчиво к изменениям температуры; они вызывают в нем гораздо меньше внутренние напряжения. Таким образом, не требуется приносить в жертву температурной стабильности ни его толщину, ни механическую прочность. Кварц обладает еще меньшей тенденцией к изменению своего объема в зависимости от температуры (меньшей даже, чем у инвара), а потому еще более пригоден для этой цели. Кварцевый сосуд можно нагреть «докрасна», затем погрузить в ледяную воду, и он выйдет из этого испытания неповрежденным.

¹ От английского слова, означающего «неизменяемый». (Примеч. пер.)

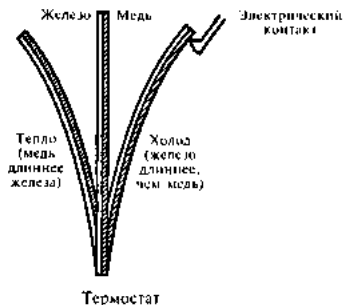
² Для того чтобы нагреть все стекло, требуется значительное время, поскольку оно обладает очень низкой теплопроводностью.

Однако, несмотря на поразительные эффекты, которые вызывает это небольшое изменение объема, они остаются ничтожными по фактическому размеру. Чтобы использовать их для измерения температуры, нужно каким-то образом их усилить, в противном случае для измерения температур они становятся непригодными. К счастью, для усиления небольших объемных расширений существуют достаточно простые методы.

Один метод состоит в том, чтобы спаять вместе ленты из двух различных металлов, например железную и медную. При данном изменении температуры изменение в объеме (и поэтому в длине) медной ленты составит величину почти в два раза большую, чем у железной ленты того же размера. Если две металлические ленты не спаять вместе, медь расширится под влиянием увеличения температуры и выскользнет из-под железа, которое расширится крайне незначительно, и станет крайне длиннее, хотя изначально обе полоски были равной величины. Если же вместо нагрева мы применим охлаждение, то опять же, сократившись, медная полоска станет короче железной, несмотря на то что изначально они были равной длины; медь сильно уменьшается с охлаждением, а железо — на весьма ничтожную величину; таким образом, медная полоска проскользнет под железную.

Однако эти две металлические ленты сварены вместе, и медь не может скользить по железу. Что же тогда происходит? Случается то, что при нагревании сваренные ленты («биметаллическая пластина» или «биметаллический стержень») сгибаются в направлении железа. В этом случае медь лежит по внешней стороне кривой, а железо — по внутренней. Так как внешняя сторона является более длинной, чем внутренняя, это позволяет медной полоске быть более длинной, чем железная, при сохранении целостности сварки. По мере падения температуры пластина распрямляется и при достижении исходной температуры снова становится прямой. Если же температура продолжает опускаться, то биметаллическая пластина изгибается в направлении меди, которая теперь находится на внутренней стороне кривой, а то время как железо находится на внешней стороне.

Если такая биметаллическая пластина закреплена с одного конца, то другой конец движется из стороны в сторону в зависимости от влияющей на него температуры. Несмотря на то что внешняя сторона изогнутой ленты очень не намного более длинная, чем внутренняя, даже небольшое увеличение длины приводит к резкому уменьшению радиуса кривизны. По этой причине даже небольшая разница в температуре, производя очень маленькие различия в длине между железом и медью, в то же время значительно изменяет изгиб.



Устройство такого типа может использоваться как термостат. Когда температура в доме падает, биметаллическая лента начинает изгибаться, скажем налево, и при некоторой температуре этого изгиба становится достаточно для того, чтобы замкнуть электрический контакт, который включает обогреватель. Как только дом нагревается, биметаллическая пластина изгибается назад, размыкает контакт и, таким образом, выключает нагреватель. Изменяя положение электрического контакта (что достаточно легко осуществить), мы можем добиться того, чтобы биметаллическая пластина включала нагреватель при любой заданной температуре.

Опять же положение свободного конца такой биметаллической полоски может использоваться для измерения температуры. Если мы закрепим на ней пилочное перо, поместим под него вращающийся с постоянной скоростью барабан с бумагой, то получившееся устройство будет показывать текущее значение температуры, а мы можем всегда увидеть изменение ее от заданной позиции.

Маятник опять же может быть спроектирован таким образом, чтобы его подвес был выполнен не из одного металла, а из двух, скажем из железа и цинка. Они могут быть соединены между собой горизонтальными пластинами таким способом, чтобы температурные изменения в цинке старались удлинить маятник, а в то время как температурные изменения в железе — сократить его. Совместным действием такого механизма было бы поддержание неизменной длины маятника независимо от температуры окружающей среды. Такое устройство называется «компенсированным маятником».

Температурные шкалы

Общепринятым методом усиления объемного расширения в целях измерения температуры является использование не твердых тел, а жидкостей. Представьте себе сферический сосуд, из которого откачан воздух, с идущей из него вверх тонкой трубкой постоянного диаметра. Сосуд вмещает достаточно жидкости, чтобы полностью заполнить сферу, но трубка остается пустой и содержит только вакуум. Если жидкость нагреть, ее объем увеличится, и у нее не будет никакого выхода, кроме как подниматься вверх по трубке. Объем жидкости, который поднимается по трубке, можно посчитать по обычной формуле для объема цилиндра, $V = \pi r^2 h$, где r — радиус цилиндрической трубки, а h — высота, до которой повышается жидкость. Для данного объема чем меньше значение радиуса трубки, тем на большую высоту поднимется по ней жидкость. Из этого следует, что даже при том, что дополнительный объем жидкости (который возникает благодаря температурному расширению) очень невелик, изменение в высоте уровня жидкости в трубке можно сделать весьма значительным, стоит только уменьшить до нужной величины радиус трубки. С тем, чтобы отградуировать шкалу, отражающую изменение высоты жидкости в трубке в зависимости от изменения температуры, тоже нет никаких трудностей.

Устройство, сделанное по принципу расширения жидкости из резервуара в тонкую трубку, используется для измерения температуры. Оно называется «термометр» (от греческих слов, означающих «меру теплоты»). Такие термометры были сначала изобретены в XVII столетии; тогда в них использовались разнообразные жидкости. Вода, естественно, была одной из первых. К сожалению, при изменении температуры вода расширяется неравномерно. Фактически она достигает точки максимальной плотности и минимального объема при температуре, которая находится чуть выше ее точки замерзания. Если мы будем далее понижать температуру, то вода будет расширяться до тех пор, пока температура не достигнет точки замерзания; тогда она замерзнет (и при этом расширится еще больше, поскольку плотность льда меньше, чем плотность воды, почти на десять процентов). Кроме того, вода остается жидкостью в сравнительно маленьком температурном диапазоне и бесполезна для температур ниже ее точки замерзания или выше точки кипения. Этиловый спирт, также используемый в термометрах, остается жидкостью при температуре гораздо ниже той, при которой замерзает вода, однако кипит при температуре даже более низкой, чем температура кипения воды.

Кроме того, и вода, и этиловый спирт смачивают стекло. По мере того как высота жидкости падает с понижением температуры, какая-то часть жидкости остывает на трубке, спелившись со стеклом, а затем медленно опускается вниз. При этом происходит медленное повышение уровня жидкости и трудно решить, происходит это из-за повышения температуры или из-за того, что жидкость сочится вниз.

Первым, кто решил использовать в термометрах в качестве жидкости ртуть, был немецкий физик Даниель Габриель Фаренгейт (1686—1736), и это произошло в 1714 году. Точка замерзания ртути находится значительно ниже точки замерзания воды, а ее точка кипения — значительно выше; кроме того, при повышении температуры ртуть расширяется очень плавно. (Одним из путей оценки этого является то, что мы можем отметить согласованность между изменением объема ртути и другими изменениями в материи вещества, которые говорят об изменении температуры. Более разумно было бы предположить, что все эти изменения взаимосвязаны с изменением температуры, а не получены путем случайных совпадений.) Наконец, ртуть не смачивает стекло, а потому медленно стекающие остатки ртути не оказывают влияния на высоту ртутной колонки.

Как только мы получили легко видимое свидетельство изменения измеряемой температуры — посредством повышения и падения ртутного столбика в узкой трубке термометра, следующим этапом стало градуирование этого термометра, то есть необходимость связать некоторые определенные числовые значения с определенными положениями столбика термометра.

При нормальном атмосферном давлении, например, лед плавится при вполне определенной температуре, и резонно полагать, что эта температура одинакова везде и всегда. (По крайней мере, пока не будет доказано противоположное.) Точно так же при нормальном атмосферном давлении вода всегда кипит при определенной температуре, которая одинакова везде и всегда. Если поместить термометр в тающий лед, то можно поставить отметку на том уровне, на который поднимется ртутный столбик; можно также поставить другую отметку на том уровне, на который поднимается ртутный столбик, когда мы погружаем термометр в кипящую воду. Таким образом, все люди могут поставить эти две отметки на своих термометрах, и они будут «совместимы между собой», то есть «будут говорить на одном языке». Как только мы получили две такие отметки, мы можем поделить расстояние между ними на некие равные части, или, как их называют, «градусы».

К сожалению, метод, которым воспользовался Фаренгейт для установления точки отсчета, непосредственно не вовлекал ни точку таяния льда, ни точку кипения воды. Для определения нулевой точки он использовал смесь льда и соли, которая показала ему самую низкую точку замерзания, которую он мог получить, а для другой точки он использовал температуру человеческого тела. Он закончил тем, что связал точку замерзания чистой воды с числом 32, а точку закипания воды — с числом 212. (Как вы знаете, эти числа разделены 180 градусами.) Получившаяся шкала называется «шкалой Фаренгейта», а измерения по этой шкале делаются в «градусах Фаренгейта», или сокращенно «°F». Таким образом, точка замерзания воды равна 32 °F, а точка кипения воды равна 212 °F. Нормальная температура человеческого тела равна 98,6 °F, а комнатная температура, при которой человек чувствует себя комфортно, равна примерно 70 °F.

Если температура опускается ниже отметки 0 °F, то говорят, что «сейчас столько-то градусов ниже нуля», или используют для обозначения температуры знак «минус». Таким образом, этиловый спирт замерзает при температуре 179° ниже нуля по Фаренгейту, или при -179 °F.

В 1742 году шведский астроном Андерс Цельсий (1701—1744) ввел в использование другую шкалу, в которой точка замерзания воды была связана с нулем, а точка кипения воды — с 100, таким образом, эти точки разделены величиной в сто градусов. Эта шкала называлась «стоградусной шкалой» (*Centigrade* — от латинских слов, означающих «сотня градусов»), но в 1950-х годах было принято решение увековечить память изобретателя, переименовав эту шкалу в «шкалу Цельсия». Когда мы используем «стоградусную шкалу», или «шкалу Цельсия», то обозначаем полученные значения в «°C». По шкале Цельсия точкой плавления льда, или точкой замерзания воды, является 0 °C, а точка кипения воды равна 100 °C.

Шкала Цельсия гораздо более удобна для различных ученых, потому что промежуток от 0 до 100 хорошо согласуется с десятичной природой метрической системы, а также потому, что на всем этом протяжении температур вода остается жидкой, что особенно важно для химиков. Именно шкала Цельсия является универсальной шкалой температур, которую используют все ученые.

Однако в повседневной жизни в Соединенных Штатах и Великобритании продолжают использовать шкалу Фаренгейта, которая имеет по крайней мере одно преимущество — диапазон от 0 до 100 градусов по шкале Фаренгейта охватывает весь

обычный диапазон температур в мире. Метеорологи, использующие шкалу Цельсия, часто должны оперировать отрицательными числами, но, когда они используют шкалу Фаренгейта, необходимость в этом случается крайне редко.

Так как в Соединенных Штатах и Великобритании используются обе шкалы, полезно уметь конвертировать одну в другую. Итак, начнем с того, что в диапазоне температур между точкой замерзания воды и точкой кипения воды располагаются 180 градусов Фаренгейта и 100 градусов Цельсия. Очевидно, что градус Цельсия — больший из двух и равен $\frac{100}{180}$, то есть $\frac{5}{9}$ градуса Фаренгейта. И наоборот, градус Фаренгейта равен $\frac{180}{100}$, или $\frac{9}{5}$ градуса Цельсия.

Этого было бы достаточно, если бы обе шкалы имели общую точку отсчета, то есть нулевую точку, но это — не так. Если градусы Цельсия умножить на $\frac{9}{5}$, то в результате мы получим число градусов Фаренгейта, но не выше 0 °F, а выше 32 °F (поскольку 32 °F эквивалентны 0 °C). По этой причине к полученному результату следует прибавить 32. Другими словами:

$$F = \frac{9}{5}C + 32. \quad (\text{Уравнение 13.1})$$

Чтобы перевести значения по шкале Фаренгейта в градусы по шкале Цельсия, необходимо всего лишь решить уравнение 13.1 для C, ответом будет:

$$C = \frac{5}{9}(F - 32). \quad (\text{Уравнение 13.2})$$

Расширение тел

Как только появилась возможность точного измерения температуры, стало возможным точно выражать и температурно зависимые изменения. Можно четко выразить, что означает «за столько-то градусов Цельсия» (фраза, которую можно сократить до «в °C» или «/°C»).

Например, предположим, что мы измеряем изменение длины прутка в зависимости от изменения температуры. В этом случае мы можем вычислить, чему равно приращение в длине прутка при нагревании его на 1 °C. Такое увеличение длины называется «коэффициентом линейного расширения» тела.

Величина коэффициента линейного расширения тела изменяется в зависимости от того, из какого материала состоит это тело, но, как правило, является очень малой. Для стали, например, она равна 0,00001/°C, или, если выразить в экспоненци-

альной форме: $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Это означает, что прут длиной в один метр при нагревании на один 1°C расширится на величину, равную 0,00001 метра, прут длиной в один километр расширится на величину, равную 0,00001 километра, прут длиной в один сантиметр расширится на величину, равную 0,00001 сантиметра, и так далее. (Примеры некоторых других коэффициентов линейного расширения: $1,9 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ для меди, $2,6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ для алюминия и всего лишь $0,04 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ для кварца.)

Предположим, что мы обозначим коэффициент линейного расширения тел греческой буквой «альфа» (α). Если мы возьмем прутков длиной, равной при некоторой начальной температуре одному метру, поднимем эту температуру ровно на 1°C , то длина его увеличится на α метров и составит $1 + \alpha$ метров. Если мы поднимем температуру на 2°C , то расширение составит вдвое большую величину, так что полная длина теперь становится равной $1 + 2\alpha$, при повышении температуры на 3°C полная длина составит $1 + 3\alpha$. Короче говоря, для получения величины, на которую увеличивается длина тела, следует умножить значение α на то количество градусов, на которые изменяется температура.

В физике и в математике общепринято обозначать изменение в значении величины греческой буквой «дельта» (Δ). Если мы обозначим температуру символом t , то можем записать изменение в температуре как Δt (обычно читается — «дельта т»). Другими словами, мы можем представить длину одномерного прутка после некоторого повышения температуры как $l + \alpha(\Delta t)$.

Естественно, если температура, вместо того чтобы повышаться, падает, то значение Δt становится отрицательным, соответственно и $\alpha(\Delta t)$ — тоже. Выражение $l + \alpha(\Delta t)$ тогда становится меньше единицы, что является совершенно правильным — ведь при охлаждении размеры прутка уменьшаются.

Предположим теперь, что мы взяли двухметровый прутков. Мы можем рассматривать его как состоящий из двух однометровых прутков, соединенных вместе. Каждая однометровая половина после изменения температуры имеет полную длину, равную $l + \alpha(\Delta t)$, и поэтому полная длина прутка равна $2[l + \alpha(\Delta t)]$. То же можно показать и для прутка любой другой произвольной длины. Фактически если мы обозначим длину прутка L , тогда после некоторого изменения в температуре, равного Δt , его длина составит $L [1 + \alpha(\Delta t)]$ или, перемножив, получаем $L + L\alpha(\Delta t)$.

Теперь зададим себе вопрос: «Какое изменение в длине соответствует изменению в температуре?» Естественно было бы обозначить изменение в длине как ΔL , тогда изменение в длине будет равно длине после изменения температуры минус пер-

воначальная длина. То есть это будет $L + L\alpha(\Delta t) - L$, и окончательная формула, которую мы получаем, будет выглядеть:

$$\Delta L = L\alpha(\Delta t). \quad (\text{Уравнение 13.3})$$

Однако с повышением температуры материя расширяется не только по длине, но и во всех других направлениях, поэтому гораздо важнее знать изменение в объеме тела, а не только в его длине. В жидкостях и газах мы вообще можем измерить только изменение в объеме. Что же касается твердых тел (особенно когда тело представляет собой длинный прут), то часто гораздо проще измерить линейное расширение, а уже из него вычислить объемное расширение.

Начнем с того, что примем утверждение, что коэффициент линейного расширения для данного материала имеет одно и то же значение для ширины и высоты тела, как и для его длины¹. Предположим, что мы взяли тело размером в один кубический метр (то есть его длина, ширина и высота равны одному метру каждая). После повышения температуры на 1°C его длина станет равной $1 + \alpha$ метров. Однако его ширина также увеличится и станет равна $1 + \alpha$ метров, то же самое справедливо и для его высоты. Начальный объем тела был равен 1^3 метров (понятно, что $1^3 = 1$), теперь он стал равен $(1 + \alpha)^3$ кубических метров. При изменении температуры на 1°C объем тела изменяется на $(1 + \alpha)^3 - 1^3$, или на $(1 + \alpha)^3 - 1$. Эта величина характеризует изменение объема тела в зависимости от изменения температуры и называется «коэффициент объемного расширения».

Величина $(1 + \alpha)^3$ может быть по обычным алгебраическим правилам выражена в виде: $1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$. Из этого выражения мы вычитаем 1 и получаем, что коэффициент объемного расширения тела равен $3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$, в этом выражении α — очень маленькая величина, как мы это уже отмечали в случае твердых тел и жидкостей, соответственно α^2 и α^3 — еще

¹ Данное утверждение не всегда строго истинно... монокристалл может расширяться на различные величины в различных направлениях в зависимости от существующих взаимосвязей между составляющими его молекулами и атомами. В этом отношении кристалл может иметь и многие другие свойства, которые будут изменяться в зависимости от направления. То есть с этой точки зрения он «анизотропен». Однако существующие вокруг нас обычные материалы, как правило, не являются кристаллическими, или если они и кристаллические, то они составлены из несметного количества крошечных кристаллов, каждый из которых связан с другими такими же. Но тогда свойства кристаллов будут в среднем одинаковые во всех направлениях, а материя будет «изотропной». Мы обычно рассуждаем о свойствах окружающей нас материи, как будто она изотропна, потому что это проще в рассмотрении, но не стоит забывать, что анизотропия не является очень редким явлением. Например, все мы знаем, что намного легче расколоть деревянный брусок «по волокнам», чем «против волокон».

гораздо меньшие величины¹, которые можно игнорировать как не вносящие существенного изменения в выражение. Тогда если мы отбросим квадрат и куб α , то можем с весьма достаточной точностью сказать, что коэффициент объемного расширения равен 3α , то есть утроенному коэффициенту линейного расширения. Таким образом, если коэффициент линейного расширения стали равен $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, то его же коэффициент объемного расширения примерно равен $3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент объемного расширения жидкостей приблизительно в десять раз больше, чем таковой для твердых тел, и значительно выше для газов. Как выяснилось, именно для газов коэффициент объемного расширения имеет самое большое теоретическое значение.

Еще Галилео понял, что газы расширяются по мере повышения температуры и сжимаются по мере ее понижения; основываясь на этом факте, он даже попробовал сделать термометр. Он взял нагретый стеклянный сосуд с вертикальным тонким отводом, открытым сверху, и перевернул его вверх ногами, погрузив в воду. По мере того как вода охлаждалась, газ в закрытой полости сжался, и вода частично опустилась вниз по отводу. Далее если температура повышалась, то газ, находящийся в сосуде, расширялся, подталкивая водяной столбик вниз. То есть если температура понижалась, уровень воды повышался. К несчастью для Галилео, на уровень воды в отводе также воздействовали изменения в атмосферном давлении, так что его термометр был не совсем точным. Однако принцип взаимосвязи между изменениями в объеме газа и изменениями температуры был установлен.

Если все это так, то объем газа, находящегося под ртутной колонкой (как в экспериментах Бойля), стал бы расширяться при нагревании или сжиматься при охлаждении. Это означает, что если мы изучили изменения в поведении некоторого объема газа под воздействием изменений в давлении, то мы бы поняли необходимость сохранения газа при постоянной температуре. В противном случае в газе начнут происходить из-

¹ Это может сразу не показаться очевидным. Однако если число больше единицы, то квадрат и куб данного числа — еще большие величины. Чем больше число, тем больше становятся и его квадрат, и куб. Таким образом, 10 в квадрате равно 100, а 10 в кубе — 1000. В то же время 100 в квадрате равно 10 000, а 100 в кубе — 1 000 000. Положение кардинально меняется для чисел меньше единицы. Квадрат и куб таких чисел становятся тем меньше, чем больше степень, в которую возводится число, с другой стороны, чем меньше исходное число, тем меньше становятся его квадрат и куб. Таким образом, $1/10$ в квадрате равно $1/100$, а $1/10$ в кубе равно $1/1000$. Если мы вернемся к рассматриваемому коэффициенту теплового расширения стали, который численно равен $1/1000000$, то увидим, что его квадрат равен $1/1000000000000$ и куб — $1/1000000000000000$.

менения, за которые давление неответственно. Сам Бойль, при формулировке того, что мы теперь называем «законом Бойля», не отразил этот факт. Однако в 1676 году, через десять лет после экспериментов Бойля, французский физик, Эдм Мариотт (1620?—1684), независимо от Бойля приведший к таким же результатам, отметил важность поддержания постоянной температуры. По этой причине в европейских научных кругах принято (и это справедливо) называть соотношения давления и объема, впервые открытые Бойлем, «законом Бойля—Мариотта».

Первая попытка изучения количественного расширения газов в зависимости от изменения температуры была предпринята в 1699 году. Французский физик Гильом Амонтон (1663—1705) доказал, что в замкнутом сосуде при повышении температуры повышается давление газа и что величина, на которую поднимается давление, зависит от температуры и не зависит от массы вовлеченного газа.

Однако Амонтон мог работать только с воздухом, поскольку в его время воздух был единственным по-настоящему доступным газом. Но уже в XVIII столетии было получено, описано и изучено множество газов. В 1802 году французский химик Жозеф Луи Гей-Люссак (1778—1850) не только определил коэффициент объемного расширения воздуха, но и показал, что различные общеизвестные газы, типа кислорода, азота и водорода, имеют примерно один и тот же коэффициент объемного расширения.

(Это было весьма удивительно, так как коэффициент объемного расширения хотя бы немного, но изменяется от одного твердого тела к другому и от одной жидкости к другой. Таким образом, коэффициент объемного расширения алюминия в 77 раз больше, чем у кварца, а у метилового спирта — в 6 раз больше, чем у ртути.)

Оказалось, что коэффициент объемного расширения газов равен 0,00366 при 0 °С, что приблизительно составляет величину, в 300 раз превышающую аналогичный средний показатель для твердых тел. Уравнение 13.3 может быть приспособлено, чтобы отражать расширение газов. Для этого мы заменим длину на объем (V), а коэффициент объемного расширения (0,00366, или $1/273$) подставим вместо коэффициента линейного расширения. Сделав так, мы получим, что изменение в объеме газа (ΔV) связано с изменением в его температуре от 0 °С (Δt), следующим выражением:

$$\Delta V = 0,00366V(\Delta t) = \frac{V(\Delta t)}{273}. \quad (\text{Уравнение 13.4})$$

Это один из способов выражения закона Гей-Люссака. Как это иногда случается, французский физик Жак Александр Сезар Шарль (1746—1823) утверждал, что пришел к тем же выводам, что и Гей-Люссак, еще в 1787 году. Он не издавал их ни тогда, ни позже, и обычно открытие не считается засчитанным, если оно не опубликовано. Но, несмотря на это, приведенное выше отношение часто называют «законом Шарля».

Абсолютная температура

Тот факт, что объекты расширятся и сжимаются в зависимости от изменения температуры, поднимает интересный вопрос. Легко увидеть, что объект будет неопределенно много расширяться при увеличении температуры, но будет ли он так же сильно сжиматься, если понижать температуру на неопределенно большую величину? Если будет сжиматься с постоянным коэффициентом, сможет ли он сжаться до такой степени, что его объем станет равен нулю? И что тогда?

Этот парадокс наиболее остро встает при рассмотрении газов, которые с уменьшением температуры сжимаются более быстро, чем это делают жидкости или твердые тела. Объем газа после некоторого изменения в температуре от 0°C равен первоначальному объему при 0°C плюс изменение в объеме: $(V + \Delta V)$.

Предположим тогда, что температура опустилась на 273 градуса ниже 0°C . В том случае Δt будет равно -273 . Из уравнения 13.4 мы видим, что ΔV в этом случае будет равно $V(-273)/273$, или $-V$. В результате новый объем, который равен $(V + \Delta V)$, будет равен $(V - V)$, или нулю. Строгое применение закона Гей-Люссака показывает, что при достижении температуры -273°C объем газов станет равным нулю.

Однако такая возможность не заставила физиков запаниковать. Они предположили, что, прежде чем газы достигнут температуры, равной -273°C , они перейдут из газообразной формы в жидкую, а там коэффициент объемного расширения будет намного меньшим. (И как оказалось, это было совершенно верным.) Но даже если бы это было не так, кажется весьма вероятным, что закон Гей-Люссака не может строго применяться при очень низких температурах¹ и что коэффициент объемно-

¹ Важно помнить, что многие научные обобщения являются справедливыми только при определенных диапазонах давления, температуры и множества других факторов окружающей среды. Это не затрагивает полноценность обобщения в пределах рассматриваемого диапазона, но нельзя ожидать, что они будут полезны нам, когда мы выйдем за границы этого диапазона.

го расширения может постепенно уменьшаться, по мере понижения температуры, и, хотя объем продолжает сокращаться, это будет происходить все медленнее и медленнее и в конечном итоге никогда не достигнет нуля.

Тем не менее температура -273°C не была забыта. В 1848 году Уильям Томсон, которому позже было присвоено звание лорда Кельвина, указал, что было бы удобным принять -273°C за точку отсчета, как самую низкую возможную температуру. Ее назвали «абсолютный нуль»¹.

Если мы примем величину в -273°C за нуль и рассчитаем от этого значения вверх шкалу в градусах Цельсия, то получим «абсолютную шкалу температур». Данные, которые мы снимаем с этой шкалы, представляют собой «абсолютную температуру», а градусы, которые мы считываем, могут быть обозначены как ($^{\circ}\text{A}$) (от слова «абсолютный») или, как более часто пишут, $^{\circ}\text{K}$ (от фамилии Кельвин).

Чтобы привести температуру в градусах Цельсия к абсолютной шкале, необходимо всего лишь добавить 273. Например, точка замерзания воды равна 0°C , что равно 273°K ; а закипает вода при 100°C , то есть при 373°K . Чтобы предотвратить неразбериху, общепринято обозначать значения температуры по шкале Цельсия буквой t , а значения по шкале Кельвина — буквой T . Таким образом, мы можем записать соотношение шкалы Кельвина к шкале Цельсия следующим образом:

$$T = t + 273. \quad (\text{Уравнение 13.5})$$

Удобство использования абсолютной шкалы опирается на тот факт, что некоторые физические отношения могут быть выражены в более простой форме, если мы будем использовать T , а не t . Например, попробуем выразить взаимосвязь, по которой объем газа изменяется вместе с температурой. Начнем с температуры, равной t_1 , при которой объем газа равен (V_1), тогда, когда температура изменится до значения t_2 , объем газа будет

¹ Фактическое значение абсолютного нуля, согласно новейшим современным исследованиям, равно $-273,16^{\circ}\text{C}$.

² Однако покончить с неразберихой не так уж и просто. Например, t обозначает не только температуру по Цельсию, но также, и очень часто, — время. Сейчас в физике используются все буквы латинского и греческого алфавитов, а также некоторые буквы из иврита, санскрита и других языков, строчные, прописные, подстрочники и субскрипты, написанные курсивом, жирным шрифтом или готическим письмом, и все равно, невзирая на такое обилие символов, имеются многочисленные случаи их совпадения. По этой причине при представлении любого уравнения всегда желательно описывать значение каждого из символов и никогда не допускать, что значение любого из них — самозачекивается.

равен V_2 , окончательный объем будет равен первоначальному объему плюс изменение в объеме, то есть $V_2 = V_1 + \Delta V$.

Если мы возьмем уравнение 13.4, то увидим, что $\Delta V = V_1(\Delta t)/273$. Однако изменение в температуре (Δt) — это разность между конечной и начальной температурами ($t_2 - t_1$). Величина объемного расширения газов определяется для начальной температуры равной 0°C , так что $t_1 - t_1$ становится равным $t_2 - 0$, или просто t_2 . Поэтому мы можем заменить в уравнении 13.4 Δt на t_2 . Тогда выражение ($V_2 = V_1 + \Delta V$) приобретает вид:

$$V_2 = V_1 + \frac{V_1 t_2}{273} = V_1 \left(1 + \frac{t_2}{273} \right). \quad (\text{Уравнение 13.6})$$

Его можно легко преобразовать в:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{273 + t_2}{273}. \quad (\text{Уравнение 13.7})$$

Давайте теперь рассмотрим значение числа 273. Оно входит в это уравнение, поскольку $1/273$ является коэффициентом объемного расширения для газов при температуре 0°C . Однако вспомним, что единица измерения коэффициента объемного расширения равна «на $^\circ\text{C}$ » или «/ $^\circ\text{C}$ ». Число 273 является обратной величиной этого коэффициента, а значит, его единицы измерения должны быть обратными величинами единиц измерения коэффициента объемного расширения тел. Величина, обратная к «1/ $^\circ\text{C}$ », будет равна « $^\circ\text{C}$ »¹.

Тогда размерность для 273 в уравнении 13.7 будет представлять собой «градусы Цельсия» ($^\circ\text{C}$). Но (см. уравнение 13.5) если мы добавим 273 градуса Цельсия к значению температуры, которую мы отсчитываем по шкале Цельсия, то получим значение температуры, взятое по шкале Кельвина. Следовательно, конечная температура газа (t_2) плюс 273 представляет собой температуру по шкале Кельвина; или ($t_2 + 273 = T_2$)... Аналогичным образом, 273 градуса по Цельсию представляют собой точку замерзания воды на шкале Кельвина, так как $0 + 273 = 273$. Начальная температура газа была 0°C , так что если мы будем использовать шкалу Кельвина, то можем вместо нее подставить $T_1 = 273$. Следовательно, уравнение 13.7 примет вид:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (\text{Уравнение 13.8})$$

¹ Просто — напоминание... Величина, обратная a , равна $1/a$, а величина, обратная $1/a$, равна a .

Это — еще одна форма выражения закона Гей-Люссака (или закона Шарля), причем, наверное, самая простая. Если бы мы использовали любую другую температурную шкалу, выражение стало бы более сложным. Физический смысл уравнения 13.8 состоит в том, что: «Если давление газа постоянно, то объем данной массы газа прямо пропорционален его абсолютной температуре».

Замечание насчет давления является очень важным, потому что если давление на газ изменится, то изменится и объем газа, несмотря на то что температура останется постоянной.

Итак, мы имеем закон Бойля—Мариотта, который связывает объем газа с давлением при постоянной температуре, и теперь имеем закон Гей-Люссака, который связывает объем газа с температурой при постоянном давлении. Существует ли какая-то взаимосвязь между объемом газа, температурой и давлением? Предположим, что начальные условия задачи таковы: объем газа равен V_1 , давление P_1 , а температура T_1 ; мы будем изменять и давление и температуру до величин P_2 и T_2 соответственно. Нам надо определить, каким будет новый объем газа V_2 .

Начнем с того, что будем изменять давление от P_1 до P_2 , при постоянной температуре, равной T_1 . Так как температура постоянна, мы можем применить закон Бойля—Мариотта, согласно которому новый объем (V_2) описывается следующим отношением: $P_2 V_2 = P_1 V_1$. Если мы решим это уравнение для V_2 , то получим следующее:

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2}. \quad (\text{Уравнение 13.9})$$

Но V_2 не является тем конечным объемом, который мы ищем. Это — просто некоторый объем, который мы получаем, изменяя давление. Теперь, удерживая давление на том уровне, которого мы достигли (P_2), поднимем температуру от T_1 до T_2 ; объем снова изменится от V_2 до V_3 . Последний и есть тот объем, который мы ожидаем получить, когда давление достигнет P_2 , а температура T_2 . При изменении объема от V_2 до V_3 мы сохраняли постоянное давление, только поднимая температуру от T_1 до T_2 , а потому мы можем применить закон Гей-Люссака, который можно записать в форме: $V_3/V_2 = T_2/T_1$ (см. уравнение 13.8). Подставляя вместо V_2 значение уравнению 13.9, мы получаем следующее выражение:

$$\frac{V_3}{V_1 P_1 / P_2} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (\text{Уравнение 13.10})$$

которое после обычных алгебраических преобразований приобретает вид:

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \quad (\text{Уравнение 13.11})$$

Суммируя все сказанное выше, мы можем сказать, что для любого данного объема газа величина — объем, умноженный на давление и деленный на абсолютную температуру, — остается постоянной. В физике газов константа обычно обозначается как R , то есть мы можем написать, что: $(PV)/T = R$. Тогда наше уравнение приобретает вид:

$$PV = RT. \quad (\text{Уравнение 13.12})$$

Однако точные фактические измерения показывают, что уравнение 13.12 не всегда точно выдерживается для всех газов (по причинам, которые я буду объяснять позже). Оно справедливо при некоторых идеальных условиях, которые могут выполнить не все газы (хотя некоторые газы и очень близки к их выполнению), и если можно вообразить, что существует «идеальный газ» или «совершенный газ», то он будет точно следовать отношению, выраженному в уравнении 13.12. По этой причине уравнение 13.12 (или повторяющее его уравнение 13.11) называется «уравнением идеального газа».

Глава 14 ТЕПЛОТА

Кинетическая теория газов

Если мы примем как данную атомистическую теорию структуры газа (неизбежно вытекающую из экспериментов Бойля), то она сможет объяснить газовые законы, описанные в предыдущей главе и ранее. Первый ученый, который еще в 1738 году предпринял серьезную попытку сделать это, был Бернулли (принцип Бернулли).

Если газы состоят из отдельных частиц (атомов или молекул), широко разделенных и обособленных, было бы разумно предположить, что они находятся в постоянном свободном движении. Если бы это было не так и газовые молекулы были неподвижны, они бы под действием силы тяжести падали на дно сосуда, в котором находятся, и оставались бы там. Это действительно имеет место для жидкостей и твердых тел, в которых атомы не движутся свободно, а находятся в эффективном кон-

такте друг с другом и, таким образом, ограничивают перемещение друг друга. Предположение о том, что газы состоят из частиц, каждая из которых находится в постоянном движении и каждая фактически не подвержена влиянию других, называется «кинетической теорией газов» («кинетическая» происходит от греческого слова, означающего «двигаться»).

Сейчас мы не будем задаваться вопросом, почему частицы должны перемешаться, просто примем как факт, что это происходит. Кинетическая энергия газовых частиц должна намного превосходить слабую силу тяготения, которую Земля проявляет на столь маленьких частицах. (Как вы помните, сила тяжести, воздействующая на частицу, частично зависит от массы Земли, умноженной на массу частицы, но последняя — столь малая величина, что и полная сила получается ничтожно малой.)

Безусловно, притяжение Земли не равно нулю, и при рассмотрении большого количества газа эффект его значителен. Атмосфера Земли остается связанной с планетой именно благодаря силе тяготения, и большинство частиц газа, окружающего нашу планету, остается в пределах нескольких миль от ее поверхности. Лишь только тонкие пучки газа умеют проникать дальше. Однако для маленьких количеств газа, или, иначе говоря, для количеств, которые могут содержаться в пределах искусственных резервуаров, эффекты, которые оказывает сила тяжести, — величина достаточная, чтобы ее игнорировать. Следовательно, частицы в пределах таких сосудов могут рассматриваться как равномерно легко перемещающиеся в любом направлении: влево, вправо, вверх и вниз.

В любом данном сосуде случайное движение частиц в любом направлении заставляет газ распространяться равномерно. (Даже равномерного распространения газа в пределах сосуда вполне достаточно, чтобы показать случайный характер движения частиц. Если бы это было не так, газ скопился бы в одной или другой части сосуда.) Если одно и то же количество газа переместить в больший сосуд, то случайное движение частиц снова распространит их равномерно, в более просторных границах. Таким образом, газ расширяется, чтобы заполнить весь сосуд целиком независимо от того, насколько он велик, и (если сосуд не настолько огромен, что мы не можем дальше игнорировать эффект воздействия силы тяжести) заполняет его равномерно. С другой стороны, если газообразное содержимое большого сосуда каким-то образом перемещается в меньший сосуд, то частицы более близко сдвигаются между собой, и весь газ опять же вмещается в более ограниченный объем. Причем вмещается он всегда весь, без остатка.

Однако если мы будем рассматривать движение частиц газа, то ясно, что никакая отдельно взятая частица не может двигаться в течение долгого времени без того, чтобы не столкнуться с себе подобной. Частицы сталкиваются между собой постоянно, и не менее постоянно они сталкиваются со стенками сосуда. Можно предположить, что эти частицы имеют большую эластичность, и их сильные удары не приводят к полной потере энергии. Если бы это не было так, то частицы постепенно замедляли бы свое движение, теряли свою энергию, пока, наконец, не пришли к состоянию покоя (или почти к состоянию покоя) и не упали бы на дно сосуда под действием силы тяжести. Но этого не случается. Если мы возьмем и изолируем, насколько это позволяют наши возможности, сосуд с газом, то обнаружим, что состояние газа в нем не меняется неопределенно долгое время.

Бернулли указал, что соударение частиц газа со стенками сосуда создает эффект, который мы можем интерпретировать как давление. Поскольку при соударении со стенками сосуда каждая частица подвергает стенку воздействию крошечной силы, полная сила на единицу площади представляет собой давление. Строго говоря, то, что мы называем давлением, есть сумма многих отдельных давлений каждой из мельчайших частиц. Однако их так много и воздействие их так сжато по времени, что мы ощущаем эти толчки как единое целое равномерное давление. Поскольку движение частиц хаотично во всех направлениях, то и давление равномерно во всех направлениях.

Предположим, что газ находится в сосуде, ограниченном абсолютно гладким поршнем, вес которого таков, чтобы компенсировать давление частиц газа внутри этого сосуда (силу частиц, ударяющих в поверхность поршня). Если уменьшить его вес, то внешняя сила, давящая на верхнюю поверхность поршня, уменьшится. Направленная вверх сила движущихся частиц станет больше, чем сила, направленная вниз, и поршень поднимется вверх.

Однако поскольку поршень переместится вверх, объем сосуда увеличится. По мере того как объем увеличивается, расстояние, на которое может переместиться каждая из частиц, в среднем увеличивается, то есть в среднем возрастает расстояние, которое надо пройти каждой частице, для того чтобы достичь дна поршня. Естественно, тогда число столкновений частиц с дном поршня должно уменьшаться в каждый данный момент времени, поскольку каждая частица тратит большее время на достижение стенки и меньшее время на столкновение. Как следствие этого уменьшится и давление. В конечном счете

спад давления приведет к тому, что оно будет сбалансировано меньшим весом поршня, и поршень прекратит свое движение вверх. Как описано в законе Бойля: по мере увеличения объема уменьшилось давление газа.

Теперь предположим, что, наоборот, к первоначальному весу поршня был добавлен некоторый дополнительный вес. Теперь направленная вниз сила тяжести перемещает поршень вниз против силы столкновений частиц. Поскольку поршень перемещается вниз, объем уменьшается. Каждая частица, чтобы достигнуть дна поршня, перемещается в среднем на меньшее расстояние. Число столкновений между частицами газа и дном поршня в каждый данный момент времени увеличивается, соответственно увеличивается и давление на стенки сосуда и дна поршня. В конечном итоге давление увеличивается до величины, когда дополнительный вес поршня сбалансирован. Объем газа уменьшился, а давление увеличилось; снова все происходит согласно закону Бойля.

Через столетие после Бернулли, когда ученые осознали эффект, который температура оказывает на объем и давление газов, потребовалось пересмотреть и расширить кинетическую теорию газов, чтобы объяснить причастность и температуры.

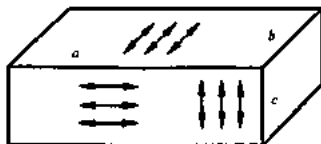
Представьте себе замкнутый сосуд с неподвижными стенками, в котором содержится некоторый газ. Если повысить температуру газа, его давление на стенки сосуда увеличится. Впервые это явление описал в своих работах Амонтон, и, как мы можем видеть из уравнения идеального газа (уравнение 13.12), если произведение объема на давление пропорционально абсолютной температуре, то при постоянном объеме само давление должно быть пропорционально абсолютной температуре.

В соответствии с кинетической теорией газов, давление увеличивается, если число столкновений частиц газа со стенками сосуда в любой данный момент времени увеличивается. Однако поскольку объем сосуда (его стенки неподвижны) не изменился, то каждая из частиц, для того чтобы достигнуть стенок сосуда, проходит одно и то же расстояние как до повышения температуры, так и после. Чтобы объяснить тот факт, что стенок сосуда достигает их большее количество (а следовательно, поднимает давление), следует предположить, что по мере повышения температуры частицы двигаются более быстро. В этом случае они не только чаще ударяются о стенку сосуда, но также и более энергично. И наоборот, по мере понижения температуры они двигаются более медленно.

Приняв это предположение, рассмотрим пример газа, находящегося под абсолютно гладким, обладающим весом порш-

нем. Направленная вниз сила веса поршня компенсирована направленной вверх силой давления газа. Если поднять температуру газа, то частицы, заставляющие поршень двигаться вверх, будут двигаться более быстро, и их столкновения с днищем поршня будут происходить более часто и энергично. Создаваемое ими давление превысит направленную вниз силу веса поршня, и он будет подниматься до тех пор, пока увеличение объема не увеличит расстояние, которое нужно пройти частицам до столкновения с днищем, до такого, при котором внешние и внутренние силы снова придут в состояние равновесия. Таким образом, мы пришли к выводу, что объем увеличивается с повышением температуры. Подобным же образом мы могли бы и доказать, что он уменьшается с понижением температуры; все происходит согласно закону Гей-Люссака.

Выше я показал, как кинетическая теория газов объясняет газовые законы с качественной стороны. Однако в 1860-х годах шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) и австрийский физик Людвиг Больцман (1844—1906) подошли к кинетической теории газов со всей математической точностью и обосновали ее и с теоретической точки зрения. Давайте рассмотрим часть этого обоснования.



Кинетическая теория газов

Начнем с того, что рассмотрим сосуд в форме параллелепипеда (другими словами — в форме кирпича), длина которого равняется a метров, ширина b метров, а высота c метров. Объем (V) такого сосуда равен abc кубическим метрам. Предположим затем, что в пределах этого сосуда находится N частиц, каждая из которых обладает массой m , и что все частицы перемещаются со скоростью v метров в секунду.

Эти частицы могут перемещаться в любом направлении, но такое движение всегда можно рассматривать как составленное из трех компонентов, находящихся под прямым углом друг к другу. (Это может быть сделано на основе «параллелепипеда сил», который является трехмерным аналогом «параллелограм-

ма сил», упомянутого выше.) Для удобства мы можем рассмотреть взаимно перпендикулярные компоненты, а также можем выбрать один компонент — параллельный длине сосуда, другой — параллельный ширине, а третий — параллельный высоте сосуда.

Так как все движения случайны и в каком-либо направлении не существует никакого результирующего движения (иначе весь сосуд улетел бы в межпланетное пространство), справедливо предположить, что каждый компонент содержит равную долю движения. Тогда примем предположение, что $1/3$ полного движения частицы параллельна краю a , $1/3$ — параллельна краю b , а $1/3$ — параллельна краю c . Это означает, что мы рассматриваем сосуд с газом как содержащий три равных потока частиц, перемещающихся один — на равные величины влево и вправо; другой — вверх и вниз; еще один — вперед и назад.

В действительности все частицы непрерывно сталкиваются друг с другом, отскакивают и изменяют направление. Так как частицы совершенно эластичны, это не изменяет полного движения даже при том, что распределение движения среди отдельных взятых частиц постоянно меняется. Упрощая, можно сказать, что, если одна частица изменяет направление своего движения в одну сторону, другая частица тотчас же изменяет свое направление таким образом, чтобы скомпенсировать действие первой. По этой причине мы можем игнорировать все взаимные столкновения между отдельными частицами.

Давайте сосредоточим наше внимание на одной частице, перемещающейся параллельно краю a . Она ударяется о ребро, составленное из сходящихся плоскостей b и c , и отскакивает назад с той же самой скоростью, но в противоположном направлении (все еще параллельно краю a), таким образом, если ее скорость до столкновения была v , то теперь она стала $-v$. Количество ее движения перед столкновением было равно mv , количество движения после столкновения стало $-mv$. Полное изменение в количестве движения частицы равно $mv - (-mv)$, или $2mv$.

Согласно закону сохранения импульса (количества движения), это изменение количества движения должно быть компенсировано противоположным по знаку изменением в количестве движения со стороны стенки сосуда. Поэтому стенка отражает частицу в противоположном направлении, и $2mv$ представляет собой один удар одной частицы о ребро, ограниченное плоскостями b и c . Для того чтобы узнать значение полной силы, действующей на поверхность, мы должны узнать, сколько частиц ударяют в данную поверхность за данную единицу времени.

Что касается отдельно взятой частицы, которую мы рассматриваем, то она, отразившись от плоскости, снова переместится на свое первоначальное место и, отразившись там, повторит весь процесс снова и снова. Величина ее перемещения от одного конца сосуда к другому составляет $2a$ метров. Так как ее скорость v метров в секунду, то число ее столкновений с рассматриваемой плоскостью сосуда равно $v/2a$ раз за каждую секунду.

Полная сила, действующая на стенку одной отдельной частицей за одну секунду, — это изменение количества движения за один удар, умноженное на количество этих ударов в секунду. То есть это равно: $2mv$ умножить на $v/2a$, или mv^2/a . Но как мы помним, третья часть всех частиц в сосуде ($N/3$) перемещается параллельно стороне a , и каждая приносит одну и ту же силу. Таким образом, полную силу воздействия всех частиц за одну секунду можно рассчитать, если $N/3$ умножить на mv^2/a , или $Nmv^2/3a$.

Давление — это сила, приложенная к единице площади. Стенка, которую мы рассматриваем, ограничена линиями, равными b и c метров, так что площадь этой стенки равна bc квадратных метров. Чтобы получить давление, то есть силу на квадратный метр, нужно разделить полную силу, приложенную на стенку, на число квадратных метров. Это означает, что мы должны разделить $Nmv^2/3a$ на bc , и, наконец, мы приходим к тому, что давление равняется $Nmv^2/3abc$. Но abc — это то же самое, что объем (V) сосуда. Поэтому мы можем выразить давление (P) следующим образом:

$$P = \frac{Nmv^2}{3V} = \frac{N}{3V} (mv^2) = \frac{2N}{3V} \left(\frac{1}{2} mv^2 \right). \quad (\text{Уравнение 14.1})$$

Но величина, равная $1/2 mv^2$, представляет собой кинетическую энергию e_k . Поэтому мы можем преобразовать уравнение 14.1 следующим образом:

$$PV = \frac{2N}{3} \left(\frac{1}{2} mv^2 \right) = \frac{2N}{3} e_k. \quad (\text{Уравнение 14.2})$$

В любом данном количестве газа число его частиц постоянно, поэтому величина $2N/3$ является постоянной. Физический смысл уравнения 14.2 заключается в том, что для данного количества газа произведение его давления на объем прямо пропорционально кинетической энергии составляющих его частиц.

Уравнение 13.12 указывает нам, кроме того, что произведение давления газа на его объем прямо пропорционально его абсолютной температуре.

Справедливо, что если x прямо пропорционален y и он же — прямо пропорционален z , то y — прямо пропорционален z . То есть мы приходим к выводу, что если величина PV прямо пропорциональна и абсолютной температуре, и кинетической энергии частиц газа, то и сама абсолютная температура прямо пропорциональна кинетической энергии частиц газа (этот вывод можно расширить и на частицы, составляющие другие виды материи).

Мы предположили, что все частицы в газе имеют идентичные скорости, но это — не так. Поскольку частицы сталкиваются друг с другом хаотически, то и количество движения будет передано случайным образом (хотя полное количество движения будет всегда тем же самым). Короче говоря, даже если частицы первоначально перемешались с равными скоростями, то очень скоро они будут перемешаться во всем диапазоне скоростей.

Максвелл получил уравнение, которое выражает распределение скоростей частицы при различных температурах. Но если мы имеем распределение скоростей, то это значит, что мы имеем и распределение кинетических энергий. Однако если мы знаем среднюю скорость, а ее мы можем получить из уравнения Максвелла, то мы знаем и среднюю кинетическую энергию¹. При любой температуре будут существовать некоторые частицы с очень низкой энергией, но также и частицы с очень высокой энергией. Однако средняя кинетическая энергия частицы изменяется строго с повышением и понижением абсолютной температуры.

В соответствии с кинетической теорией газов мы можем определить теплоту как внутреннюю энергию, связанную с таким явлением, как хаотическое движение частиц (атомы и молекулы), составляющих материю. А абсолютная температура — мера средней кинетической энергии отдельных частиц системы.

Сказанное выше придает важное теоретическое значение понятию «абсолютного нуля». Оно становится не просто более

¹ В данном случае «среднее» — не есть число, которое мы можем получить обычным арифметическим способом, сложив значения и разделив полученную сумму на количество значений. Оно скорее представляет собой «квадратный корень» ($\sqrt{\quad}$) из суммы квадратов арифметических значений величин. Таким образом, если мы имеем два значения, например 4 и 6, то обычное среднее значение равно $(4 + 6)/2$, или 5. Среднеквадратичное же значение равно

$$\sqrt{\frac{4^2 + 6^2}{2}}, \text{ или } \sqrt{26}, \text{ или } 5,1.$$

удобным средством упрощения уравнения или точкой, в которой объем газа сжался бы настолько, чтобы стать равным нулю, если бы этот газ в точности следовал закону Гей-Люссака (однако, как мы уже говорили, газы в точности ему не следуют). Он выражает собой температуру, при которой кинетическая энергия частиц материи понижается до полного, далее не уменьшаемого минимума. Обычно этот минимум принимают равным нулю, но это не совсем правильно. Современные теории указывают на то, что даже при абсолютном нуле продолжает существовать очень незначительное количество кинетической энергии. Однако уменьшить это незначительное количество не представляется возможным, а это значит, что температуры ниже абсолютного нуля не могут существовать.

Диффузия

Мы можем использовать понятие движения газовых частиц также для того, чтобы объяснить явление «диффузии», то есть непосредственную способность двух разных газов взаимно перемешиваться, несмотря на то, что первоначально они разделяются, даже несмотря на то, что им приходится преодолевать силу тяжести. Предположим, что у нас есть сосуд, который разделен в центре горизонтальной перегородкой. В верхней части сосуда находится водород; в нижней части под тем же давлением — азот. Если убрать перегородку, то можно было бы ожидать, что водород (намного более легкий из этих двух газов) останется плавать сверху, как дерево плавает на воде. Однако через достаточно короткое время эти два газа будут представлять собой однородную смесь, причем азот распространится вверх, а водород — вниз, несмотря на силу тяжести.

Это происходит потому, что движение газовых частиц практически не зависит от силы тяжести. В любой данный момент времени третья часть частиц азота (в среднем, если мы говорим о хаотическом движении) перемещается вверх, а третья часть частиц водорода перемещается вниз. Естественно, что это приводит к перемешиванию этих двух газов.

Диффузия также имеет место между взаиморастворимыми жидкостями, хотя она и проходит более медленно. Например, этиловый спирт может быть налит на поверхность воды, которая является более плотной, чем он, и если подождать, то две жидкости равномерно перемешаются. Это указывает на то, что, несмотря на более сильные связи между частицами, составляющими жидкости, они, однако, имеют некоторую сво-

боду движения и, проскальзывая относительно друг друга, способны расположиться среди частиц другой жидкости.

С другой стороны, диффузия между различными твердыми телами, находящимися в прямом контакте, происходит чрезмерно медленно, если вообще происходит, и это — признак того, что частицы, составляющие твердые тела, не только крепко связаны между собой, но и находятся в более или менее установленных местах. (Это не означает, однако, что частицы твердого тела неподвижны; все свидетельства указывают на тот факт, что, хотя они имеют установленное место расположения, они вибрируют в пределах этого установленного места со средней кинетической энергией, соответствующей абсолютной температуре твердого тела.)

Чтобы разобраться в количественных соотношениях, существующих в диффузии, давайте вернемся назад, к уравнению 14.1. Как мы установили, в нем P равно $Nm^2/3V$; теперь давайте решим это уравнение относительно средней скорости частиц v . Мы получим следующее отношение:

$$v = \sqrt{\frac{3PV}{Nm}}. \quad (\text{Уравнение 14.3})$$

Это уравнение легко можно решить в цифровых значениях. Если мы имеем дело с неким данным количеством, например кислорода, то его давление (P) и объем (V) легко можно измерить. Величина Nm представляет собой число частиц, умноженное на массу одной частицы, что, в конце концов, представляет собой полную массу газа, и может быть легко измерена. Если не вникать и опустить все детали вычисления, то можно сказать, что, оказывается, при 0°C (273°K) и давлении в одну атмосферу¹ средняя скорость молекулы кислорода составляет 460 метров в секунду (0,28 миль в секунду).

Уравнение 14.3 может быть написано в виде: $v = \sqrt{3Nm} \sqrt{PV}$. Поскольку для данного удельного количества Nm полная масса является величиной постоянной, то и величина $\sqrt{3Nm}$ — тоже постоянна, а это значит, что и уравнение 14.3 можно записать в

¹ Так как многие из свойств газов изменяются вместе с температурой и давлением, то обычной практикой является указание точной температуры и давления, при которых проводились измерения. В целях стандартизации обычно используют температуру в 0°C и давление в 1 атмосферу или приводят к ним измерения, сделанные при других давлениях и температуре. Данные значения — 0°C и 1 атмосферу — назвали «стандартными условиями температуры и давления», или, сокращенно, STP (от английских слов «standard conditions of temperature and pressure»).

виде: $v = k\sqrt{P\bar{V}}$, то есть мы можем сказать, что скорость молекулы газа прямо пропорциональна квадратному корню из произведения объема на давление. Однако из уравнения 13.12 мы знаем, что произведение $P\bar{V}$ — прямо пропорционально абсолютной температуре T . Поэтому мы можем сказать, что $v = k\sqrt{T}$, то есть что средняя скорость молекулы газа прямо пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры.

Если молекула кислорода имеет среднюю скорость 460 м/с при температуре 273 °К (0 °С), то что будет, если мы удвоим температуру до 546 °К (273 °С)? Тогда средняя скорость умножится на $\sqrt{2}$, или приблизительно в 1,4 раза. При этой, более высокой температуре молекулы кислорода будут двигаться со средней скоростью 650 с (0,40 мили в секунду).

Но представьте себе, что мы рассматриваем различные газы при одном и том же давлении P и объеме V . При этих условиях оказывается (соответствующие опыты и их объяснения более подробно рассматриваются в учебнике по химии), что число присутствующих частиц (N) является одним и тем же для всех. Поэтому мы можем рассматривать P , V и N как константы, а потому если мы запишем уравнение 14.3 как $v = \sqrt{3PV/1N\sqrt{1/m}}$, то мы можем упростить его и привести к виду: $v = k\sqrt{1/m}$. В таком случае можно сказать, что при стандартных условиях температуры и давления средняя скорость молекул газа прямо пропорциональна $\sqrt{1/m}$. Другими словами, мы можем сказать, что она обратно пропорциональна квадратному корню из массы отдельных молекул, то есть «молекулярному весу».

Это заключение иногда называют законом Грэма, поскольку впервые этот вывод обосновал в 1829 году шотландский химик Томас Грэм (1805—1869). Он отметил, что степень диффузии газа (которая, оказывается, зависит от скорости его молекул) обратно пропорциональна квадратному корню его плотности (а плотность газа зависит от молекулярного веса).

Более подробно молекулярные веса рассматриваются в учебнике по химии, но мы можем сказать, что молекула водорода обладает $1/16$ молекулярного веса молекулы кислорода. Так как молекулы водорода обладают массой в 16 раз меньшей, чем молекулы кислорода, то и движутся они со скоростью равной $\sqrt{16}$, то есть в четыре раза быстрее. Если при температуре 273 °К (0 °С) молекулы кислорода перемещаются со скоростью 460 м/с (0,28 мили в секунду), то молекулы водорода при той же самой температуре перемещаются со скоростью 1840 м/с (или 1,12 мили в секунду). При температуре 546 °К (273 °С) скорости молекул и кислорода и водорода умножаются в 1,4 раза, и последние движутся со скоростью 2600 м/с (или 1,58 мили в секунду).

Скорость звука в газе частично зависит от скорости, с которой газовые молекулы могут «качаться» вперед и назад, чтобы сформировать области сжатия и расширения. Поскольку с повышением температуры молекулы перемещаются более быстро, скорость звука также возрастает. Далее можно сказать, что в различных газах скорость звука обратно пропорциональна квадратному корню молекулярного веса, потому что он отображает изменение молекулярной скорости.

Поскольку воздух на $\frac{2}{3}$ состоит из азота (молекулярный вес равен 28), а на $\frac{1}{3}$ — из кислорода (молекулярный вес равен 32), его «средний молекулярный вес» равен 29. Молекулярный вес водорода равен 2. При некоей данной температуре молекула водорода перемещается в $\sqrt{29/2}$, или в 3,8 раза быстрее, чем «средняя» молекула воздуха. Поскольку скорость звука в воздухе при 20 °C равна 344 м/с, то при той же температуре скорость звука в водороде приблизительно будет равна 1300 м/с.

Столб воздуха в органной трубе, если его потревожить, будет вибрировать с собственной частотой, которая зависит от размера столба и скорости движения молекул воздуха. Поэтому органная труба данного размера при данной температуре издаст ноту данной высоты тона. Если мы заполним эту же трубу водородом, молекулы которого будут двигаться более быстро, чем молекулы воздуха, то та же самая труба при той же самой температуре издаст звук намного более высокого тона. (Если заполнить легкие человека водородом (эксперимент, который мы настоятельно НЕ рекомендуем проводить), то такой человек будет обладать, по крайней мере какое-то время, весьма пронзительным тембром голоса.)

Поскольку и тон органной трубы, и скорость звука зависят от скорости молекул газа, то эту зависимость можно рассчитать. Действительно, приблизительно в 1800 году немецкий физик Эрнст Ф.Ф. Хладни (1756—1827), его еще иногда называют «отец акустики», вычислил скорость звука в различных газах (что довольно трудно измерить непосредственным образом), отталкиваясь от высоты тона органных труб, заполненных газом (что измерить достаточно легко).

Безусловно фактические скорости отдельных молекул охватывают весьма широкий диапазон, и некоторые молекулы специфического газа перемещаются очень быстро. Даже при 0 °C между молекулами кислорода существует очень небольшое трение, что позволяет им двигаться, хотя бы какое-то время, со скоростями до 7 миль в секунду, что превышает среднюю скорость приблизительно в 25 раз.

Как мы помним, 7 миль в секунду являются второй космической скоростью, и молекула, перемещающаяся с поверхности Земли с такой быстротой, должна покинуть Землю и уйти в межпланетное пространство. По этой причине могло бы казаться, что кислород должен постоянно «просачиваться» из земной атмосферы. Да, это — так, но это не должно быть причиной для паники. Во-первых, существует лишь только весьма незначительное количество молекул кислорода, которые перемещаются со скоростью в 25 раз больше средней скорости. Во-вторых, из тех же молекул, которые смогли сделать это, только незначительное число молекул избегает ударов о другие молекулы, а соответственно потери своей необычайно высокой скорости, до того как оно поднимется в верхние слои атмосферы. Да, такая «утечка кислорода» имеет место, но она происходит настолько медленно, что недостатка кислорода на Земле не следует ожидать еще несколько миллиардов лет.

Однако в случае молекул водорода, скорость которых в четыре раза больше средней скорости молекул кислорода, можно ожидать гораздо большей утечки, так как вторая космическая скорость составляет все лишь 6 средних скоростей молекулы водорода. В данном случае утечка имеется, она достаточно серьезная, чтобы повлиять на атмосферу Земли в геологически короткий период времени. Есть основания полагать, что атмосфера Земли раньше была более богата водородом, а теперь она постепенно его теряет.

Луна, с ее намного меньшей второй космической скоростью, не способна даже удержать ни кислород, ни азот, если бы они когда-либо там существовали; фактически на Луне вообще не существует никакой атмосферы. Юпитер и другие внешние планеты, на которых вторая космическая скорость намного превышает земную, а температура поверхности — намного ниже, чем у Земли или Луны, способны очень легко удержать даже водород. Поэтому эти планеты имеют огромные, заполненные водородом атмосферы.

Реальные газы

В течение трех столетий после открытия закон Бойля принимался учеными как весьма полезный. Другое дело, что в течение двух с половиной из этих трех столетий данный закон (ошибочно) считался точным. Закон Бойля при всей его полезности является только аппроксимацией фактической ситуации, что впервые ясно дал понять французский физик Генри Вик-

тор Рего (1810—1878), который в 1850-х годах измерил точные объемы различных газов под различными давлениями и нашел, что произведение этих двух (PV) не всегда является постоянной величиной, несмотря на то что температура тщательно поддерживается на одном уровне. При давлении в 1000 атмосфер это произведение может быть в два раза больше, чем при давлении в 1 атмосферу. Даже когда он работал с давлениями, которые были только не намного выше, чем расчетное в 1 атмосферу, он часто находил отклонения в произведении, достигающие пяти процентов. Кроме того, от газа к газу имеются дополнительные различия. При давлении, не превышающем 100 атмосфер, водород, азот и кислород отклоняются от закона Бойля достаточно незначительно, в то время как двуокись углерода отклоняется намного.

Однако закон Бойля может быть получен из кинетической теории газов. Что же тогда? Является ли кинетическая теория газа неверной? Нет, не обязательно. Однако при получении закона Бойля из кинетической теории газов мы сделали некоторые упрощения, два из которых не совсем справедливы, при рассмотрении реальных газов. Например, мы приняли, что между молекулами газов не существует никаких взаимных сил притяжения, поэтому движение одной молекулы может рассматриваться полностью независимым от других. Это не совсем правильно, так как среди молекул газов есть очень слабые силы притяжения.

Другим упрощением было то, что молекулы газа являются чрезвычайно маленькими по сравнению с вакуумом, который их разделяет, настолько маленькими, что их объем может быть принят равным нулю. И снова это не совсем правильно. Объем молекул действительно очень маленький, но он не равен нулю.

Теперь предположим, что мы не принимаем упрощения, но полагаем вместо этого, что в тот момент, когда молекула собирается удариться о стенку сосуда, к ней приложено некое суммарное, направленное в противоположную от стенки сторону напряжение от воздействия всех слабых межмолекулярных сил, приложенных к молекуле, которая собирается сталкиваться, со стороны всех остальных молекул. (Это своего рода газообразное поверхностное натяжение, подобное уже знакомому нам жидкостному поверхностному натяжению, которое описано ранее.) Из-за этого «обратного» натяжения молекула не будет ударять в поверхность с полной силой, и ее вклад в общее давление меньше, чем можно было бы ожидать, согласно кинетической теории газа, в том случае, если бы никаких межмолекулярных сил не существовало. Чтобы привести давление каждой

индивидуальной молекулы к идеальному (без межмолекулярных сил), мы должны добавить маленькое дополнительное количество давления (P_0). Давление идеального газа в таком случае (P_0) будет равно фактически измеренному давлению плюс это дополнительное количество ($P + P_0$).

Чем большее количество молекул в газе находится в непосредственной близости к сталкивающейся молекуле (более отдаленные молекулы вносят такой ничтожный вклад в силу притяжения, что мы можем их игнорировать), тем больше величина обратного напряжения; чем больше фактическое давление (P) отстает по величине от идеального (P_0), тем больше значение P_0 , которое мы должны добавить к P в рассматриваемом случае столкновения молекулы. Количество же близлежащих молекул пропорционально плотности газа (D).

Но давление зависит от общего количества молекул, ударяющихся о стенки сосуда в данный момент времени. Значение P_0 также зависит от этой величины. Но эта величина, в свою очередь, зависит от плотности газа. Таким образом, P_0 зависит от плотности газа сначала в связи с каждой отдельной сталкивающейся молекулой, а затем в связи с числом молекул, сталкивающихся в единицу времени. Полное значение P_0 зависит от размера сталкивающейся молекулы, умноженного на число молекул, сталкивающихся в единицу времени, или на величину пропорциональную плотности, умноженную на коэффициент пропорциональности к плотности. Тогда полное значение — пропорционально квадрату плотности — D^2 . Если в этом случае мы используем для обозначения коэффициента пропорциональности величину a , то можем сказать, что $P_0 = aD^2$.

Для данного количества газа плотность обратно пропорциональна его объему. Чем более плотный газ, тем меньшее количество объема занимает его данное количество. Если P_0 прямо пропорционально квадрату плотности, то оно должно быть обратно пропорционально квадрату объема, то есть $P_0 = a/V^2$. Как я раньше уже сказал, идеальное давление равно $P + P_0$, поэтому теперь мы можем его записать: $P + a/V^2$.

Далее, что мы можем сказать относительно конечного объема молекул? Если все больше увеличивать давление на газ, то согласно закону Бойля будет происходить уменьшение объема, до тех пор пока он не достигнет нуля. Если закон Бойля совершенен, то объем уменьшаемого газа (V) равен объему идеального газа (V_0). Но если на газ действует очень большое давление, то его молекулы в конечном итоге вступают в реальный контакт друг с другом. После этого при дальнейшем увеличении давления уже не происходит никакого уменьшения объ-

ема. Объем идеального газа, доступный для сжатия, равен объему реального газа минус объем собственно молекул. Другими словами, $V' = V - b$, где b — объем молекул.

Действие уравнения идеального газа (см. уравнение 13.12) основано на условии отсутствия межмолекулярных сил и молекулярного объема, тогда оно действительно выражает соотношение идеального давления и идеального объема: $P'V' = RT$. Если привести данное выражение к виду, в котором мы подставляем значения для реальных величин, то в соответствии со сказанными выше рассуждениями получаем:

$$(P - a/V^2)(V - b) = RT. \quad (\text{Уравнение 14.4})$$

Это уравнение называют уравнением Ван-дер-Ваальса, так как его в 1873 году впервые получил голландский физик Йоханнес Дидерик Ван-дер-Ваальс (1837—1923). Слабые силы притяжения между газовыми молекулами, которые и вызывают необходимость этой модификации уравнения Бойля, называют «силами Ван-дер-Ваальса». Значения для a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса обычно весьма маленькие и отличаются от газа к газу, поскольку различные газовые молекулы имеют соответственно и различные объемы, и обладают специфическими силами взаимодействия между собой.

Межмолекулярные силы в газах при обычных условиях весьма невелики, но они могут вызвать важные изменения в свойствах газов. По мере увеличения давления происходит уменьшение объема газа, а соответственно по мере приближения молекул газа друг к другу сила притяжения между ними увеличивается. В тех случаях, когда силы притяжения между молекулами изначально достаточно велики, такое их дальнейшее увеличение приводит к тому, что они поднимаются до порога, при котором кинетической энергии молекул недостаточно для того, чтобы разделить их. Молекулы больше не способны двигаться обособленно, напротив, они будут сцепляться вместе, и газ превратится в жидкость. Газы типа сернистого газа, аммиака, хлора или углекислого газа могут таким образом быть превращены в жидкость давлением и при этом высоком давлении поддерживаться в жидком состоянии при комнатной температуре. (Если бы не существовало никаких межмолекулярных сил, сжижение газов не происходило бы ни при каких обстоятельствах. Все газообразные вещества оставались бы таковыми при любых условиях.)

Однако в газах, где межмолекулярные силы притяжения особенно слабы, даже такое движение молекул оказывается недостаточным для того, чтобы эти силы притяжения преодолели моле-

кулярное движение, представляющее их кинетическую энергию. По этой причине газы типа кислорода, азота, водорода, гелия, неона или окиси углерода не могут быть превращены в жидкость при комнатной температуре независимо от того, насколько велико созданное давление. Поэтому в начале XIX столетия такие газы получили название «перманентные газы».

Однако можно было бы увеличить силу притяжения и одновременно уменьшить кинетическую энергию. Первое можно получить, увеличивая давление, последнего можно добиться понижением температуры. Если достаточно низко опустить температуру газа, то кинетическая энергия его молекул уменьшится достаточно для того, чтобы силы притяжения между молекулами этих так называемых перманентных газов станут достаточными для того, чтобы произошло их сжижение. Температура, при которой такое сжижение становится возможным, называется «критической температурой». Выше этой критической температуры вещество может существовать только в газообразной форме. Существование критической температуры впервые было открыто в 1869 году ирландским физиком Томасом Эндрю (1813—1885).

Критическая температура для кислорода составляет 154 °K (или 119 °C), только после того как кислород опустится ниже этой температуры, станет возможным его сжижение. Межмолекулярные силы в водороде еще более слабые, чем в кислороде, поэтому его следует охладить до температуры 33 °K (или -240 °C), прежде чем кинетическая энергия молекул станет настолько низкой, чтобы быть нейтрализованной этими силами. Рекорд в этом отношении держит гелий (выделенный на Земле только в 1898 году). Гелий среди всех реальных газов наиболее близко стоит по отношению к идеальному газу. Его критическая температура -5 °K (или -268 °C).

С другой стороны, имеются вещества с настолько большими межмолекулярными силами, что они остаются жидкостями при комнатной температуре и даже под атмосферным давлением. (Эти межмолекулярные силы — больше, чем простые силы Ван-дер-Ваальса, и в этой книге мы их обсуждать не будем.) Вода — наиболее общеизвестный пример жидкости, существующей при обычной температуре и давлении. При температуре 373 °K (100 °C) и давлении в 1 атмосферу силы межмолекулярного притяжения благодаря увеличению кинетической энергии преодолеваются, и вода превращается в свою газообразную форму: пар, или водяной пар¹. Однако если мы

¹ Газ, который существует только при повышенной температуре, обычно называют «паром».

увеличим давление, то и при температуре, равной или выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, вода может сохранять свою жидкую форму. Это означает, что точка кипения повышается с увеличением давления, факт, которым регулярно пользуются в кастрюлях-скороварках. Критическая температура воды — $647\text{ }^{\circ}\text{K}$ (или $374\text{ }^{\circ}\text{C}$), только при температуре выше этой жидкая вода не может существовать независимо от других условий.

Даже в жидкостях силы притяжения между молекулами не настолько велики, чтобы предотвратить скольжение и смещение отдельных молекул относительно друг друга. Однако если мы будем еще далее понижать температуру, то достигнем точки, в которой энергии отдельных молекул недостаточно велики, чтобы дать им даже такую ограниченную свободу. Межмолекулярные силы становятся достаточно сильными, чтобы удержать молекулы твердо на одном месте. Они могут вибрировать вперед и назад, но среднее их положение остается фиксированным, и вещество превращается в твердое тело. Если мы будем поднимать температуру твердого тела, то эти колебания станут более энергичными, и при некоторой температуре (в зависимости от величины вовлеченных межмолекулярных сил) они станут настолько велики, что будут прогибаться этим силам вплоть до разрешения молекулам скользить относительно друг друга; тогда твердое тело расплавится или превратится в жидкость. Однако на эту «точку плавления» давление воздействует весьма незначительно.

Межмолекулярные силы в водороде настолько слабы, что твердый водород плавится при температуре всего лишь $14\text{ }^{\circ}\text{K}$ (или $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$), а жидкий водород кипит (при атмосферном давлении) при температуре, равной всего лишь $20\text{ }^{\circ}\text{K}$ (или $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). Однако гелий показывает даже еще более впечатляющие результаты. Его частицы состоят из отдельных атомов, а межатомные силы настолько слабы, что даже одной единицы кинетической энергии все еще достаточно, чтобы держать его в жидком состоянии при температуре, равной абсолютному нулю. Твердый гелий не может существовать независимо от того, насколько низка температура; для его появления необходимо увеличение давления — оно должно быть большим, чем атмосферное. Точка кипения гелия под давлением, равным одной атмосфере, находится на $4\text{ }^{\circ}\text{K}$ (или $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$).

С другой стороны, некоторые вещества обладают межмолекулярными или межатомными силами настолько сильными, что они остаются твердыми телами при температуре, значительно превышающей обычную. Металлический вольфрам не плавится, пока не достигнет температуры $3370\text{ }^{\circ}\text{C}$, и не кипит при атмосферном давлении, пока не достигнет температуры $5900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Удельная теплоемкость

Пока что при обсуждении теплоты мы акцентировались на понятии «температура»; однако следует избегать путаницы между двумя разными терминами. Термины «теплота» и «температура» ни в коем случае не идентичны. Конечно, легко предположить, что если один образец воды имеет более высокую температуру, чем другой, то он более горячий, а потому обладает и большим количеством теплоты. Но это последнее утверждение, однако, не обязательно является истинным.

Наперсток, наполненный водой, при температуре 90°C намного более горячий, чем ванна полная воды при температуре 50°C , но ванна с водой имеет гораздо большее количество теплоты. Если оставить их стоять при комнатной температуре, то наперсток, полный воды, охладится до комнатной температуры за время, в течение которого ванна с водой едва ли охладится вообще. Наперсток с водой теряет свою полную теплоту быстрее, в частности, потому, что обладает гораздо меньшим количеством того, что ему следует терять.

Количество теплоты, которое содержит система, — это полная внутренняя энергия¹ молекул, составляющих эту систему, а то время как температура — это мера средней поступательной кинетической энергии отдельных молекул. Другими словами, теплота представляет собой полное количество энергии, а температура — количество из расчета на одну молекулу.

Постараемся объяснить эту разницу на примере такой аналогии. Предположим, что мы налили один литр воды в высокий тонкий цилиндрический сосуд так, чтобы он образовал столб воды высотой в один метр. Теперь нальем пять литров воды в гораздо более широкий цилиндрический сосуд так, чтобы получился водяной столб высотой в $0,1$ метра. Вода в узком сосуде оказывает большее давление на его дно, однако, хотя высота столба воды в другом цилиндре составляет всего $0,1$ от высоты первого, то есть давление составляет всего лишь десятую часть от первого, объем его в пять раз больше. Объем — это полное количество, в то время как давление — величина на единицу площади. Аналогична этой и взаимосвязь между теплотой и температурой.

Вам может показаться, что вводить такое различие между теплотой и температурой — ненужная трата сил? В конце кон-

¹ «Внутренняя энергия» вещества состоит из кинетической энергии составляющих его частиц плюс энергия, вовлеченная в межмолекулярные соединения.

цов, если мы, например, нагреваем воду, то она набирает теплоту, и температура идет вверх; эти две величины повышаются вместе, так почему бы не использовать одну как меру другой? К сожалению, это «параллельное» поведение теплоты и температуры может быть подсчитано только тогда, когда мы имеем дело с данным количеством некоего специфического вещества, и даже тогда это можно сделать только в некотором ограниченном диапазоне температур. Это хорошо можно увидеть, если сравнить содержание теплоты в двух различных предметах, находящихся при равной температуре.

Для того чтобы сделать это, мы нуждаемся в единице измерения теплоты. Ранее в книге я вскользь упомянул такую единицу, она называется «калория». Теперь давайте более детально рассмотрим, что же это такое.

Предположим, что мы добавляем теплоту к воде, таким образом поднимая ее температуру. Эксперименты показывают, что количество теплоты, требуемой, чтобы поднять температуру воды на установленное число градусов, изменяется вместе с массой воды, которая эту теплоту получает.

Мы можем, например, принять, что 100 граммов воды, находящихся при температуре кипения, содержат некоторое установленное количество теплоты. Если 100 граммов кипящей воды вылить в 5 килограммов (5000 граммов) холодной воды, температура холодной воды повысится приблизительно на 2 °C. С другой стороны, если 100 граммов кипящей воды вылить в 10 килограммов холодной воды, то температура холодной воды повысится только на 1 °C.

И снова, количество теплоты, требуемое, чтобы поднять температуру данной массы воды, изменяется в зависимости от числа градусов Цельсия, на которое требуется эту температуру поднять. Для того чтобы поднять температуру данного количества холодной воды на 10 °C, требуется вдвое больший объем кипящей воды, чем для того, чтобы поднять температуру этого же количества холодной воды на 5 °C. Поэтому единица измерения теплоты должна быть выражена в единицах массы и единицах повышения температуры, например количество теплоты, которое потребуется для того, чтобы поднять температуру одного грамма воды на один градус Цельсия. На самом деле более точные измерения показывают, что количество теплоты, которое требуется для того, чтобы поднять температуру одного грамма воды на один градус Цельсия, слегка изменяется в зависимости от первоначальной температуры воды, так что в определение следует также включить и первоначальную темпера-

туру. Таким образом, мы можем сказать, что одна калория — это количество теплоты, которое потребуется, чтобы поднять температуру одного грамма воды с $14,5^{\circ}\text{C}$ до $15,5^{\circ}\text{C}$.

Или мы можем сказать, что одна тысяча калорий, или одна килокалория, — это то количество теплоты, которое потребуется для того, чтобы поднять температуру одного килограмма (1000 граммов) воды с $14,5^{\circ}\text{C}$ до $15,5^{\circ}\text{C}$.

Предположим теперь, что один грамм алюминия был помещен в кипящую воду на время, достаточное для того, чтобы быть уверенным, что он приобрел температуру кипящей воды (100°C). Давайте быстро погрузим горячий алюминий в 100 граммов воды при 0°C . Алюминий будет охлаждаться, и его теплота будет добавлена воде, тем самым ее температура поднимется от 0°C до примерно $0,22^{\circ}\text{C}$.

Чтобы поднять температуру 100 граммов воды на $0,22$ градуса Цельсия, потребуется приблизительно 22 калории (100 умножить на $0,22$). То есть один грамм алюминия, охлаждаясь от 100°C до $0,22^{\circ}\text{C}$, освободил приблизительно 22 калории. В соответствии с законом сохранения энергии мы ожидаем, что если это охлаждение освободило 22 калории, то добавление 22 калорий к холодному алюминию поднимет его температуру до 100°C . Грубо говоря, тогда мы можем сказать, что потребуется 22 калории, чтобы поднять температуру 1 грамма алюминия на 100°C , или 0,22 калории, чтобы поднять его температуру на 1°C . Данная величина представляет собой «удельную теплоемкость» алюминия; удельная теплоемкость вещества — это то количество теплоты, которое требуется для того, чтобы поднять температуру 1 грамма этого вещества на 1 градус Цельсия.

Экспериментальным путем можно найти, что удельная теплота железа равна $0,11$, меди — $0,093$, серебра — $0,056$, а свинца — $0,03$. Если добавить одну калорию теплоты к одному грамму алюминия с температурой 0°C , то этого количества теплоты будет достаточно, чтобы нагреть его на $\frac{1}{0,22}$, или на $4,5^{\circ}\text{C}$, то есть до температуры $4,5^{\circ}\text{C}$. То же самое количество теплоты при тех же самых условиях поднимет температуру одного грамма железа до 9°C , меди — до 11°C , серебра — до 18°C , а свинца — до 33°C .

Вот тут мы хорошо видим пользу от разницы между теплотой и температурой: действительно, то же самое количество теплоты может быть добавлено к данной массе каждого из множества различных веществ, и каждое из них достигнет различной температуры. Следовательно, температура сама по себе не является мерой содержания полного количества теплоты.

(Если обратиться назад, к нашему сравнению и связи между давлением и объемом, то это подобно тому, как если бы мы налили равный объем воды в цилиндрические сосуды различных диаметров. Объемы могут быть теми же самыми, однако величины давлений разнятся, и давление не может считаться мерой полного объема.)

Концепция удельной теплоемкости была впервые выдвинута в 1760 году шотландским химиком Джозефом Блэком (1728—1799).

Причиной для этого изменения удельной теплоемкости от вещества к веществу отчасти является различие в массах атомов, составляющих каждое из них. Масса атома свинца приблизительно в 7,7 раза больше, чем масса атома алюминия, масса атома серебра в 4 раза больше массы атома алюминия, масса атома меди в 2,3 раза больше массы атома алюминия, и, наконец, масса атома железа в 2,1 раза больше массы атома алюминия.

Из-за этого данная масса свинца, например 1 грамм, содержит только $\frac{1}{7,7}$ часть количества атомов, что и та же масса, но алюминия. Таким образом, при добавлении некоторого количества теплоты в 1 грамм свинца мы вовлекаем в движение меньшее количество атомов, и соответственно требуется меньшее количество теплоты, чтобы увеличить кинетическую энергию отдельных атомов до уровня, достаточного, чтобы обеспечить повышение температуры на один градус Цельсия. По этой же причине удельная теплоемкость свинца, равная 0,03, примерно равна $\frac{1}{7,7}$ таковой алюминия, которая равна 0,22. Точно так же удельная теплоемкость серебра равна примерно $\frac{1}{4}$ таковой алюминия, удельная теплоемкость меди равна примерно $\frac{1}{2,3}$ и, наконец, удельная теплоемкость железа равна примерно $\frac{1}{2,1}$ удельной теплоемкости алюминия.

Общим правилом для большинства элементов является то, что произведение удельной теплоемкости на относительную массу атомов рассматриваемого вещества имеет примерно одно и то же значение для всех элементов. Рассматриваемая здесь относительная масса атомов различных химических элементов («атомный вес») выбирается таким образом: атом водорода, который является самым легким, имеет вес чуть более единицы; исходя из этого, для большинства химических элементов произведение удельной теплоемкости на атомный вес дает нам приблизительно шесть калорий.

Это заключение известно как закон Дюлонга и Пети, названный так в честь французских физиков Пьера Луи Дюлонга (1785—1838) и Александра Тереса Пети (1791—1820), которые впервые выдвинули это предположение в 1819 году.

Латентная (скрытая) теплота

Вам могло бы показаться, что понятия температуры как меры содержания количества теплоты и теплоты будут очень сближаться, стоит только воспользоваться для расчетов атомами или молекулами вместо граммов. Это было бы так, если бы закон Дюлонга и Пети был справедлив для всех веществ и при любых условиях, но это не так. Он справедлив только для твердых элементов и только в некотором температурном диапазоне. Действительно, можно показать случаи, когда содержание количества теплоты может сильно изменяться без всякого изменения температуры вообще, и этого вполне достаточно, чтобы прекратить использование понятия температуры как меры содержания теплоты.

Предположим, что к 100 граммам жидкой воды с температурой 0°C добавлены 100 граммов жидкой воды с температурой 100°C . После перемешивания окончательная температура смеси будет равна 50°C .

Затем предположим, что 100 граммов льда с температурой 0°C добавлены к 100 граммам жидкой воды с температурой 100°C . После таяния льда и перемешивания смеси (предполагая, что во время ожидания не произошло никакой потери теплоты в окружающую среду или увеличения теплоты из окружающей среды, — задача, которая может быть решена посредством изоляции всей системы) мы обнаружим, что температура смеси составляет всего лишь 10°C .

Почему так получилось? Понятно, что жидкая вода с температурой 0°C содержит большее количество теплоты, пригодной для того, чтобы внести ее в окончательную смесь, чем лед при тех же 0°C , и все же? Ведь и жидкая вода, и лед имели одну и ту же температуру. Кажется разумным предположить, что во втором случае некоторое количество теплоты, которое содержится в горячей воде, было использовано на процесс таяния льда, и, таким образом, для подъема температуры смеси осталось гораздо меньшее его количество.

Действительно, если мы будем нагревать смесь льда и воды, то обнаружим, что независимо от того, какое количество теплоты было передано смеси, температура системы остается равной 0°C , пока последний кусочек льда не будет расплавлен. И только после того, как лед расплавится, теплота начинает преобразовываться в кинетическую энергию, и только тогда температура воды может начать повышаться. Эксперимент показывает: для того чтобы расплавить один грамм льда, из окружающей среды поглощается примерно 80 калорий теплоты и в процессе этого расплава не происходит никакого повышения температуры смеси. Лед,

находящийся при температуре 0°C , преобразуется в воду, находящуюся при тех же 0°C .

Да, но если теплота, которую получает лед, не преобразуется в кинетическую энергию молекул, что же случается с ней? Ведь согласно закону сохранения энергии, как мы знаем, она не может просто исчезнуть.

Молекулы воды во льду связаны вместе сильными силами притяжения, которые и удерживают вещество в виде твердого тела. Чтобы преобразовать лед в воду, то есть в жидкую форму (в которой молекулы, как во всех жидкостях, являются практически свободными от взаимных связей, вплоть до способности взаимно скользить и перемещаться относительно друг друга), необходимо противостоять этим силам. Во время плавления льда тепловая энергия расходуется на противодействие этим межмолекулярным силам. При одной и той же температуре молекулы воды содержат большее количество энергии, чем молекулы льда, но не в форме более быстрого движения или вибрации, а в форме способности к сопротивлению силам притяжения, старающимся стянуть их между собой.

Согласно закону сохранения энергии, изменение энергии в процессе замораживания должно быть равно и противоположно по знаку при таянии. Если жидкой воде при температуре 0°C предоставить возможность отдавать теплоту в окружающую внешнюю среду, то способность молекул сопротивляться силам притяжения постепенно будет потеряна. Все большее количество молекул будет крепко связано вместе, и в конце концов вода замерзнет. Отданное в окружающую внешнюю среду количество теплоты, которое теряет система в процессе этого замораживания, равно 80 калориям на каждый грамм получившегося льда.

Короче говоря, 1 грамм льда, находящийся при температуре, равной 0°C , поглощает 80 калорий и плавится, образуя 1 грамм воды с температурой 0°C ; а 1 грамм воды, находящейся при температуре, равной 0°C , выделяет 80 калорий, в то время как замораживается в 1 грамм льда с температурой 0°C .

Теплота, использованная в процессе плавления льда (или любого другого твердого тела), преобразуется в своего рода потенциальную энергию молекул. Как камень, находящийся наверху горы, имеет благодаря своему расположению и с точки зрения гравитационного притяжения большее количество энергии, чем подобный же камень, но находящийся у подножия горы, так и свободно перемещающиеся молекулы в жидкостях благодаря своему положению и с точки зрения межмолекулярного притяжения обладают большим количеством энергии, чем те же или подобные молекулы в твердых телах, где они жестко связаны.

Представление о количестве теплоты вещества дает его суммарная внутренняя энергия, представляющая собой и кинетическую и потенциальную энергию молекул. Температура дает нам отражение и изменение только кинетической энергии молекул. В процессе изменения только потенциальной энергии, как это было в приведенном примере с плавлением или замораживанием льда, полное количество теплоты, которое содержится в веществе, меняется без изменения температуры.

Первооткрывателем того факта, что теплота плавит лед без поднятия его температуры, был Джозеф Блэк — тот самый, кто первым рассчитал значение удельной теплосмкости. Он назвал теплоту, использованную в процессе плавления льда, «латентной, или скрытой, теплотой». Слово «латентная» означает нечто, что присутствует в веществе, но не явным образом. Это примерно то же самое, что и «потенциальная энергия». Таким образом, ясно просматривается связь между «латентной теплотой» и «потенциальной энергией».

Итак, тепло, которое требуется для того, чтобы расплавить грамм льда, называется его «скрытой теплотой плавления» (слово «плавление» в случае льда является синонимом слова «таяние»). Необходимым уточнением является слово «плавление», так как существует и другой тип латентной теплоты, который возникает в процессе кипения или парообразования. При преобразовании одного грамма жидкой воды, находящейся при температуре, равной 100°C , в один грамм пара с температурой 100°C происходит полная нейтрализация всех межмолекулярных связей, которые еще остались после преобразования твердого вещества в жидкость. Только после этого молекулы начинают демонстрировать свойства, типичные для молекул газов, то есть свое практически независимое движение. При имевшем место ранее процессе таяния была нейтрализована только незначительная часть межмолекулярных сил притяжения, а основная часть их продолжает действовать. По этой причине «латентная, или скрытая, теплота парообразования» данного вещества в общем случае значительно выше, чем латентная теплота плавления того же самого вещества. Например, латентная теплота парообразования воды, а именно: количество теплоты, которое требуется для того, чтобы преобразовать 1 грамм воды с при температурой 100°C в 1 грамм пара с той же температурой 100°C , равно 539 калориям. То есть для воды латентная теплота парообразования почти в семь раз больше, чем латентная теплота плавления.

Таким образом, энергосодержание пара на удивление высоко. Сотня граммов воды, находящихся при температуре, рав-

ной 100 °С, в процессе охлаждения от этой температуры до точки замерзания отдает около 10 000 калорий. Сотня же граммов пара, находящихся при температуре, равной 100 °С, однако, отдает около 53 900 калорий, просто преобразовываясь в воду. Получившаяся вода тогда отдает еще и 10 000 калорий, по мере охлаждения до точки замерзания. По этой причине паровые двигатели обладают таким высоким коэффициентом полезного действия, который никогда бы не был доступен «двигателям на горячей воде». (Не вызывает удивления тот факт, что Джеймс Ватт, изобретатель парового двигателя, был студентом у Джозефа Блэка.)

Существует способ использования латентной теплоты парообразования. Предположим, что газ типа аммиака помещен под давлением в закрытый сосуд. Если увеличивать давление, то это заставит газ сжиматься. Поскольку аммиак сжимается, он отдает некоторое количество теплоты окружающей среде. Эта теплота может поднять температуру как непосредственно окружающей среды, так и самого аммиака. Однако если сосуд с аммиаком погрузить в проточную воду, то выделенная теплота будет уноситься этой водой, а жидкий аммиак будет оставаться при температуре, которая была у него в газообразном состоянии.

Если теперь сосуд с аммиаком вынуть из воды и снизить давление так, чтобы жидкий аммиак снова закипел и стал газом, он должен поглотить количество теплоты, эквивалентное тому, которое он отдал до того. Он и поглощает эту теплоту из самых близких источников — из себя и из своего непосредственного окружения. Часть кинетической энергии его собственных молекул преобразуется в потенциальную энергию газообразного состояния, и температура аммиака резко падает вниз.

Если мы возьмем газ, подобный аммиаку, и сделаем его частью механического устройства, которое поочередно то сжимает его, то позволяет ему испаряться, в результате мы получим тепловой насос, который потребляет теплоту из аммиака и непосредственно из близлежащей окружающей среды. Далее, поместив такой насос в некую изолированную коробку, мы получим рефрижератор, то есть холодильник.

Понижение температуры по мере испарения используется и нашими собственными телами. Благодаря действию потовых желез мы покрыты тонкой влажной пленкой, которая по мере испарения забирает теплоту от нашего тела и дает нам прохладу. Вода имеет самую высокую латентную теплоту парообразования среди обычных веществ, а так как наш пот является почти чистой водой, это означает, что мы все немного испаряемся, хотя обычно так мало, что совсем и не замечаем этого. В жаркую по-

году процесс ускоряется, и если внешние условия изменяются, то мы хорошо можем видеть результат этого парообразования — конденсация (пот) накапливается в больших количествах. Все мы прекрасно знаем это чувство дискомфорта — результат частичного пробоя нашей личной системы охлаждения — как говорится: «в пот бросило».

Глава 15

ТЕРМОДИНАМИКА

Тепловой поток

В предыдущей главе я говорил относительно смешивания горячей и холодной воды и, в частности, сказал, что в процессе была достигнута промежуточная температура. Легко видеть, что это было достигнуто простым физическим смешиванием молекул горячей воды (которые обладают высокой средней кинетической энергией) с молекулами холодной воды (которые обладают низкой средней кинетической энергией). Молекулы же окончательной смеси обладают средней кинетической энергией некоего промежуточного значения между этими двумя.

Газы так же и таким же образом способны к сглаживанию экстремальных температур. Теплые воздушные массы смешаются с холодными (и такое смешение воздушных масс — источник происхождения погоды), и, как результат, температура земной поверхности сохраняется в некотором промежуточном значении. Может показаться, что смесь теплого и холодного воздуха не так уж эффективно воздействует на Землю, если сравнить это воздействие с таковым от плавучих льдин полярных областей или насыщенного паром тропических джунглей. Однако могло быть и хуже. Наша Луна находится на том же среднем расстоянии от Солнца, как и Земля, но в отличие от Земли она испытывает недостаток атмосферы. В результате части ее освещенной солнцем стороны становятся даже более горячими, чем тропические области Земли. А части поверхности на ее затемненной стороне становятся намного более холодными, чем области вечной антарктической зимы на Земле.

Перенос и передача теплоты потоками газа или жидкости называется «конвекцией» (от латинских слов, означающих «нести вместе»)¹.

¹ В нашей физической литературе «конвекцией» называется не перенос теплоты, а перемещение потоков газа или жидкости под воздействием внешних сил, разности температур и/или давлений. (Примеч. пер.)

Однако для передачи теплоты такое (фактическое движение материи не является необходимым. Если нагреть один конец длинного металлического прута, то теплота в конечном счете распространится и на другой его конец. Естественно предположить, что в пределах твердого металлического прута нет никаких потоков перемещающейся материи. На самом деле получается примерно вот что: поскольку один конец прута становится горячим, атомы металла на этой части прута увеличивают свою кинетическую энергию. Поскольку прут остается твердым, среднее расположение каждого атома остается фиксированным, но каждый из атомов может вибрировать относительно этого положения. По мере того как энергия атомов нарастает, колебания становятся все более быстрыми, а движения распространяются все дальше от среднего равновесного положения. Атомы, находящиеся в самой горячей части прута, вибрируют наиболее энергично, они толкают соседние атомы, и эти атомы в результате непосредственных соударений тоже начинают более энергично вибрировать. Таким образом, кинетическая энергия как бы «проталкивает» себя от атома к атому и постепенно от одного конца прута к другому. Это перемещение теплоты в толщу твердого тела называется «теплопроводностью» («кондукцией» — от латинских слов, означающих «вести вместе»).

Тот факт, что атомы и молекулы твердых тел по мере повышения температуры вибрируют со все большей амплитудой, означает, что каждый атом или молекула начинают занимать больше места. Тогда становится понятным, почему объем твердого тела или жидкости увеличивается с повышением температуры и уменьшается с ее понижением, даже несмотря на то, что молекулы остаются в фиксированном положении и твердо связаны между собой, вплоть до точки кипения.

(Однако это — не единственный фактор, вовлеченный в объемное расширение, которому твердые тела и жидкости подвергаются по мере изменения температуры. Немаловажную роль играет и вопрос взаимного расположения молекул, молекулярной структуры. Молекулярная структура в твердых телах обычно более компактна, чем в жидких, поэтому при замерзании последних проявляется внезапное изменение объема и соответствующее увеличение плотности. В этом отношении вода проявляет исключительные свойства. Ее молекулярная структура менее компактна в твердом состоянии, чем в жидком. Как результат, лед является менее плотным, чем жидкая вода и будет плавать в ней, а не тонуть.)

Оба понятия — и конвекцию и теплопроводность — можно объяснить в терминах механики. В обоих случаях имеется фак-

тическое воздействие более энергичных атомов или молекул на менее энергичные атомы или молекулы, и поэтому энергия передается прямым контактом. Однако теплота может быть передана и вообще без какого-либо контакта. Если заключить в вакуум некий горячий объект, то он будет передавать свою теплоту через него, несмотря на то что вокруг него нет ничего, что могло бы эту теплоту перенести посредством конвекции или теплопроводности. Солнце отделено от нас почти на 93 000 000 миль вакуума, гораздо более качественного, чем любой, который мы можем получить в лабораторных условиях, и все же его теплота достигает нас — это очевидно. Такая теплота кажется притекающей из горячего объекта во всех направлениях, подобно обычным лучам, которые любят рисовать исходящими из солнца многие мультипликаторы. По-латински слово «луч» звучит как «радиус», и поэтому явление переноса теплоты через вакуум было названо «радиацией». Детальное рассмотрение явления радиации будет нами сделано во втором томе этой книги.

Интерес к любым законам, управляющим движением теплоты различными методами, наиболее остро поднялся в первой части XIX столетия из-за все возрастающей важности парового двигателя, изобретенного Джеймсом Ваттом, работа которого зависела от величины теплового потока. В паровом двигателе теплота передается от сжигаемого топлива к воде, преобразуя последнюю в пар. Теплота, содержащаяся в паре, затем переходит в холодную воду, охлаждающую конденсор, и пар, теперь охлаждаясь, отдает теплоту, превращаясь опять в воду. Этот тепловой поток, который обращает воду в пар и обратно, каким-то образом выделяет достаточное количество энергии, которая может быть конвертирована в кинетическую энергию поршня, а последний, в свою очередь, может выполнять полезную работу.

Изучение движения теплоты (сначала — в связи с вниманием по отношению к работе парового двигателя) в результате привело к созданию раздела физики, который называется «термодинамикой» (от латинских слов, означающих «движение теплоты»). Конечно, при любом рассмотрении потока теплоты для начала нужно принять, что теплота не может обращаться в ничто или в ничто и не может притекать из ничего. Приведенная фраза отражает закон сохранения энергии, и это обобщение настолько важно для термодинамики в целом, что его часто называют «первым законом термодинамики».

Однако первый закон термодинамики просто заявляет, что в закрытой системе содержание полной энергии есть величина постоянная, и не дает нам представления о том, как именно

энергия в такой системе может передаваться от одной части системы к другой. Но даже небольшой опыт показывает, что такие энергетические изменения происходят по одному и тому же образцу.

Например, представим себе некоторую изолированную систему (то есть такую, в которой не происходит никакого обмена энергии с внешним миром: ни выделения энергии наружу, ни поглощения ее извне); она может, например, состоять из некоторого количества льда, помещенного в горячую воду. Мы можем быть совершенно уверены, что по мере того, как лед будет плавиться, вода охлаждаться. Полная энергия не изменилась; однако часть ее перешла из горячей воды в лед, и весь опыт человечества говорит нам, что такое изменение существует. Точно так же раскаленный камень, оставленный на воздухе, постепенно охладится, в то время как воздух, находящийся в непосредственной близости от него, будет постепенно нагреваться.

Поток теплоты от горячего объекта к холодному объекту продолжается до тех пор, пока температура различных частей изолированной системы не сравняется, и это истинно независимо от того, как передается эта теплота: конвекцией, кондукцией или радиацией.

На раннем этапе развития термодинамики исследователи, столкнувшись с этим явлением, характеризующим поток теплоты, выбрали наиболее легко визуализируемое понятие: они думали о теплоте как о своего рода жидкости, и эта жидкость даже получила имя — «каллорик» — от латинского слова, означющего «теплота».

Мы можем использовать понятие жидкости как аналогию, для того чтобы изобразить поток теплоты. Представьте себе два сосуда, связанные между собой трубкой с вентиляем, в левом сосуде — более высокий уровень жидкости, а в правом — более низкий. Естественно, давление воды слева будет выше, чем справа, так что у нас имеется суммарное давление слева направо. Если трубка с вентиляем будет открыта, вода потечет слева направо и будет продолжать течь до тех пор, пока уровни с обеих сторон не сравняются. Более высокий уровень воды слева будет падать; низкий уровень повысится, а окончательный уровень с обеих сторон будет иметь некое промежуточное значение по высоте. И хотя полный объем воды в системе не изменился, произошло изменение в распределении воды в пределах системы, которое привело к уравниванию давлений в системе.

Изменив некоторые ключевые слова, мы получим высказывание, имевшее место ранее: «Хотя полная теплота системы не

изменилась, произошло изменение в распределении теплоты в пределах системы, которое привело к уравниванию температур». (Мы проводим аналогию между объемом/давлением и теплотой/температурой.)

Если мы подумаем о температуре как о своего рода движущей силе, направляющей поток теплоты аналогично тому, как давление жидкости направляет поток воды, то нам покажется очень естественным, даже очевидным, что эта теплота должна течь из области высокой температуры к области низкой температуры независимо от общего содержания теплоты в каждой области.

Давайте рассмотрим, например, грамм кипящей воды и сравним его с килограммом ледяной воды. Чтобы заморозить килограмм ледяной воды, от него требуется отобрать приблизительно 80 000 калорий теплоты. Чтобы опустить температуру грамма кипящей воды до точки замерзания, а затем заморозить, потребуется отобрать 100 плюс 80 калорий, или всего лишь 180 калорий. Любое дальнейшее охлаждение килограмма льда, полученного в первом случае, по сравнению с граммом льда, полученного в втором, потребует отбора в тысячу раз большего количества теплоты, чем от второго, на каждый градус Цельсия. Это происходит потому, что, несмотря на разницу в температурах, полная теплота, которая содержится в килограмме ледяной воды, будет намного выше, чем полная теплота, которая содержится в грамме кипящей воды.

Однако, если грамм кипящей воды добавить к килограмму ледяной воды, поток теплоты потечет от кипящей воды в ледяную воду. Направление потока теплоты определяет вовсе не разность в полном содержании теплоты. Скорее его определяет разница в температуре. И снова наша аналогия: если в связанных между собой сосудах, упомянутых выше, левый будет иметь более узкий диаметр, а правый — более широкий, то вода будет течь со стороны меньшего объема к области большего объема. Не разница в полном объеме, но разница в давлении будет диктовать направление потока воды.

Скорость, с которой вода будет течь из одной части системы к другой, будет зависеть от величины разности давлений. Сначала, когда мы откроем вентиль на трубке, вода потечет быстро, но по мере того, как разность давлений по обе стороны трубки будет уменьшаться, эта скорость (или «расход жидкости») также упадет. Расход становится все меньше по мере того, как падает разница в давлениях и обращается в нуль, как только вода «находит свой уровень» и разница в давлениях исчезает.

Очевидно, аналогично можно изобразить передачу потока теплоты при помощи теплопроводности. Рискход теплоты из горячей области в холодную зависит частично от разницы температур между ними. Обычно вычисляют количество теплоты, которое будет протекать за одну секунду через куб с ребром, равным одному сантиметру, у которого одна сторона на 1°C холоднее, чем противоположная. Это количество теплоты называется «коэффициентом теплопроводности» и измеряется в калориях на сантиметр за секунду на градус Цельсия ($\text{кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$).

Даже если мы имеем некую заданную разность в давлениях воды, все равно мы можем изменить величину водного потока в зависимости от того, течет ли он через широкое отверстие, узкое отверстие, ряд узких отверстий, губку, грубое полотно, утрамбованный песок и так далее. То же самое истинно и для теплоты: даже в тех случаях, когда имеется перепад температур, теплота будет более быстро перетекать через одно вещество, чем через другое. Другими словами, коэффициент теплопроводности изменяется от вещества к веществу.

Считается, что вещества, у которых коэффициент теплопроводности является высоким, — хорошие проводники теплоты; те же, у которых коэффициент теплопроводности низкий, считаются плохими проводниками тепла. Вообще металлы — хорошие проводники теплоты, а неметаллы — плохие. Лучший проводник среди металлов — медь, с коэффициентом теплопроводности, равным $1,04 \text{ кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$. Для сравнения: вода имеет коэффициент теплопроводности, равный $0,0015 \text{ кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$, а некоторые виды древесины имеют коэффициенты теплопроводности даже еще ниже, вплоть до $0,00009 \text{ кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$.

Именно по этой причине холодный металл ошущается как намного более холодный, чем холодная древесина. Металл и древесина могут иметь равную температуру, но тепло покидает руку гораздо быстрее, когда она находится в контакте с металлом, чем с древесиной. Температура той части руки, которая вступила в контакт с металлом, понижается намного быстрее. Аналогично, мы можем без опаски поднять ведро кипящей воды за деревянную или пластмассовую накладку на ее ручке, поскольку теплота от металла (которого мы рекомендуем не касаться) проходит через древесину или пластмассу крайне неохотно и недостаточно интенсивно, чтобы нанести нам ущерб.

Система, полностью окруженная материалом с низкой удельной теплопроводностью, очень медленно отдает теплоту в окружающую внешнюю среду; она также и получает теплоту извне крайне медленно, даже невзирая на то, что разница в температурах, внешней и внутренней, может быть значитель-

ной. Система выглядит как остров, если можно так выразиться, специфической температуры посреди внешнего моря различной температуры. Поэтому такую систему называют «изолированной» (от латинского слова, означающего «остров»), а материал, обладающий низкой удельной теплопроводностью, называют «теплоизолятором» или «теплоизоляционным материалом».

Газы обладают низкими коэффициентами теплопроводности, поэтому воздух является хорошим теплоизолятором. Шерстяные одеяла и одежда «заманивают в ловушку» слой воздуха, который содержится в крошечных промежутках между волокнами, поэтому тепло очень медленно уходит из нашего тела во внешнюю холодную окружающую среду, благодаря этому мы и имеем ощущение теплоты, которое нам дает одежда. Шерсть и воздух сами по себе не греют, но создают эффект нагрева, помогая нашему телу сохранить свою собственную теплоту. Для этой цели было бы достаточно и одного воздуха, если бы мы могли заставить его не двигаться. Но нагретый воздух около наших тел постоянно сменяется прохладным воздухом в результате вездесущих воздушных потоков. Теплоту уносит конвекцией, поэтому, кстати, ветреный день кажется нам более холодным, чем безветренный, несмотря на то что температура вокруг нас остается той же самой.

Все вещества имеют коэффициенты теплопроводности больше нуля, и не существует никакого вещества, которое бы имело его равным нулю, то есть было бы абсолютным теплоизолятором. Предположим, тем не менее, что мы воспримем фразу «никакое вещество» буквально и окружим систему вакуумом. Тогда мы получим самый лучший изолятор, чем какой-либо из тех, что мы можем найти в царстве материалов. Физический вакуум обладает коэффициентом теплопроводности, равным нулю, а также не может вызывать теплоотдачу и через конвекцию. Однако даже вакуум не является абсолютным теплоизолятором, он все еще будет служить тропею для потери теплоты через радиацию.

Потеря тепла через радиацию, однако, является более медленным процессом, чем потеря его через кондукцию или конвекцию. Чтобы использовать свойства вакуума, некоторые сосуды делают двухслойными, а в промежутке между внешней и внутренней стенками создают вакуум. Кроме того, стенки могут быть сделаны зеркальными, так чтобы любая теплота, исходящая через вакуум в любом направлении, почти полностью отражалась. Как результат, процесс проникновения теплоты через такой «вакуумный сосуд» или «термос» происходит чрезвычайно медленно. Го-

рчий кофе в термосе остается горячим в течение длительного периода времени, а холодное молоко настолько же долго остается холодным.

Такие устройства были впервые в 1892 году созданы шотландским химиком Джеймсом Дьюаром (1842—1923). Он использовал их, чтобы хранить чрезвычайно холодные вещества типа жидкого кислорода, создавая им условия, при которых доступ теплоты снаружи минимизирован, а соответственно минимизировано и парообразование. Такие сосуды до сих пор применяются в химических лабораториях и для той же цели; в его честь они называются «сосудами Дьюара».

Второй закон термодинамики

Подводя итог всему, что было написано в предыдущей главе, мы можем сказать, что в соответствии с опытом всего человечества в любой изолированной системе теплота будет спонтанно перетекать из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой. Справедливо считать это «вторым законом термодинамики».

Представление о теплоте как о своего рода жидкости достигло своего пика в 20-х годах XIX века. Строгий математический анализ потока теплоты согласно этому представлению был выдвинут в 1822 году Фурье — основоположником гармонического анализа. Но еще дальше развил это представление другой французский физик — Никола Леонар Садя Карно (1796—1832).

В 1824 году Карно проанализировал работу парового двигателя в терминах, которые мы можем рассматривать аналогичными тем, что могли бы применяться к анализу водопада. Энергию водопада можно использовать для того, чтобы вращать колесо водяной мельницы, а это движение в дальнейшем может быть использовано для механического привода различных устройств. Таким образом энергия падающей воды может быть преобразована в работу.

Для данного объема воды количество энергии, которое может быть преобразовано в работу, зависит от высоты падения воды, то есть от разности высот от поверхности воды, куда падает водопад, до излома скалы, с которой он падает.

Мы можем измерить эти две высоты от любой согласованной точки отсчета. Приняв уровень воды в водоеме за «нулевую» точку, мы можем сказать, что его высота (h_1) равна нулю. Тогда если высота скалы (h_2) равна 10 метрам, то величина перепада высот будет равна +10 метрам. То есть расстояние, ко-

торое пролетает падающая вода, будет равно $h_2 - h_1$, то есть $10 - 0$, или 10 метрам.

Можно точно так же взять за нулевую точку и высоту над уровнем моря. В этом случае h_1 будет равняться $+1727$ метров, а h_2 будет $+1737$ метров; $h_2 - h_1$ в этом случае будет равен $1737 - 1727$, или все тем же 10 метрам. Наиболее строго и верно (по крайней мере, на Земле) было бы взять за нулевую точку центр Земли. В этом случае значения h_1 и h_2 составили бы соответственно $6\,367\,212$ метра и $6\,367\,222$ метра, а $h_2 - h_1$ — все те же самые 10 метров. Ну и как вариант мы могли бы позволить быть нашей нулевой точкой вершине горы. Тогда если h_2 равняется нулю, то h_1 , которая представляет собой уровень воды в водоеме, находящийся на 10 метров ниже, чем вершина горы, будет иметь значение -10 метров. В этом случае перепад высот $h_2 - h_1$ будет составлять $0 - (-10)$, или все те же 10 метров.

Я потратил столько времени и сил на эту точку только для того, чтобы абсолютно ясно дать понять, что значения h_1 и h_2 не являются абсолютными величинами, которые оказывают влияние на расчет количества работы, которое можно получить из энергии падающей воды; только разность между ними — перепад высот — имеет решающее значение.

Если мы и дальше продолжим рассмотрение водопада, то, кроме того, обнаружим ясное различие между содержанием полной энергии воды и свободной энергии. Вода падает сверху к основанию водопада и образует там спокойный водоем. Несмотря на то что водоем сам по себе не способен к вращению водяного колеса, он все же содержит много потенциальной энергии. Если мы выроем в водоеме отверстие, то вода пойдет по нему вниз, и часть ее энергии можно будет преобразовать в работу при условии, что водяное колесо будет помещено на дне отверстия. Идеальным было бы прорыть отверстие к центру Земли, тогда мы могли бы использовать всю потенциальную энергию воды (по крайней мере, относительно Земли). Однако на практике никто не роет никаких отверстий, а используется только энергия падающей воды существующего водопада. Эта энергия доступна нам. Оставшаяся потенциальная энергия воды, если считать ее от центра Земли, присутствует, но недоступна нам.

Этот же тип рассуждений мы можем применить и к потоку теплоты. В паровом двигателе (или в любом другом тепловом двигателе, например в таком, который мог бы использовать пары ртути, а не водяной пар) потоки теплоты двигаются из горячей области — парового цилиндра — к холодной области — конденсатору. Теплота течет из области высокой температуры к области низкой температуры так же, как поток жидкости течет

от большей высоты к меньшей. Количество энергии, которая может быть конвертирована в работу, определяет совсем не величина высокой или низкой температуры, а скорее разность температур. В таком случае будет справедливо по отношению к тепловому двигателю представлять «доступную энергию» в терминах разницы температур в пределах двигателя. Наиболее удобно выражать это в терминах абсолютной температуры, концепция, которую Карно не успел полностью разработать из-за своей преждевременной смерти от холеры в возрасте 36 лет. Если мы обозначим температуру горячей области теплового двигателя T_2 , а холодную область его же T_1 , то тогда доступная энергия может быть представлена как $T_2 - T_1$.

Холодная область парового двигателя, конечно, все еще содержит теплоту. Если температура конденсора равна 25°C , воду, которую он содержит (образовавшуюся из сжатого пара), в принципе можно охладить дальше и заморозить или охладить еще дальше — до абсолютного нуля; таким же образом воду в принципе можно опустить к центру Земли. Полная энергия системы будет представлена разностью температур между горячей областью и абсолютным нулем, то есть разность становится равной $T_2 - 0$, или просто T_2 .

Максимальная эффективность (КПД — коэффициент полезного действия) E такого теплового двигателя будет равна отношению доступной энергии к полной энергии. Если по условиям работы теплового двигателя мы в принципе можем преобразовать всю энергию системы, то эффективность (КПД) его будет равна 1,0; если только половина полной энергии может быть преобразована в работу, то E будет равняться 0,5, и так далее. Тогда, выражая доступную энергию и полную энергию в терминах разницы температур, мы можем сказать, что:

$$E = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (\text{Уравнение 15.1})$$

Теперь предположим, что мы имеем тепловой двигатель, в котором пар, находящийся при температуре 150°C (или 423°K), конденсируется в воду с температурой 50°C (или 323°K). Максимальная эффективность (КПД) такого двигателя тогда будет равна $(423 - 323)/423$, или 0,236. То есть мы видим, что лишь менее чем четверть полной теплоты, содержащейся в паре, была бы доступна для преобразования ее в работу.

Больше того, даже это значение может быть достигнуто только в том случае, если тепловой двигатель механически идеален, то есть если не имеется никаких потерь энергии во внешнюю

среду — ни через трение, ни через тепловое излучение и так далее. В реальной жизни тепловые двигатели обладают гораздо меньшей эффективностью, чем тот максимум, который предсказан нам в уравнении 15.1. Однако уравнение 15.1 устанавливает максимум, за который не могут заходить даже идеальные механические конструкции.

Уравнение 15.1 получено при условии, что теплота течет только из горячей области к холодной и никогда — наоборот. Таким образом, оно поэтому также является выражением второго закона термодинамики, то есть второй закон может рассматриваться как устанавливающий некоторые, нового вида, ограничения на использование энергии.

Первый закон термодинамики (закон сохранения энергии) однозначно дает понять, что никто не может извлечь большее количество энергии от системы, чем то ее полное значение, которое содержится в ней. Второй закон термодинамики утверждает, что невозможно получить большее количество работы из системы, чем количество доступной свободной энергии, и что величина доступной свободной энергии является неизменно меньшей, чем величина полной энергии, в том случае если не будет достигнута температура абсолютного нуля¹.

Второй закон термодинамики указывает нам на очень важный факт. Чтобы получить работу от теплового двигателя, должна иметься разность температур. Предположим, горячая и холодная области имеют одну и ту же температуру T_1 , тогда в уравнении 15.1 разность температур $(T_2 - T_1)$ станет равна $(T_2 - T_2)/T_1$, или 0, то есть величина доступной энергии становится равной нулю. (Таким же образом водопад с высотой нуль метров не способен выполнять никакую работу.)

Если бы это было не так, можно было бы, например, представить себе, что судно, плывущее по океану, могло бы впитывать в себя воду, использовать часть энергии, содержащейся в ней, а затем удалять эту воду (более холодную, чем она была прежде) назад в океан. Все суда в мире и многие другие устройства, придуманные человечеством, могли управляться за счет пустяковой доли огромного количества энергии, которая содержится в Мировом океане. Конечно, во время этого процесса океан слегка бы охладился, а атмосфера нагрелась бы, но поток теплоты был бы направлен назад — от воздуха к воде, и все бы было хорошо.

Однако пока второй закон термодинамики выражается уравнением 15.1, это невозможно. Чтобы извлечь теплоту из океа-

¹ Первый закон термодинамики утверждает: «Вы не можете победить...», а второй закон термодинамики добавляет: «И даже — не пытайтесь...»

на, нам бы понадобился бассейн с водой более холодной, чем в океане, и устройство охлаждения, чтобы поддерживать эту воду более холодной, чем в океане. Но энергия, израсходованная на охлаждение, была бы больше, чем энергия, извлеченная из океана (предполагая, что устройство охлаждения должно быть механическим, то есть не идеальным, поскольку это невозможно), а значит, мы не получили бы ничего. Фактически мы можем только потерять энергию. И действительно, все «вечные двигатели» придуманы изобретателями в тщетной надежде так или иначе нарушить второй закон термодинамики. Патентные бюро даже перестали рассматривать заявки на изобретения такого рода, пока не будут представлены работающие модели, а такие модели до сих пор представлены не были, и шансы на их построение — весьма невелики.

Энтропия

Карно рассматривал приложение второго закона термодинамики к очень ограниченной сфере. Он имел дело только с тепловыми двигателями¹ и специально отбросил рассмотрение двигателей, которые используют другие виды топлива или источники энергии: человеческий или животный привод или, например, силу ветра.

Действительно, во времена Карно даже первый закон термодинамики еще не был полностью понят в самом широком его смысле.

Однако когда в 1840-х годах Джоуль продемонстрировал взаимное преобразование теплоты и других разнообразных видов энергии, а Гельмгольц определенно доказал, что закон сохранения энергии имеет универсальную сущность, казалось, что и второй закон, который определяет направление потока теплоты, может также быть объявлен универсальным по применению. В тепловых двигателях разность температур была необходимой для того, чтобы извлечь работу из энергии, но отнюдь не все производящие работу устройства были тепловыми двигателями. В некоторых системах было возможно извлечь работу, несмотря на то что имелись только один уровень температуры.

Вот, например, работа может быть получена от электрической батареи, где, однако, не существует никакой разницы температур.

¹ Карно создал понятия «тепловой машины» и «цикла идеальной тепловой машины» — основополагающие понятия, на которых основывается вся термодинамика, а не только рассмотрел паровые двигатели. Автор явно преуменьшает роль Карно и не рассматривает подробно его открытия. (Примеч. пер.)

Но здесь имеется разница в электрических потенциалах (этот вопрос мы не будем обсуждать в данной книге), которые представляют доступную энергию. Еще, например, химические реакции могут работать, хотя конечные продукты реакции могут обладать той же самой температурой, что и первоначальные реагенты. В этом случае доступную энергию составляет разность в химических потенциалах.

Чтобы полностью обобщить второй закон термодинамики, он должен быть справедливым по отношению к любым видам энергии: электрической, химической и другим формам энергии, а не только к одной тепловой. Работа может быть извлечена из любой существующей формы энергии, однако работа может только быть получена, если энергия присутствует в более интенсивном состоянии в одной части системы и в менее интенсивном — в другой ее части. (В случае теплоты интенсивность измеряется как температура; при других же формах энергии она измеряется другими способами.) Именно эта разность в интенсивности и определяет величину доступной энергии. То, что остается от полной энергии, после того как из нее вычитается доступная свободная энергия, — связанная энергия.

В 1850 году немецкий физик Рудольф Юлиус Эмануэль Клаузиус (1822—1888) раскрыл истинную общность результатов Карно и определил свои наблюдения как второй закон термодинамики. (По этой причине Клаузиуса обычно и называют его первооткрывателем.)

Теперь давайте снова вернемся к рассмотрению второго закона. В тепловом двигателе мерой доступной энергии является разница температур между горячей и холодной областями. Однако второй закон заявляет, что в закрытой системе поток теплоты должен протекать от горячей области к холодной. Со временем, однако, эта разность температур должна уменьшиться: поскольку поток теплоты движется только в единственном направлении, горячая область остывает, а холодная нагревается. Следовательно, со временем свободная энергия уменьшается. Так как полная энергия остается постоянной, по мере уменьшения свободной энергии связанная энергия должна увеличиться.

Конечно, мы могли бы удалить ограничения, связанные с замкнутостью системы, то есть мы могли бы разрешить теплоте входить в горячую область снаружи и предотвращать ее охлаждение. Мы можем также отбирать теплоту из холодной области и предотвращать ее от нагревания. (Так и сделано в реальных паровых двигателях, в которых горение топлива непрерывно поддерживает паровую камеру в горячем состоянии, а проточная холодная вода поддерживает конденсор в максимально холодном состоянии.)

Однако для того чтобы закачать теплоту в горячую область и отобрать ее из холодной области, потребуется дополнительная энергия. Мы увеличиваем полную энергию системы просто для того, чтобы поддерживать величину доступной свободной энергии на постоянном уровне. Поскольку полная энергия увеличивается, в то время как доступная энергия остается постоянной, связанная энергия также возрастает.

Короче говоря, независимо от того, как мы будем подходить к рассмотрению процессов, происходящих в тепловом двигателе, со временем величина связанной энергии увеличивается. Мы могли бы делать это увеличение очень медленным, если достаточно хорошо изолируем систему, минимизировав поток теплоты от теплых частей к холодным. Если бы мы могли создать абсолютный изолятор, то могли бы даже прийти к ситуации, когда связанная энергия не будет увеличиваться.

То, что справедливо для тепловых двигателей, должно также быть справедливо для любых производящих работу устройств. Тогда мы можем сказать, что связанная энергия любой системы может оставаться неизменной при идеальных условиях, но всегда увеличивается со временем при реальных условиях.

Клаузиус придумал слово «энтропия» (слово неизвестного происхождения) для того, чтобы эта величина служила мерой недоступности энергии¹. Он показал, что энтропия может быть выражена как теплота, разделенная на температуру. Таким образом, единицы измерения энтропии — калории на градус Цельсия. Мы можем сказать, что энтропия системы будет оставаться неизменной при идеальных условиях, но всегда возрастает со временем при реальных условиях. И это также является еще одним выражением второго закона термодинамики.

Не следует забывать, что законы термодинамики справедливы и обращаются только к замкнутым системам. Если мы рассмотрим открытые системы, то будет достаточно просто найти примеры очевидного уменьшения энтропии.

Например, в холодильнике теплота постоянно передается от холодных объектов внутри камеры в теплую атмосферу извне, что представляет собой явный вызов второму закону. Теплый объект, который мы помещаем в пределы камеры рефри-

¹ Обнаружив в природе новую, не известную никому величину, Клаузиус назвал ее странным и непонятным словом «энтропия», которое сам и придумал. Он так объяснил его значение: «тропе» по-гречески означает «превращение». К этому корню Клаузиус добавил две буквы «эн», чтобы получившееся слово было по возможности подобно слову «энергия». Обе величины настолько близки друг другу своей физической значимостью, что известное сходство в их названиях было целесообразно. (Примеч. пер.)

жератора, остывает; поэтому свободная энергия (представленная разностью температур между воздухом извне и объектом внутри рефрижератора) увеличивается.

Во всех случаях, когда мы рассматриваем иные, чем теплота, формы энергии, можно обнаружить аналогичные «нарушения» второго закона термодинамики. Человек может подниматься вверх по холму, тем самым увеличивая свободную энергию, измеряемую как разность в потенциальной энергии в нем, когда он находится у основания холма и наверху. Железную руду можно очистить до чистого железа, а израсходованная аккумуляторная батарея может быть заряжена; первый пример демонстрирует «движение вверх по холму» применительно к химической энергии, последний — «движение вверх по холму» применительно к электрической энергии.

Дело в том, что во всех упомянутых случаях система не замкнута; энергия притекает в систему снаружи. Для того чтобы сделать второй закон термодинамики имеющим силу, следует включить источник этой внешней энергии в систему так, чтобы он больше не был «снаружи».

Таким образом, вещество, находящееся в камере рефрижератора, остывает не само по себе (а как мы помним, первоначальное определение второго закона, говорит только о естественном, независимом потоке теплоты). Вместо этого охлаждение имеет место только потому, что внутри рефрижератора работает двигатель. И хотя энтропия внутренней камеры рефрижератора уменьшается, энтропия двигателя увеличивается. Кроме того, увеличение энтропии двигателя — гораздо больше, чем уменьшение ее в камере холодильника; таким образом, суммарное изменение в энтропии всей системы, представляющей собой камеру рефрижератора плюс его двигатель, говорит об ее увеличении.

Таким же образом уменьшение энтропии, которое происходит при превращении железной руды в железо, меньше, чем увеличение энтропии, которое происходит при горении кокса и других химических реакциях, вызывающих очистку железа. Увеличение энтропии в электрогенераторе, снабжающем электричеством для заряда аккумуляторную батарею, больше, чем уменьшение энтропии непосредственно аккумуляторной батареек по мере ее зарядки. Уменьшение энтропии человека, идущего вверх по холму, меньше, чем увеличение энтропии, которое происходит благодаря химическим реакциям внутри его тканей, которые извлекают химическую энергию из пищевых продуктов и создают усилия, которые требуются человеку для осуществления этого подъема.

Все это истинно и для различных крупномасштабных, планетарного масштаба процессов, которые, как кажется, вызывают

уменьшение энтропии. Примерами таких, уменьшающих энтропию явлений являются: нерегулярное нагревание атмосферы, которое вызывает ветер и создает погоду; подъем бесчисленных тонн воды на мили вверх в противодействие силе тяжести, который порождает дождь и создает реки; преобразование растительным покровом планеты углекислого газа, содержащегося в атмосфере, в сложные органические соединения, которые являются основой и бесконечной пищевой цепочки Земли, и таких энергоносителей, как уголь и нефть. Именно благодаря всем этим явлениям свободная энергия Земли остается приблизительно на одном и том же уровне за всю историю ее существования; эти явления также объясняют, почему мы можем не опасаться в обозримом будущем того, что свободная энергия будет исчерпана.

И все же все эти явления не должны рассматриваться отдельно друг от друга, поскольку все они имеют место за счет достигающей Земли солнечной энергии. Именно солнечная энергия нагревает атмосферу и испаряет воду, именно она служит движущей силой для фотосинтеза различных покрывающих Землю растений. В процессе излучения теплоты и света Солнце подвергается гораздо более обширному увеличению энтропии¹, чем то относительно малое уменьшение, которое происходит благодаря земным планетарным явлениям.

Иными словами, если мы включим в пределы нашей системы все действия, которые затрагивают ее, то окажется, что суммарное значение ее энтропии всегда увеличивается. Если же мы вдруг обнаруживаем уменьшение энтропии системы, что случается достаточно часто, то это означает, что мы исследуем лишь часть системы и не видим ее целиком.

В реальности, на практике мы никогда не можем быть уверенными, что имеем дело с замкнутой системой. Независимо от того, насколько хорошо мы изолируем систему, всегда имеются внешние воздействия — приток энергии и потери энергии — как в систему, так и из нее. На все процессы на Земле воздействует солнечная энергия, и, даже если мы будем рассматривать Землю и Солнце вместе как одну большую систему, все равно останутся гравитационные и радиационные влияния от других планет и даже от других звезд. Мы не сможем

¹ Мы могли бы продолжить дальше, рассмотрев вопросы возникновения Солнца, поскольку его формирование обязано было вовлечь обширное уменьшение энтропии, такое, чтобы дать возможность Солнцу преодолеть свое излучение в течение многих миллиардов лет, непрерывно и намного увеличивая энтропию. Однако рассмотрение вопросов, касающихся Солнца и происходящих с ним и вне его процессов, мне кажется, было бы более подходящим в книге, посвященной астрономии.

убедиться, что имеем дело с действительно замкнутой системой, пока не возьмем для нашей системы нечто меньшее, чем вся Вселенная.

В терминах Вселенной мы можем (как это и сделал Клаузиус) выразить законы термодинамики с предельной общностью. В этом случае первый закон термодинамики звучал бы так: «Полная энергия Вселенной есть величина постоянная», а второй закон термодинамики звучал бы так: «Полная энтропия Вселенной непрерывно возрастает».

Теперь предположим, что Вселенная конечна в своем размере. Тогда она может содержать только некое, конечное, количество энергии. Если энтропия Вселенной (которая является мерой содержания ее связанной, бесполезной энергии, энергии, из которой невозможно извлечь работу) непрерывно увеличивается, то в конечном итоге величина связанной энергии достигнет точки, в которой она равна полной энергии. Так как связанная энергия не превысит этого значения, энтропия Вселенной достигнет своего максимума. В этом состоянии максимальной энтропии не останется никакой свободной энергии, то есть не смогут протекать никакие процессы, которые вовлекают передачу энергии, не может быть выполнена никакая работа. Вселенная «выключится», прекратит свое существование.

Беспорядок

В первой половине XIX столетия в результате проводившихся тогда исследований ученые пришли к выводу, что теплота является жидкостью. Однако в самом начале столетия они стали обнаруживать все больше и больше свидетельств, указывающих на то, что теплота является не жидкостью, а формой движения.

Например, в 1798 году Бенджамин Томпсон, граф Румфора (1753—1814), английский изобретатель из Соединенных Штатов, работал в арсенале и занимался сверлением орудий на службе у курфюрста Баварии. Он обратил внимание на тот факт, что при сверлении орудийных стволов выделяется количество теплоты гораздо больше расчетного. И орудие, которое сверлят, и используемый для сверления инструмент перед началом работы находились при комнатной температуре, однако теплота, которая возникла в процессе сверления, была вполне достаточной, чтобы через некоторое время довести воду до кипения; и чем дольше продолжался процесс сверления, тем большее количество теплоты выделялось. Создавалось впечатление, что орудие и инструмент обладают неисчислимым запасом теплоты.

Если теплота была жидкостью и, таким образом, формой материи, то предположить, что она была сформирована в процессе сверления, было бы достаточно трудно. К тому времени французский химик Антуан Лоран Лавуазье (1743—1794) уже открыл закон сохранения материи, согласно которому материя не может быть ни создана, ни разрушена, и все большее количество ученых того времени полагали, что это обобщение имеет силу. Если действительно произошло возникновение теплоты, то она должна быть чем-то другим, а не материей. Как показалось Румфолду, наиболее вероятной возможностью было то, что движение сверлящего инструмента по металлу орудия было преобразовано в движение мелких частей как сверла, так и сверляемого металла и что это внутреннее движение представляло собой теплоту.

В течение нескольких последующих десятилетий такая точка зрения на теплоту в значительной степени игнорировалась учеными. Предположение о том, что маленькие части объекта могли бы незримо перемещаться, казалось в 1800 году столь же трудным для восприятия, как предположение о создании материи, а возможно, даже и более трудным. Однако через десятилетие после экспериментов Румфорда была выдвинута и стала набирать популярность атомная теория. Под «внутренним движением материи» теперь стали понимать движение или колебание атомов и молекул, составляющих эту материю, а предположение о непрерывности такого движения стало более приемлемым. В 1840-х годах эксперименты Джоуля по преобразованию работы в теплоту расширили и углубили наблюдения Румфорда и, как результат, закончились победой атомного представления о тепловом движении. Ну и наконец, в 1860-х годах Максвелл и Больцман окончательно утвердили кинетическую теорию газов и концепцию теплоты как формы движения, на атомном уровне.

Это отнюдь не подразумевало, что законы термодинамики, установленные на основе жидкостной теории теплоты, оказались ложными. Нисколько! Законы были основаны на наблюдавшихся явлениях, и они остались имеющими силу. Изменились лишь теории, которые объясняли, почему они имеют силу. Жидкостная теория теплоты, что и говорить, объясняла эти явления с достаточной аккуратностью¹, но атомная теория движения смогла объяснить, кроме того, и все то же, что и жидкостная теория теп-

¹ Фактически именно такое аккуратное объяснение их и было единственной причиной того, почему жидкостная теория продолжала существовать, несмотря на нарастающее количество фактов, свидетельствующих против нее. Она только и ждала удобного момента, чтобы сдать свои позиции какой-либо другой, более удобной теории.

лоты, чем доказала также свою способность выступать как устойчивая основа для законов термодинамики, основанных на наблюдениях и экспериментах.

Безусловно, представление о теплоте как об атомном движении несколько более трудно для восприятия, чем представление теплоты как жидкости. В последнем случае мы можем думать о таких знакомых объектах, как водопады; в первом же лучше, что мы можем представить, — это набор совершенно упругих бильярдных шаров, подпрыгивающих в относительно прочно замкнутой камере. Согласно бритве Оккама, из предложенных двух теорий, объясняющих факты, следует выбрать наиболее простую. Однако бритва Оккама применяется должным образом только тогда, когда две или более теории объясняют с равной справедливостью все относящиеся к ним факты. В существующем случае — это не так.

Если мы ограничиваемся только жидкостной теорией теплового потока, то, конечно, для восприятия она проще, чем атомное движение. Однако, если нам потребуются объяснить воздействие теплоты на давление и объем в газах, если нам нужно будет объяснять явления удельной теплосмкости, латентной теплоты и множество других явлений, жидкостная теория становится достаточно трудной к использованию. Со своей стороны, атомная теория движения не только может объяснить тепловой поток, но также и все другие явления, в которые вовлечена теплота.

Представим себе, например, что у нас имеются горячее и холодное тела, находящиеся в контакте. Молекулы в горячем теле в среднем перемещаются или вибрируют более быстро, чем молекулы в холодном теле. Безусловно, молекулы в обоих телах обладают неким диапазоном скоростей: и в холодном теле могут существовать некоторые молекулы, которые перемещаются быстрее, чем некоторые молекулы в горячем теле, но это — исключительная ситуация. Когда молекула горячего тела («Н-молекула») сталкивается с таковой холодного тела («С-молекулой»), велика вероятность того, что из этих двух именно Н-молекула перемещается более быстро. По-другому мы можем сказать это так, что если большое число Н-молекул сталкивается с большим числом С-молекул, то будут несколько случаев, когда скорость перемещения С-молекулы больше, чем скорость перемещения Н-молекулы, с которой она сталкивается, но абсолютное превосходство составляют случаи, когда скорость перемещения Н-молекулы является большей из двух.

Теперь давайте рассмотрим ситуацию, когда два перемещающихся объекта сталкиваются и рикошетят; скорости обоих объек-

тов могут изменяться в огромном диапазоне значений и направлений. Однако эти изменения могут быть сгруппированы в два основных класса. В первом случае более медленный объект в результате столкновения потеряет скорость, тогда как более быстрый объект увеличит скорость. Результатом этого будет то, что более медленный объект будет перемещаться еще медленнее, а более быстрый объект будет перемещаться еще быстрее. Во втором случае в результате столкновения более медленный объект получит дополнительную скорость, тогда как более быстрый объект эту скорость потеряет. В первом классе столкновений значения скоростей станут больше, во втором классе — они уменьшатся.

Однако в большинстве случаев столкновение принадлежит ко второму классу, а не к первому. Это означает, что если мы рассмотрим большое количество случайных столкновений, при которых скорость после столкновения перераспределяется тем или другим способом, то обнаружим, что число столкновений второго класса, при котором суммарные скорости уменьшаются, преобладает над числом столкновений первого класса, при котором они увеличиваются. Случайные столкновения вызывают «среднее уменьшение» скоростей¹.

Когда горячее и холодное тела вступают в контакт, большое количество Н-молекул сталкивается с большим количеством С-молекул; результатом этого является то, что после столкновения Н-молекулы в целом перемещаются медленнее, а С-молекулы перемещаются быстрее. Это означает, что Н-молекулы стали более холодными, С-молекулы — более теплыми, то есть от Н-молекул к С-молекулам произошел отток теплоты. Температура горячего тела в месте контакта снижается, а температура холодного тела в месте контакта повышается.

Такие столкновения продолжаются не только на границе контакта, по которой касаются горячее и холодное тела, но также и в пределах вещества, из которого состоит каждое. В горячем теле, например, Н-молекулы, которые были охлаждены в результате столкновения с С-молекулами, сталкиваются

¹ Это не подразумевает, что в конечном счете все скорости будут точно равны, если только имеется достаточное количество столкновений. Если два объекта, обладающие равной скоростью, сталкиваются, велика вероятность того, что скорость одного увеличится за счет того, что скорость другого упадет. Слишком большое число «падений скорости» становится также маловероятным. Вместо этого число «падений скорости» доходит до некоторой точки и останавливается. При некоей данной температуре «падение скорости» приводит к диапазону скоростей, предсказанному уравнением Максвелла—Больцмана. Меньший и более ограниченный диапазон скоростей расширяется до этого значения благодаря столкновениям, в то время как более широкий диапазон благодаря тем же столкновениям сужается до того же значения.

с соседними молекулами, которые не были охлаждены; в этом случае также имеется общее замедление скоростей.

Результатом этих случайных столкновений и случайных изменений скорости по всей системе является то, что в конечном счете средние скорости молекул в произвольно взятой части системы будут теми же и в любой другой ее части; это среднее число будет иметь значение, которое лежит между двумя первоначальными экстремумами. (Проще говоря, горячее и холодное соединятся для того, чтобы создать теплое.) Как только скорости в среднем по системе уравниваются, столкновения могут продолжать изменять скорости, так что отдельно взятые молекулы могут перемещаться быстро в один момент времени и медленно — в другой; однако средняя величина скорости изменяться больше не будет. Система в целом достигла промежуточной равновесной температуры, поток теплоты прекратился.

Как в жидкостной теории теплоты, так и в атомной теории движения теплота рассматривается спонтанно протекающей из горячей области к холодной; это в конце концов является утверждением второго закона термодинамики. Все же относительно такого потока теплоты между этими двумя теориями существует принципиальная разница.

В жидкостной теории поток теплоты абсолютен. Он способен только к движению «вниз по холму», а движение «на подъем» не представляется возможным. В атомной теории движения, однако, поток теплоты является статистической величиной и не абсолютен. Результатом случайных изменений скорости в результате случайных столкновений является высокая вероятность, но не уверенность в том, что поток теплоты протекает от горячего к холодному. Чрезвычайно маловероятным, но не невозможным является тот факт, что при каждом столкновении более быстрая молекула сможет получить прирост скорости за счет более медленной, так что результатом этого может явиться то, что теплота потечет «на подъем» — от холодного к горячему.

Максвелл предпринял попытку еще более развить эту возможность при помощи научной фантазии. Представьте себе два наполненных газом сосуда, Н и С, связанных между собой трубкой с вентиляем. Сосуд Н является более горячим, и молекулы газа в нем в среднем двигаются более быстро.

Но как мы помним, Н-молекулы двигаются быстрее, чем С-молекулы, только среднестатистически. Случается, что некоторые Н-молекулы двигаются медленно, а некоторые С-молекулы, случается, двигаются быстро. Предположим, что у нас есть некое разумное существо размером с атом, которое может контролиро-

вать положение вентиля трубки (это существо обычно упоминается как «демон Максвелла»). Когда ему встречается одна из небольшого количества медленных Н-молекул, «демон Максвелла» открывает трубку с вентиляем и позволяет ей перейти в С-камеру. Когда же он замечает одну из небольшого количества быстрых С-молекул, «демон Максвелла» открывает трубку с вентиляем и позволяет ей перейти в Н-камеру. Во все остальное время «демон» держит трубку с вентиляем закрытой. Таким образом, имеется медленный, но устойчивый поток низкоскоростных молекул в камеру С и такой же медленный, но одинаково стабильный поток высокоскоростных молекул в камеру Н. Средняя скорость молекул в камере С снижается, в то время как средняя скорость молекул в камере Н повышается, и поток теплоты идет «вверх по холму» — от холодного к горячему.

В обычном мире вероятность возникновения таких «подъемных» потоков теплоты (или любой другой формы энергии) настолько фантастически мала, что будет достаточно безопасно ее игнорировать. Однако изменение условий от «уверенности» к «вероятности» имеет принципиально важное значение. Поскольку в течение XX столетия ученые все глубже и глубже проникали в субатомный мир, статистический анализ событий и их последствий стал все более и более важным, а любое событие, которое имеет статус «невероятного» (но не «невозможного»), получает определенный шанс иметь место, по мере того как мы все более и более убеждаемся в существовании комбинаций типа «причина/эффект», которые обычно кажутся нам очень, очень, очень невероятными. Короче говоря, статистическая интерпретация Максвеллом потока теплоты отмечает собой один из первых шагов по пути от «классической физики» XIX столетия (которую мы рассматривали в этом томе) к «современной физике» XX столетия.

Теперь возвратимся к вопросу о том, как же энтропия может интерпретироваться в свете атомного представления о движении теплоты? Энтропия согласно второму закону термодинамики всегда увеличивается. Хорошо, тогда что же является тем, что всегда увеличивается в результате молекулярных столкновений? Рассматривая этот вопрос в свете идущего разговора, мы можем сказать, что увеличивается замедление молекул. Если первоначально в системе теплота была накоплена, сконцентрирована в одной части, а в другой ее части имелся дефицит теплоты, то столкновение молекул замедляет их увеличение и распространяет теплоту более равномерно по всей системе. В конце концов, когда достигнуто температурное равновесие, теплота распространяется по системе настолько равномерно, насколько это возможно.

Энтропию можно поэтому интерпретировать как меру неравномерности, с которой распределена энергия. Этот подход может применяться к любой форме энергии, а не только к тепловой. Когда электрическая батарея разряжается, ее электрическая энергия все более равномерно распределится по ее веществу и по материалу, вовлеченному в передачу электрического тока. В ходе непосредственной химической реакции химические энергии более равномерно распределяются по вовлеченным в нее молекулам.

Более того, равномерность распределения энергии «более равномерна», если так можно выразиться, в том случае, когда она распределена среди молекул, находящихся в хаотическом движении. Преобразование любой формы нетепловой энергии в тепловую приводит к увеличению равномерности в распределении энергии, а потому — к увеличению энтропии.

По этой причине любой процесс, включающий в себя передачу энергии, приводит к возникновению теплоты как побочного продукта. Тело, находящееся в движении, произведет теплоту в результате трения или сопротивления воздуха, и часть его кинетической энергии будет распространяться по молекулам, с которыми оно вошло в контакт. При преобразовании электрической энергии в свет или движение также производится и теплота, что мы можем легко обнаружить, прикоснувшись к электрической лампочке или электродвигателю.

И наоборот, это означает, что если бы теплота была полностью преобразована в некоторую форму нетепловой энергии, то автоматически это вызвало бы уменьшение энтропии. Но уменьшение энтропии в замкнутой системе настолько чрезвычайно маловероятно, что возможность его возникновения при обычных условиях можно полностью игнорировать. Да, конечно, некоторое количество теплоты может быть преобразовано в другие формы энергии, но только за счет дальнейшего увеличения энтропии теплоты, остающейся в системе. В паровом двигателе, например, преобразование энергии теплоты пара в кинетическую энергию поршней, то есть в часть, уменьшающую энтропию, приводит к ее увеличению за счет (все большего) увеличения энтропии горящего топлива, благодаря которому производится пар.

Увеличивающаяся равномерность в распространении энергии может интерпретироваться как увеличивающийся «беспорядок». «Порядок» мы интерпретируем как качество, характеризующее расположение частей системы: например, распределение вещей по категориям, расположение карточек в алфавитном порядке, занесение предметов в список по мере увеличения их количества. Равномерное распространение предметов должно игнорировать

все это дифференцирование. Как результат мы получаем, что специфическая категория объектов равномерно распределяется среди остальных категорий: такое явление мы можем назвать «максимальным беспорядком».

По этой причине, когда мы перемещаем аккуратно сложенную колоду карт в случайном порядке, мы можем говорить об увеличении энтропии. Да и вообще все процессы, которые непосредственно происходят, кажется (в соответствии со вторым законом термодинамики), вызывают увеличение беспорядка. Если не предпринять специальных усилий, чтобы полностью изменить порядок вещей (что увеличит нашу собственную энтропию), то опрятные комнаты будут иметь тенденцию стать неряшливыми, небрашными, блестящие объекты будут иметь тенденцию стать мутными, пыльными, вещи, которые мы запомнили, будут иметь тенденцию забываться, и так далее.

Таким образом, здесь, в этой книге, мы пришли к достаточно парадоксальной симметрии. Мы начали с греческих философов, сделавших первую попытку установить систематические обобщения, лежащие в основе порядка Вселенной. Они были уверены, что такой порядок, в основном простой и постижимый, существует. В результате развития предложенных ими идей мы действительно обнаружили такие обобщения. И из них наиболее мощные из всех обнаруженных обобщений — первые два закона термодинамики — демонстрируют нам, что порядок во Вселенной прежде всего бесконечно увеличивает беспорядок в ней же.

Часть вторая

СВЕТ, МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Глава 1

МЕХАНИЗМ

Ньютоновское представление

В первом томе этой книги я рассказывал о трех видах энергии: движении (кинетическая энергия), звуке и тепле. Оказалось, что звук и тепло — это в конечном итоге формы кинетической энергии.

В случае звука атомы и молекулы, составляющие воздух или иную среду, в которой звук распространяется, перемещаются туда и обратно упорядоченным образом. Таким образом, волны сжатия и разрежения распространяются с фиксированной скоростью.

Тепло же, с другой стороны, связано с хаотичным движением атомов и молекул, из которых состоит любое вещество. Чем больше средняя скорость такого движения, тем больше интенсивность тепла (см. ч. I).

В середине XIX века шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) и австрийский физик Людвиг Больцман (1844—1906) детально разработали теорию, в которой тепло рассматривалось как хаотичное движение молекул (молекулярно-кинетическая теория).

Тогда еще заманчивее стало предполагать, что все феномены во Вселенной могут быть рассмотрены как основанные на движении.

С этой точки зрения Вселенную можно представить состоящей из огромного числа частиц; каждая частица, перемещаясь, влияет на соседние частицы, с которыми входит в соприкосновение.

Это такой же процесс, какой мы видим, например, в механизме обыкновенных часов. Одна деталь часов воздействует на

другую через раскручивающуюся пружину, через движение сцепленных шестеренок, через рычаги; в общем — посредством всех видов физического взаимодействия.

В других машинах подобные взаимосвязи могут состоять из бесконечных ремней, блоков, водяных струй и т. д. В микромире — это атомы и молекулы, которые находятся в движении и воздействуют друг на друга, когда сталкиваются. В космосе — это планеты и звезды, находящиеся в движении и воздействующие друг на друга посредством гравитации.

Все от необъятной Вселенной до ее крошечных частей можно рассматривать как подчиняющееся тем же самым законам механики физического взаимодействия, что и привычные нам машины.

Эта философия механизма, или механистическая интерпретация Вселенной. (Гравитационное воздействие, как и вкратце покажу, не совсем попадает под это представление.)

Взаимодействие через движение подчиняется прежде всего трем законам движения (см. ч. 1), предложенным Исааком Ньютоном (1642—1727) в 1687 году, и закону всемирного тяготения, предложенному им же. Следовательно, механистический взгляд на Вселенную можно назвать «ньютоновской моделью Вселенной».

Весь первый том книги посвящен ньютоновской модели. Он возвращает нас к середине XIX века, когда этот взгляд преодолел все препятствия и казался торжествующим и непоколебимым.

Вот пример: в первой половине XIX века было обнаружено, что движение Урана по своей орбите не совсем соответствует вычисляемому по ньютоновскому закону всемирного тяготения. Разница между тем положением Урана, которое ожидалось по вычислениям, и тем, которое было на самом деле, была совсем небольшой; однако сам факт этой разницы мог разрушить все ньютоновские построения.

Два молодых астронома, англичанин Джон Кауч Эдамс (1819—1892) и француз Урбен Жан Жозеф Леверье (1811—1877), решили, что теория Ньютона не может быть неверной. Причиной несоответствия наверняка стало существование неизвестной планеты, гравитационное влияние которой на Уран не было учтено.

Независимо друг от друга они просчитали, где должна находиться такая планета, чтобы именно таким образом повлиять на движение Урана, и пришли к одному и тому же выводу. В 1846 году предполагаемая планета была обнаружена. После такой победы кто еще мог сомневаться в пользе ньютоновской картины мира?

И все же к концу столетия обнаружилось, что ньютоновская теория является не более чем приближением. Вселенная оказалась сложнее, чем это предполагалось. Потребовалось найти более всеобъемлющие и уточненные объяснения.

Воздействие на расстоянии

Начало краха можно было предвидеть в той же самой середине XIX века, на которую пришелся пик ньютоновства. По крайней мере, это начало ясно просматривается сейчас, веком позже, задним числом. Змеем ньютоновского рая оказалось нечто, именуемое «воздействием на расстоянии».

Если мы рассмотрим роль движения в окружающей нас обыденной жизни, стараясь не проникать ни в космические масштабы, ни в микромир, то покажется, что тела взаимодействуют через контакт. Если вы хотите поднять камень, вы сначала должны дотронуться до него руками или использовать рычаг, который одним концом прикасается бы к камню, а другим — к вашим рукам.

Разумеется, если вы запустите мяч катиться по земле, он будет продолжать движение даже тогда, когда ваша рука уже его не касается; этот факт ставил в тупик философов древности и Средневековья.

Первый закон Ньютона устранил эту проблему, объявив, что приложенные силы требуется только для изменения скорости (см. ч. I).

Для того чтобы увеличить скорость катящегося мяча, по нему надо ударить молотком, ногой или каким-нибудь предметом; ему нужен контакт с материей. (Даже реактивный выхлоп, движущийся назад и толкающий тело вперед по третьему закону Ньютона, отталкивается напрямую от тела.) Так же замедлить качение мяча может трение о землю, по которой он катится, касаясь ее, сопротивление окружающего воздуха, сквозь который он катится, касаясь его, или мягкое столкновение с материей, которой он опять же должен коснуться.

Материальный контакт может быть перенесен с одного места в другое посредством движения. Я могу стоять на одном конце комнаты и разбить бутылку, находящуюся на другом конце, бросив в нее мяч. Я вложил силу в мяч, касаясь его; затем мяч передаст силу бутылке, касаясь ее. В результате получаются два случая контакта, связанные движением.

Если бутылка неустойчиво стоит на краю стола, я могу разбить ее, просто подув на нее. В этом случае я брошу в нее не мяч, а молекулы воздуха, но принцип останется тем же.

Возможно ли, таким образом, чтобы два тела взаимодействовали без всякого физического контакта? Другими словами, могут ли два тела взаимодействовать в вакууме без того, чтобы какие-либо материальные тела этот вакуум пересекали? Такое воздействие на расстоянии очень сложно себе представить: легко понять, что это должно быть явно невозможным.

К примеру, древнегреческий философ Аристотель (384—322 до н. э.), определяя природу звука, частично отказывался признать возможность воздействия на расстоянии. Аристотель понимал, что человек может слышать из-за разницы в воздухе, так как дрожащий предмет ударял по касающейся его порции воздуха, а эта порция ударяла по следующей, и этот процесс продолжался до тех пор, пока очередная порция воздуха не попадала в ухо.

Грубо говоря, именно это и происходит при распространении звука в воздухе или иной среде. На базе такого объяснения Аристотель установил, что в вакууме звук передаваться не может. В то время у человека не было средств для создания вакуума, но двумя тысячами лет позже, когда появилась возможность получать вакуум вполне приличного качества, правота Аристотеля подтвердилась.

Пользуясь подобной аргументацией, можно сделать вывод, что любое воздействие, которое кажется удаленным, на самом деле представляет собой сложную серию прикосновений и что в вакууме никакое воздействие невозможно. До XVII века считалось, что вакуума в природе не существует, что это лишь философская абстракция, поэтому проверить это предположение не представлялось возможным.

Однако в 40-х годах XIX века стало ясно, что атмосфера не может простираться бесконечно высоко (см. ч. I). Скорее всего, она не больше чем несколько десятков миль высотой, в то время как Луна отстоит от Земли на четверть миллиона миль, а другие небесные тела находятся еще дальше. Поэтому выходило, что все воздействия небесных тел друг на друга должны происходить в долгих пространствах, заполненных вакуумом.

Одно из подобных воздействий очевидно каждому; свет от Солнца достигает нас, а мы знаем, что до Солнца 93 000 000 миль¹.

Этот свет может воздействовать на сетчатку глаза. Он может оказывать воздействие на химические реакции, происходящие в тканях растений; превращаясь в тепло, он может выпаривать

¹ В самые сильные телескопы можно различить свет, прошедший через 35 000 000 000 000 000 000 миль вакуума.

воду и производить дождь, теплый воздух и ветер. Фактически источником всей энергии, используемой человеком, является в конечном итоге солнечный свет.

Солнце оказывает огромное воздействие на Землю через протяженный вакуум.

Тогда, с провозглашением Ньютоном закона всемирного тяготения в 1687 году, был добавлен второй тип воздействия, по которому считалось, что каждое имеющее массу тело обладает силой притяжения по отношению к другим телам во Вселенной, действующей сквозь бесконечный вакуум.

Когда два тела относительно близки друг к другу, как Земля и Луна или как Земля и Солнце, то сила притяжения действительно велика, и два тела втянуты в искривленную орбиту вокруг своего общего центра тяжести. Если одно тело значительно больше другого, этот общий центр тяжести находится практически там же, где и центр большего тела; тогда меньшее вращается вокруг него.

На самой Земле были известны еще два способа передачи силы сквозь вакуум. Магнит может притягивать к себе железо, а электрически заряженное тело может притягивать практически любое легкое вещество. Один магнит может или притягивать, или отталкивать другой; один электрический заряд может либо притягивать, либо отталкивать другой. Эти притяжения и отталкивания свободно проходили сквозь самый чистый вакуум, который только удавалось создать. Итак, в середине XIX века были известны четыре способа передачи силы через вакуум и соответственно четыре возможных вида воздействия на расстоянии: свет, гравитация, электричество и магнетизм. И снова представление о воздействии на расстоянии оказалось неприемлемым для физиков XIX столетия, так же как и для философов Древней Греции.

Оставались два возможных решения дилеммы, два способа избежать мысли о воздействии на расстоянии. Во-первых, предположить, что вакуум не является вакуумом в полном смысле. Очевидно, что в хорошем вакууме содержится так мало обычной материи, что ее можно проигнорировать. Но предположим, что обычная материя — не единственная форма вещества, которая может существовать.

Аристотель предположил, что веществом Вселенной, лежащей вне Земли, является нечто, что он назвал *эфиром*. Понятие эфира сохранялось в современной науке даже тогда, когда все остальные части Аристотелевой физики обнаружили свою несостоятельность и были отброшены. Однако он сохранялся в более уложившейся версии. Он составлял структуру простран-

ства, заполняя все, что считалось вакуумом, и, более того, проникать внутрь всей обычной материи.

Ньютон отказался объяснить, как гравитация передается от тела к телу через пустоту. «Я не делаю предположений», — строго сказал он. Однако же его последователи толковали, что гравитация прокладывает путь сквозь эфир так же, как звук прокладывает путь сквозь воздух. Гравитационное воздействие тела будет выражено как искажение той части эфира, которая с ним контактирует, это искажение будет исправляться, в процессе чего будет искажать соседний участок эфира. Перемещаясь, это искажение в конце концов достигнет другого тела и повлияет на него. Можно представить такое перемещающееся искажение как «эфирную волну».

Другой выход из дилеммы о воздействии на расстоянии заключался в том, чтобы допустить, что силы, которые заставляют почувствовать себя через вакуум, на самом деле проходят сквозь него в виде потока мельчайших частиц. Эти частицы могут быть слишком малы, чтобы их можно было увидеть, но, тем не менее, они есть. К примеру, свет может состоять из мчащихся с огромной скоростью частиц, пересекающих вакуум. Проходя от Солнца к Земле, они сперва находятся в контакте с Солнцем, затем — с Землей, и получается, что никакого воздействия на расстоянии нет, как и в случае бросания мяча в бутылку.

Два столетия после Ньютона физики колебались между этими двумя точками зрения: волны или частицы. Первое требовало эфира, второе — нет. Этот том будет посвящен по большей части деталям колебания между этими точками зрения. В XVIII веке доминировало представление о частицах, в XIX — о волнах. Затем, когда наступил XX век, произошла любопытная вещь — две точки зрения растворились одна в другой и стали едины. Чтобы объяснить, как это произошло, давайте начнем с первой сущности, известной своим прохождением сквозь вакуум, — со света.

Глава 2

СВЕТ

Передача

Очевидно, что свет вломился в сознание человека, как только это сознание возникло. Происхождение самого слова похоронено глубоко в тумане начала индоевропейских языков. Важность света была высоко оценена самыми первыми мыслителями. Даже

в Библии первый приказ Бога в создании мира гласил «Да будет свет!».

Свет распространяется по прямой. Это каждый из нас знает с детства. Мы уверены в том, что если мы смотрим на предмет, то этот предмет находится там, куда мы смотрим. (Это полностью верно, если только мы не смотрим в зеркало или сквозь стеклянную призму, но эти исключения из общего правила так несложно запомнить.)

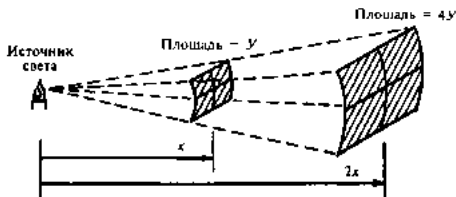
Такое прямолинейное движение света, его *прямолинейное распространение*, является базовым допущением *оптики* (от греческого «взгляд»), изучающей физику света. Там, где поведение света анализируется так, что его лучи представляют прямые линии, и где эти линии изучали геометрическими методами, мы говорим о *геометрической оптике*. Именно геометрической оптике посвящены эта и следующая главы.

Представьте себе источник света, например пламя свечи. При условии, что никакой материальный объект не перекроет ваш угол зрения, пламя будет видно с одинаковой легкостью с любого направления. Соответственно свет может быть представлен как распространяющийся во все стороны от своего источника. К примеру, солнце иногда рисуют (в двумерном отображении) как круг с линиями, изображающими лучи, расходящимися в стороны со всех сторон окружности.

Такие линии в рисунке солнца напоминают спицы колеса, расходящиеся от ступицы. По-латыни спица колеса — *радиус* (это дает нам слово для обозначения прямой линии, исходящей из центра круга к окружности). Самая малая порция светового излучения напоминает линию по своей прямой и предельно малой толщине — это *световой луч*.

Солнечный луч, светящий через дыру в занавеске, образует световой столб, расширяющийся на промежутке от дыры до противоположной стены, и на месте его пересечения со стеной появляется ярко освещенный круг. Если воздух в комнате нормально запылен, то этот столб света будет виден как столб мерцающих пылинок. Прямые линии, ограничивающие световой столб, будут наглядным свидетельством прямолинейного распространения света. Такой световой столб является *пучком лучей*. Пучок лучей можно рассматривать как совокупность бесконечного количества бесконечно тонких световых лучей.

Источники света не одинаковы по своей яркости. Стоваттная лампочка дает больше света, чем свечка, и несравнимо больше света дает нам солнце. Чтобы измерять количество света, излучаемого световым источником, физики должны были договориться о принятии одного конкретного источника света за стандарт.



Изменения интенсивности света в зависимости от расстояния

Проще всего было выбрать стандартную свечку, сделанную из конкретного материала (лучше всего восковую), приготовленную определенным образом и отлитую по установленным требованиям.

Свет, излучаемый такой свечкой в горизонтальном направлении, был признан равным одной *канделе*, *свече*. Сейчас свечу заменили электрические лампы установленной формы, особенно в Соединенных Штатах, но мы все равно говорим о международной *канделе*, о единице измерения количества света, примерно равной старой свече.

Яркость источника света каким-то образом изменяется в зависимости от расстояния, с которого он наблюдается: чем больше расстояние, тем тусклее свет кажется. Рядом со свечкой книгу можно читать без усилий; чуть отнести ее подальше — и сначала читать будет трудно, а затем — невозможно.

Это неудивительно. Допустим, что от пламени свечи исходит строго определенное количество света. Так как он распространяется во все направления, это строго отмеренное количество будет растянуто на все большее и большее пространство. Можно представить границу освещенного пространства как поверхность шара, где источник света находится в середине. Поверхность этой сферы будет становиться все больше и больше, по мере того как свет будет распространяться наружу.

Из геометрии нам известно, что площадь поверхности сферы пропорциональна квадрату длины радиуса. Если расстояние от источника света (радиус воображаемой сферы, о которой мы рассуждаем) удваивается, то площадь, по которой распространяется свет, увеличивается в 4 раза. Если расстояние утраивается — площадь увеличивается в 9 раз. Общее количество света на всей освещенной площади останется тем же самым, но освещенность, то есть количество света, падающего на конкрет-

ный участок поверхности, должна уменьшаться. Более того, она должна уменьшаться пропорционально квадрату расстояния от источника света. Удвоение расстояния уменьшит силу света до $\frac{1}{4}$ первоначальной; утроение расстояния — до $\frac{1}{9}$.

Допустим, мы используем квадратный фут как единицу площади поверхности и представим, что квадратный фут искривлен так, что он стал частью сферической поверхности таким образом, что все ее точки равноудалены от расположенного в центре сферы источника света. Если наш квадратный фут находится на расстоянии одного фута от источника света, производящего одну канделу света, то сила света, получаемого поверхностью, — 1 *фут-кандела*. Если поверхность перемещается на расстояние двух футов, то интенсивность его освещения — $\frac{1}{4}$ фут-канделы и т. д.

Поскольку освещенность определяется как количество света на единицу площади, мы можем также выразить его в количестве кандел на квадратный фут. Однако для этих целей обычно используется другая единица измерения — *люмен* (от латинского слова, означающего «свет»). Так, если один квадратный фут на определенной дистанции от источника света получает 1 люмен, то два квадратных фута получают 2 люмена света, а половина квадратного фута получает $\frac{1}{2}$ люмена. Однако во всех случаях освещенность остается 1 люмен/кв. фут. Итак, люмен определяется таким образом, что освещенность в 1 люмен/кв. фут равняется 1 фут-канделе.

Представьте себе источник света в 1 канделу в центре пустой сферы с радиусом в один фут. Освещенность на каждом участке внутренней поверхности сферы — 1 фут-кандела, или 1 люмен/фут². Таким образом, каждый квадратный фут внутренней поверхности получает 1 люмен освещения. Площадь поверхности сферы равна $4\pi^2$ кв. фут. Поскольку r , радиус сферы, равняется в нашем случае 1 футу, то количество квадратных футов площади поверхности нашей сферы равняется 4π . Значение π (греч. «пи») примерно равно 3,14, поэтому можно сказать, что площадь этой сферы — около 12,56 кв. фут. Сила света (которая в нашем случае равна 1 канделе), таким образом, доставляет 12,56 люмена, поэтому мы можем сказать, что одна кандела равна 12,56 люмена.

Свет распространяется полностью и беспрепятственно только в вакууме. Все виды материи в той или иной степени поглощают свет. Большинство видов материи делают это в такой степени, что поглощают весь падающий на них свет и являются *светопоглощающими*.

Если светопоглощающий предмет поставлен между источником света и освещаемой поверхностью, свет будет проходить

вокруг предмета, но не сквозь него. Со стороны объекта, противоположной источнику света, таким образом, появится темное пространство, именуемое *тенью*. Там, где это пространство попадет на освещаемую поверхность, будет неосвещенный участок; это двумерная проекция тени, которую мы обычно этим словом и называем.

Луна отбрасывает тень. Половина ее поверхности подставлена прямым лучам солнца; другая половина расположена таким образом, что светонепроницаемое вещество самой Луны закрывает Солнце. Мы видим только освещенную сторону Луны, и поскольку эта освещенная сторона повернута к нам углом, который изменяется от 0 до 360° за протяжении календарного месяца, то мы и видим, как Луна проходит все фазы своего цикла.

Далее, лунная тень падает не только на собственную поверхность Луны, но и дальше распространяется в пространство на двести тысяч миль. Если бы Солнце было точечным источником света, то есть весь свет исходил бы из одной точки в центре Солнца, — то эта тень тянулась бы бесконечно.

Однако Солнце излучает свет по всей своей поверхности, и чем дальше предмет находится от Луны, тем меньше ее видимые размеры, пока наконец она не станет такой маленькой, что уже не сможет полностью закрывать Солнце, которое гораздо больше ее. С этого момента Луна уже не отбрасывает полную тень, а полная тень, или *умбра* (от латинского *umbra* — тень), уменьшается до точки. Однако умбра тянется достаточно далеко, чтобы достигнуть поверхности Земли, и иногда, когда Луна оказывается точно между Землей и Солнцем, случается *солнечное затмение* на небольшом участке земной поверхности.

Земля тоже отбрасывает тень, и половина ее поверхности находится в этой тени. Земля оборачивается вокруг собственной оси за двадцать четыре часа, и каждый из нас переживает эту тень (ночь) каждые сутки. (Это не совсем верно для полярных областей по причинам, которые лучше описаны в учебнике астрономии.) Луна может попадать в земную тень, которая гораздо длиннее и шире, чем тень от Луны, и тогда мы можем наблюдать *лунное затмение*.

Светонепроницаемая материя не абсолютно непроницаема. Если она становится достаточно тонкой, немного света может пройти сквозь нее. Например, свет может проходить сквозь тонкий золотой лист, хотя само по себе золото светонепроницаемо.

Некоторые виды материи поглощают так мало света (на единицу толщины), что с той толщиной, с которой мы их встреча-

ем в повседневной жизни, не особенно влияют на прохождение сквозь них света. Такие формы материи называются прозрачными. Лучшим примером прозрачной материи является воздух. Он так прозрачен, что мы редко осознаем его присутствие, поскольку мы видим предметы сквозь него так, как будто никакого препятствия и нет. Почти все газы прозрачны. Множество жидкостей, например вода, тоже прозрачны.

А вот среди твердых видов материи прозрачность — исключение. Одной из редких естественных субстанций, прозрачных в твердом виде, является кварц, и изумленные греки считали его формой теплого льда. Само слово «кристалл», впервые примененное к кварцу, происходит от греческого «лед», а слово «кристальный» одним из своих значений имеет «прозрачный».

Прозрачность становится тем менее выраженной, чем толще становятся слои обычно прозрачных веществ. Небольшое количество воды явно прозрачно, и камни на дне чистого пруда четко видны. Однако когда ныряльщик погружается в воду моря, достигающий его свет становится все слабее и слабее, а на глубине 450 футов свет почти уже не проникает вглубь. Слои воды большей толщины так же непрозрачны, как и слои камня такой же толщины, и морское дно уже невозможно увидеть сквозь покрывающую его «прозрачную» воду.

Воздух поглощает свет еще меньше, чем вода, соответственно он менее прозрачен. Несмотря на то что мы находимся на дне воздушного океана глубиной во много миль, свет беспрепятственно достигает нас, а мы беспрепятственно можем наблюдать куда более слабый свет звезд¹.

Тем не менее некоторое поглощение все же присутствует: подсчитано, что 30 процентов света, достигающего Земли из космоса, поглощается атмосферой. (Некоторые виды радиоактивного излучения, отличные от видимого света, поглощаются атмосферой с куда большей эффективностью, и толщины покрывающего нас воздуха достаточно, чтобы в данном случае он оказался непрозрачным для этих излучений.)

Свет — это форма энергии, и, поскольку он с легкостью может переходить в другие виды энергии, его нельзя уничтожить. Кажется, что при поглощении непрозрачной материей (или толстым слоем прозрачной материи) он уничтожается, но на самом деле он переходит в тепло.

¹ Строго говоря, если бы атмосфера была сжата до плотности воды, ее высота составляла бы всего 33 фута; слой воды такой толщины в значительной мере сохраняет прозрачность.

Отражение

Утверждение о том, что свет всегда движется по прямой, совершенно верно только в одном случае: когда свет движется в однородной среде, например в вакууме или в воздухе, обладающем по всей своей протяженности одинаковой температурой и плотностью. Если же в среде происходят изменения, например когда свет в воздухе натывается на непрозрачное тело, правило о прямолинейном распространении теряет свою строгость. Свет, не поглощенный телом, резко меняет направление, как и бильярдный шар, ударяющийся о борт. Такой «отскок» света от непрозрачного предмета называется *отражением*.

Свет отражается от предмета по тем же законам, по которым бильярдный шар отскакивает от борта. Представьте себе плоскую поверхность, способную отражать свет. Линия, перпендикулярная к этой поверхности, называется *нормалью* (от латинского названия плотницкого уголка, который использовали для того, чтобы рисовать перпендикуляры)¹. Луч света, движущийся по нормали, ударяется в отражающую поверхность под прямым углом и отлетает назад по своей же траектории. Так же поведет себя и летящий на скорости бильярдный шар.

Если луч света движется под углом по отношению к поверхности, то и к нормали он придется под углом. Луч света, движущийся к поверхности, называется *падающим лучом*, а его угол к нормали называется *углом падения*. *Отраженный луч* пойдет обратно с другой стороны нормали, под новым углом к ней, под *углом отражения*. Падающий луч, отраженный луч и нормаль лежат в одной плоскости, то есть можно положить плоский лист таким образом, чтобы по нему проходили все три линии.

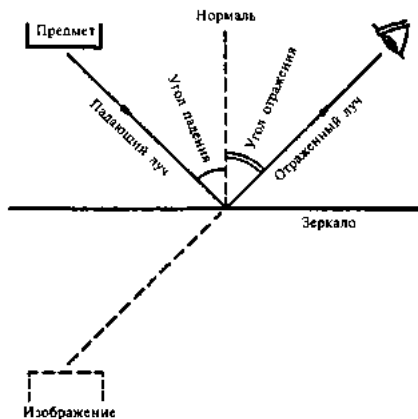
Эксперименты с лучами света и отражающими поверхностями в запыленном воздухе, в котором лучи света становятся видимыми, показывают, что угол падения (i) всегда равен углу отражения (r). Это может быть выражено просто:

$$i = r. \quad (\text{Уравнение 2.1})$$

Фактически найти действительно ровную поверхность трудно. Большинство поверхностей имеют крошечные неровности, даже если кажутся плоскими. Пучок света, состоящий из параллельных лучей, не даст одного и того же угла падения. Один луч коснется

¹ На самом деле слово «нормально» стало нам настолько знакомо своим значением естественности, распространенности, сообразности, что его первоначальное значение «строго перпендикулярный к плоскости или другой линии» уже почти забыто.

поверхности под углом падения 0° , другой упадет рядом, тем не менее поверхность в этом месте может быть искривлена на 10° по отношению к свету; он отразится под углом 10° в другом направлении, что в сумме даст 20° , и т. д. В результате пучок падающих лучей будет разбит отражением, и отраженные лучи разойдутся во все стороны по широкой дуге. Это будет *рассеянное отражение*.



Отражение света

Почти все отражения, с которыми мы сталкиваемся, принадлежат к этому виду. Поверхности, которые рассеянно отражают свет, хорошо видны под разными углами, поскольку под любым углом от предмета к глазу движется множество лучей света.

Если поверхность достаточно плоская, то большая часть параллельных падающих лучей будет отражена под тем же углом. В таком случае, хотя вы и можете видеть предмет с разных углов, вы можете видеть гораздо больше света, если ориентируете себя под правильным углом, чтобы получить основную порцию отражения. Тогда вы получите «первый план».

Если поверхность чрезвычайно плоская, почти все параллельные лучи из падающего пучка отражаются также параллель-

но. В результате ваши глаза воспримут отраженный пучок света так же, как восприняли бы и его падающий оригинал.

Например, лучи света, рассеянно отраженные от лица человека, дают набор информации, который глаза воспринимают, а мозг интерпретирует как лицо человека. Если эти лучи попадают на чрезвычайно плоскую поверхность и отражаются без общего искажения, вы все еще будете воспринимать этот свет как описывающий лицо человека.

Однако ваши глаза не могут рассказать историю света, который на них попадает, не могут они без дополнительной информации и различить, отражен свет или нет. Поскольку вы с детства привыкли считать свет движущимся по прямой, вы и в этом случае будете рассуждать так же.

Лицо человека, видимое в отражении, воспринимается так, как если бы вы находились позади отражающей поверхности, где были бы эти лучи, если бы они попали на ваши глаза без вмешательства зеркала.

Лицо, которое вы видите в зеркале, — это *изображение*. Так как его на самом деле нет там, где оно должно было бы быть (вы посмотрели за зеркало и ничего там не обнаружили), то это *мнимое изображение* (владеющее свойствами объекта при отсутствии самого объекта). Однако оно находится на таком же расстоянии «за» зеркалом, на каком объект находится перед ним, и представляется того же размера, что и сам объект.

В первобытные времена единственной поверхностью, достаточно плоской, чтобы создавать отражение, была вода. Такие отражения несовершенны, потому что вода редко бывает совершенно гладкой, и, даже когда она таковой является, слишком много света пропускается водой и слишком мало отражается, поэтому изображение тусклое и смутное. В таких условиях первобытный человек мог и не разобрать, кто это на него смотрит. (Вспомните греческий миф о Нарциссе, который безнадежно влюбился в собственное отражение в воде и утонул, стремясь соединиться с ним.)

Отполированная металлическая поверхность отражает гораздо больше света, и именно металлические поверхности использовались в древние времена и в Средневековье в качестве зеркал. Однако такие поверхности легко царапаются и портятся. Веке в XVII распространилось сочетание стекла с металлом. Тонкий слой металла накладывался на плоское стекло. Если посмотреть со стороны стекла, можно увидеть яркое отражение от металлической поверхности другой стороны. Стекло предохраняло металл от повреждений. Все это получило название *зеркала* (в английском — *mirror*, от латинского слова, означавшего

«смотреть с изумлением», что вполне точно описывало чувства, возникавшие у наших предков при лицезрении собственного изображения). Сохранное отражение от чрезвычайно плоской поверхности называется *зеркальным отражением*. Изображение, которое отражается в зеркале, не полностью совпадает с отражаемым объектом.

Предположим, что вы стоите лицом к лицу с другом. Его правая сторона для вас слева, его левая сторона для вас справа. Если вы хотите пожать ему руку — правой рукой правую, то его правая рука окажется с другой стороны, нежели ваша.

Теперь представьте, что ваш друг встал сзади вас, но немного сбоку, чтобы вас обоих можно было видеть в зеркале. Забудьте про свое отражение и сосредоточьтесь на отражении друга. Сейчас вы смотрите не на своего друга, а на его отражение и видите перемену. Его правая сторона для вас — справа, а левая — слева. Сейчас все детали вашей прически находятся с одной стороны, и, если вы вытянете вперед правую руку, а ваш друг вытянет свою, ваши вытянутые руки окажутся с одной и той же стороны.

Короче, в отражении право и лево меняются местами; изображение, в котором произошла такая перемена, — *зеркальное изображение*. Однако верх и низ в зеркальном отражении местами не меняются. Если ваш друг встанет на голову, его отражение сделает то же самое.

Кривые зеркала

Обычное зеркало, с которым мы хорошо знакомы, — *плоское зеркало*. Для того чтобы производить четкое отражение, отражающая поверхность должна быть плоской. Зеркало может быть как прямым, так и кривым. Параллельные лучи света, отраженные от искривленной поверхности, больше не являются параллельными, но и во всех направлениях они не разлетаются. Отражение упорядоченно, и лучи света могут *сходиться* или *расходиться*.

Самый простой пример искривления — это часть сферы. Если вы смотрите снаружи, так что она похожа на горку и ближе всего к вам ее центр, то это *выпуклая поверхность*. Если вы смотрите изнутри, как будто глядите в яму, и центр ее максимально от вас удален, то это *вогнутая поверхность*.

Сферический участок стекла, правильным образом посеребренный, является *сферическим зеркалом*. Если он посеребрен по выпуклой поверхности так, что зеркальной является его вогнутая сторона, то это, разумеется, вогнутое сферическое зеркало.

Центр сферы, частью которой является кривое зеркало, является *центром искривления*. Линия, соединяющая центр искривления со средней точкой зеркала, называется *главной осью* зеркала.

Допустим, пучок света, параллельный главной оси, падает на вогнутую отражающую поверхность. Луч, который оказывается на самой главной оси, падает перпендикулярно и отражается таким же. Луч же, падающий рядом с главной осью, но не на нее, зеркало отражает так, что луч уходит под небольшим углом к нормали. Он отражается по другую сторону от нормали, немного искривляясь по направлению к главной оси. Если луч света падает дальше от главной оси, зеркало больше изменяет его угол и сильнее искривляет его по направлению к главной оси. Поскольку зеркало — участок сферы и отражает одинаково по всем направлениям от главной оси, то это одинаково верно для всех лучей, падают ли они справа или слева от главной оси, выше или ниже ее. Отражения от каждой части зеркала сближаются к главной оси; отраженные лучи сходятся.



Вогнутое сферическое зеркало

Если бы мы рассматривали только те лучи, которые падают близко к середине зеркала, мы обнаружили бы, что они сходятся таким образом, чтобы встретиться на ограниченном пространстве; фактически в одной точке. Эта точка называется *фокусом* (от латинского слова, означающего «очаг, где пылает огонь»). Фокус падает на главную ось на полпути от середины зеркала до центра искривления.

Фактически отраженные лучи встречаются не в самой точке фокуса. Это становится очевидным, если мы рассмотрим лучи, падающие на сферическое зеркало в отдалении от главной оси. Отражения этих лучей проходят на достаточно большом расстоянии от фокуса. Это называется *сферической аберрацией* (от латин-

ского «заблудиться»). Эти далекие лучи падают между фокусом и самим зеркалом и отражаются со слишком большим углом. Другими словами, зеркало слишком сильно искривлено, чтобы все лучи попадали в фокус. Для того чтобы избежать этого, нужно зеркало, искривленное менее резко, чем участок сферы. Нужное искривление — *параболоидное*.

Если продолжить участок сферы, он сформирует сферу и замкнется. Параболоид же выглядит как сегмент сферы лишь на небольшом участке вокруг центральной точки. Если его продолжить и увеличить, он не замкнется. Он будет изгибаться все меньше и меньше, пока его стенки не станут почти прямыми, в результате чего получится длинный цилиндр, очень медленно расширяющийся. Зеркало, сделанное в виде части такого параболоида (имеется в виду участок вокруг центра), называется *параболическим зеркалом*.

Если пучок световых лучей, параллельный главной оси такого параболического зеркала, падает на его вогнутую поверхность, лучи действительно сходятся в фокусе, без всякой аберрации.

Чтобы произвести подобный пучок света, состоящий из параллельных лучей, мы должны, строго говоря, представить точечный источник света на главной оси на бесконечно далеком расстоянии от зеркала. Если этот источник находится на конечно далеком расстоянии, то лучи, движущиеся от такого источника к зеркалу, не являются четко параллельными, они немного расходятся. Каждый луч попадает на поверхность зеркала под углом к нормали, который немного меньше, чем мог бы быть, если бы лучи были действительно параллельны, и соответственно отражается под меньшим углом.

Следовательно, лучи сходятся не в фокусе, а дальше от зеркала. Если расстояние от точечного источника света велико по сравнению с фокусным расстоянием (которое для большинства параболических зеркал составляет несколько дюймов), то точка, в которой сходятся лучи, очень близка к фокусу — настолько близка, что разницу между ними можно игнорировать.

Если источник света приближается, то отраженные лучи сходятся все дальше и дальше от зеркала. Когда источник света находится в двух фокусных расстояниях от зеркала, то в конечном итоге отраженные лучи сходятся на самом же источнике; если он придвигается еще ближе, то отраженные лучи сходятся на точке позади него.

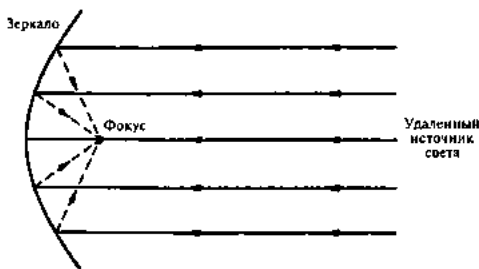
В итоге если источник света находится в самом фокусе, то отраженные лучи вообще перестают сходиться и становятся параллельными. (Можно сказать, что точка конвергенции — точка, где

встречаются лучи, — переместилась на бесконечно далекое расстояние от зеркала.) Автомобильные фары устроены именно так. Их внутренняя поверхность — параболическое зеркало, и маленькая лампочка находится в фокусе. Поэтому фары излучают вперед вполне прямой пучок света.

Пусть расстояние от источника света до зеркала равно D_0 , а расстояние от точки конвергенции до зеркала равно D_1 . Расстояние от фокуса до зеркала обозначим f . Тогда окажется верной следующая зависимость:

$$\frac{1}{D_0} + \frac{1}{D_1} = \frac{1}{f}. \quad (\text{Уравнение 2.2})$$

Мы можем проверить его для случаев, которые мы только что обсудили. Предположим, что источник света находится очень далеко, практически бесконечно отдален. В таком случае D_0 чрезвычайно велико, а $1/D_0$ чрезвычайно мало. Фактически можно считать, что $1/D_0$ равно нулю. В таком случае уравнение 2.2 выглядит как $1/D_1 = 1/f$ и $D_1 = f$, что означает, что отраженные лучи света встречаются в фокусе.



Параболическое зеркало

Если источник света находится на главной оси, но на расстоянии в два раза большем фокусного от зеркала, то $D_0 = 2f$, и уравнение 2.2 приходит к виду: $1/2f + 1/D_1 = 1/f$. Решив это уравнение, мы получаем, что $D_1 = f$. Другими словами, отраженные лучи в этом случае сходятся в той же точке, где находится и сам источник света.

А если источник света расположен в фокусе? В этом случае $D_0 = f$, и уравнение 2.2 выглядит как $1/f + 1/D_1 = 1/f$, из чего мы видим, что $1/D_1 = 0$. Но если $1/D_1 = 0$, значит, D_1 должно стремиться к бесконечности. Расстояние от зеркала до точки, где сходятся лучи, бесконечно, и, следовательно, лучи вообще не сходятся — они параллельны.

В предыдущем разделе я предположил, что источник света — точка. На самом деле, конечно, он не бывает точечным. Предположим, что источник света — пламя свечи, которое, естественно, имеет площадь.

Часть пламени находится чуть выше главной оси, часть — чуть ниже, часть — слева, часть — справа. Лучи света, исходящие из точки выше главной оси, отражаются чуть ниже истинной точки конвергенции (той, что была бы истинной точкой, если бы пламя свечи было точечным источником света); те же лучи, которые исходят из точки ниже главной оси, отражаются в точку выше точки конвергенции; те, что исходят из точки слева, отражаются вправо. Если мы рассмотрим каждый луч по отдельности, то чем больше расстояние от главной оси до точки, откуда он исходит, тем больше расстояние от точки конвергенции до точки, куда он приходит, но с другой стороны.

В результате в той области, где встречаются отраженные лучи, получается отражение, в котором перевернуты не только лево и право (как в плоском зеркале), но и верх и низ. Получается перевернутое отражение; если вы посмотрите на свое отражение в начищенной ложке, вы увидите себя вверх ногами.

Отражение, производимое таким вогнутым зеркалом, отличается от плоского отражения еще одним. Изображение, создаваемое плоским зеркалом, как было уже сказано, находится не позади зеркала, как кажется, поэтому это мнимое изображение. В случае же вогнутого зеркала изображение создается перед зеркалом посредством встречающихся лучей. Изображение действительно здесь, до него можно дотронуться; следовательно, это *реальное изображение*.

Разумеется, трогая это реальное изображение, вы ничего не почувствуете, потому что прикосновение ассоциируется у нас с прикосновением к материи. Параболическое зеркало не отражает материю; оно отражает свет, и его нельзя потрогать в обычном смысле этого слова. Однако вы можете почувствовать свет, когда он, поглощаясь кожей, превращается в тепло, и в этом смысле, чувствуя тепло, вы «трогаете» изображение.

Находясь в шести футах от свечи, палец получает немного тепла от той доли излучения, что падает прямо на него. Одна-

ко палец получает малую долю всего излучения и нагревается незначительно.

Вогнутое зеркало перехватывает больше излучения от свечи и сводит его в небольшом объеме пространства. Если палец сунуть в точку конвергенции, он почувствует больше тепла, чем где-либо поблизости.

Возможно, концентрация тепла возрастет слишком в малой степени, чтобы это можно было почувствовать, но если использовать вогнутое зеркало для концентрации лучей солнца, то это вы точно почувствуете. Построены большие параболические зеркала, которые захватывают солнечное излучение на большой площади и собирают его воедино. В фокусе солнечных печей достигались температуры до 7000 °C.

Зеркало плавающей кривизны может выдавать странные и смешные искажения изображения, как знает любой, кто побывал в парке аттракционов. Однако хорошее отражение с чистого зеркала неискаженной формы может выглядеть полностью правильным, особенно если края зеркала спрятаны так, чтобы со стороны нельзя было заподозрить его наличие.

Случайный зритель может перепутать изображение и реальность, и на этом основываются некоторые фокусы. Естественно, реальное изображение дразнит еще лучше, чем мнимое. В Бостонском научном музее реальное изображение проецируется таким образом, чтобы казалось, что монеты сыплются в перевернутый кубок вопреки закону тяготения. Зрители (как взрослые, так и дети) без усталости подставляют руки туда, где должны быть монеты. Вся их нематериальность не может убедить глаза, что монет здесь нет.

Предположим, что источник света приблизили к зеркалу еще ближе фокусного расстояния. В этом случае отраженные лучи не сходятся и не являются параллельными; они расходятся. Такие расходящиеся лучи, распространяясь с поверхности в пространство, можно рассматривать как сходящиеся, если проследовать по ним за зеркало. В самом деле, если мысленно продолжить лучи сквозь поверхность зеркала в пространство за ним, то они сойдутся в одной точке. И в этой точке вы увидите изображение. Поскольку оно формируется позади зеркала, там, куда свет на самом деле не проникает, то это мнимое изображение, как и на плоском зеркале, и, как в случае с плоским зеркалом, изображение ориентировано верхом вверх.

Уравнение 2.2 можно применить к этой ситуации. Если источник света ближе к зеркалу, чем фокус, то D_0 меньше, чем f , и $1/D_0$ должно соответственно быть больше, чем $1/f$. (Если это

для вас не очевидно, то вспомните, что 2 меньше, чем 4, в то время как $1/2$ больше, чем $1/4$.)

Решив уравнение 2.2 для $1/D_1$, мы получим:

$$\frac{1}{D_1} = \frac{1}{f} - \frac{1}{D_0}. \quad (\text{Уравнение 2.3})$$

Поскольку в рассматриваемом случае $1/D_0$ больше, чем $1/f$, $1/D_1$ должно иметь отрицательное значение. Отсюда видно, что само по себе D_1 должно быть отрицательной величиной.

Это понятно. В предыдущих обсуждаемых случаях все расстояния измерялись вперед от зеркала. В данном же случае точка, в которой сходятся отраженные лучи и где формируется изображение, находится за зеркалом и соответственно величина должна быть отрицательной.

Уравнение 2.2 применимо не только к вогнутым зеркалам; оно имеет более общее применение.

Представим себе вновь плоское зеркало. Пучок параллельных лучей падает на него вдоль главной оси (за главную ось на плоском зеркале можно принять любую линию нормали) и отражается обратно вдоль нее таким же параллельным. Лучи не встречаются, и соответственно расстояние от зеркала до фокуса бесконечно. Но если f бесконечно, то $1/f$ должно быть равным нулю, и для плоского зеркала уравнение 2.2 принимает вид:

$$\frac{1}{D_0} + \frac{1}{D_1} = 0. \quad (\text{Уравнение 2.4})$$

Если решить уравнение 2.4 для D_1 , то выходит, что $D_1 = -D_0$. Так как D_0 (расстояние до отражаемого объекта) всегда должно быть положительно, поскольку для того, чтобы вообще отражаться, предмет должен всегда находиться перед зеркалом, D_1 должно быть отрицательным. Соответственно в случае плоского зеркала изображение всегда должно находиться за зеркалом и быть мнимым. Итак, если D_1 и D_0 не равны, то изображение должно находиться далеко за зеркалом, в то время как отражаемый объект находится перед зеркалом.

А что, если у нас *выпуклое зеркало*? То есть кривое зеркало, посеребрянное с вогнутой стороны, так что мы, глядя в него, видим отражение с выпуклой стороны. Пучок параллельных лучей света падает на такое зеркало и отражается в стороны от главной оси (за исключением одного луча, который совпадает с ней). Опять же, если расходящиеся отраженные лучи продолжить (мысленно) сквозь зеркало, они сойдутся в фокусе.

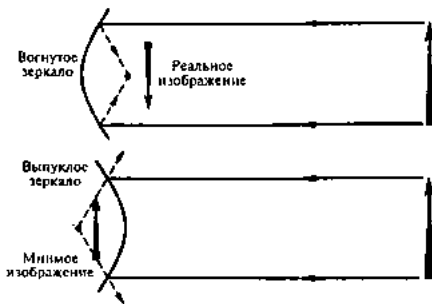
Фокус выпуклого зеркала, лежащий за зеркалом, является мнимым фокусом, расстояние от него до зеркала отрицательно. Поэтому, говоря о выпуклом зеркале, мы должны говорить о $-f$ и соответственно о $-1/f$. Для выпуклого зеркала уравнение 2.2 приобретает вид:

$$\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1} = -\frac{1}{f}. \quad (\text{Уравнение 2.5})$$

или

$$\frac{1}{D_0} = \frac{1}{D_1} - \frac{1}{f}. \quad (\text{Уравнение 2.6})$$

Поскольку отражаемый предмет должен быть всегда перед зеркалом, D_0 и соответственно $1/D_0$ должны быть положительными. Следовательно, $1/D_1 - 1/f$ должно быть положительным, а чтобы это было так, $1/D_1$ должно быть больше, чем $1/f$. Но это уводит нас еще на шаг дальше и говорит о том, что само по себе D_1 должно быть меньше, чем f . Другими словами, очевидно, что расстояние до мнимого изображения, отраженного выпуклым зеркалом, должно быть меньше фокусного, как бы далеко от зеркала ни находился отраженный объект. По этой причине все объекты, отраженные в выпуклом зеркале, кажутся сжатыми в крошечное пространство, и маленькое выпуклое зеркало в углу большой переполненной комнаты может дать панорамный обзор всей комнаты (хотя и в несколько искаженном виде).



Реальные и мнимые изображения

Размеры изображения (S_1) зависят от размеров отражаемого объекта (S_0), так же как зависит друг от друга и расстояния, вне зависимости от того, простираются ли они вперед или назад по отношению к зеркалу. Иными словами,

$$\frac{S_1}{S_0} \approx \frac{D_1}{D_0}. \quad (\text{Уравнение 2.7})$$

На плоском зеркале, где расстояние от изображения до зеркала равно расстоянию от зеркала до отражаемого объекта, размеры объекта и изображения равны. Плоское зеркало не уменьшает и не увеличивает объект. В выпуклом зеркале, где все изображения должны быть ближе к зеркалу, чем фокус, как бы далеко ни были отображаемые объекты, все изображения маленькие. Чем дальше находится отражаемый объект, тем ближе и соответственно меньше изображение.

В вогнутом же зеркале, когда отражаемый объект лежит между фокусом и центром изгиба, изображение находится за центром изгиба. В таком случае, поскольку изображение находится дальше от зеркала, чем отражаемый объект, изображение крупнее, чем объект. Чем ближе объект находится к фокусу, тем крупнее получается изображение. Разумеется, чем изображение крупнее, тем оно тусклее, поскольку одно и то же количество света распространяется на все большую площадь.

Преломление

Свету не обязательно быть отраженным, чтобы отклоняться от прямолинейного движения. Проходя из одной прозрачной среды в другую, скажем из воздуха в воду, свет, скорее всего, не отразится, а будет продолжать движение, тем не менее направление изменить может.

Несомненно, сначала это было замечено первобытным человеком, когда он обнаружил, что палка, которую положили одним концом в воду, кажется согнутой в том месте, где она входит в воду. Однако, если ее достать, она снова оказывается прямой.

Опять же, можно положить предмет на дно пустой чашки и посмотреть на чашку под таким углом, чтобы предмет был только-только скрыт краем чашки. Если теперь налить в чашку воду, то предмет на дне станет видимым, хотя ни он, ни наблюдающий глаз не переместились. Уже во времена древних греков было понятно — чтобы объяснить это, придется при-

знать, что свет изменил направление при переходе из одной прозрачной среды в другую.

Представьте себе плоский кусок чистого стекла, совершенно прозрачный, и представьте себе луч света, падающий на него по нормали, то есть падающий на стекло ровно под прямым углом к его плоской поверхности. Если вы приглядитесь, то обнаружите, что свет проходит сквозь стекло, не меняя направления.

Теперь представьте, что свет падает на стекло косо, под углом i к нормали. Можно предположить, что свет будет просто продолжать движение сквозь стекло, оставаясь под тем же углом i к нормали внутри стекла. Однако это не так. Луч света искривляется в точке, где воздух соприкасается со стеклом (на границе воздуха и стекла). Более того, он искривляется по направлению к нормали таким образом, что новый угол, который он образует к нормали внутри стекла (r), меньше, чем угол падения i .

Эта смена направления луча света при переходе от одной прозрачной среды к другой называется *преломлением*, или *рефракцией* (что по-латыни значит «перелом»). Угол r является, разумеется, *углом преломления*.

Если угол падения уменьшается или увеличивается, угол преломления тоже уменьшается или увеличивается. Но каким бы ни было значение i , значение r всегда будет меньше.

Физики древности считали, что угол преломления прямо пропорционален углу падения i , следовательно, удвоение i всегда будет приводить к удвоению r . Это почти так, пока мы говорим о небольших углах, но, если углы становятся больше, этот «закон» обнаруживает свою несостоятельность.

Предположим, например, что свет падает под углом 30° к нормали, попадая на границу стекла с воздухом, а угол преломления, с которым свет попадает в стекло, равен $19,5^\circ$. Если угол падения удваивается и становится равным 60° , то угол преломления становится равным $35,3^\circ$. Угол преломления возрастает, но не удваивается.

Истинное соотношение между i и r было обнаружено сначала в 1621 году голландским физиком Виллебордом Снеллом (1591—1626). Он не опубликовал свое открытие, и французский философ Рене Декарт (1596—1650) открыл его заново в 1637 году, опубликовав его в той форме, в которой мы сейчас его и знаем (эта форма гораздо более проста, чем форма, которую предлагал Снелл).

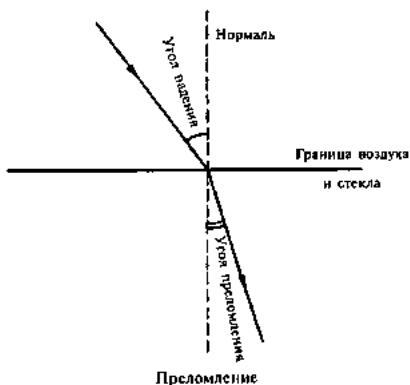
Закон преломления Снелла—Декарта утверждает, что, когда свет переходит из одной прозрачной среды в другую, отноше-

ние синуса угла падения к синусу угла преломления постоянна¹. Синус угла x обычно обозначается как $\sin x$, поэтому закон Снелла—Декарта может быть выражен так:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (\text{Уравнение 2.8})$$

Когда луч света наклонно падает из вакуума на прозрачный материал, этот материал имеет постоянную n — коэффициент преломления. Если свет попадает из вакуума на образец газа при 0 °С и давлении в 1 атмосферу (эти условия принято считать стандартной температурой и давлением), то преломление очень слабо.

Это значит, что угол преломления лишь немного меньше угла падения, и соответственно $\sin r$ лишь ненамного меньше, чем $\sin i$. Там, где это верно, мы можем видеть из уравнения 2.8, что значение n должно быть лишь немногим больше единицы.



¹ Синус угла лучше всего представить следующим образом: возьмем один из острых углов правильного треугольника. Синус угла в данном случае равен отношению длины противоположной стороны треугольника к длине гипотенузы. Существуют таблицы значений синусов для разных углов, их можно найти во многих учебниках. Так, можно легко найти, что синус 10°17' равен 0,17852, а синус 52°48' равен 0,79653.

Фактически для водорода при стандартных температуре и давлении коэффициент преломления равен 1,00013, а для воздуха — 1,00029. Поэтому есть небольшая разница в определении коэффициента преломления в случаях, когда свет попадает из света в другую прозрачную среду и из вакуума в нее же.

Что касается жидкостей и твердых тел, то здесь ситуация иная. У воды коэффициент преломления равен 1,33, а коэффициент преломления стекла может быть от 1,5 до 2,0 в зависимости от его химического состава. Особенно высок он у алмаза, где составляет 2,42. Луч света, попадающий из воздуха на алмаз под углом 60° , проходит в алмаз под углом преломления всего $21,1^\circ$.

Чем больше коэффициент преломления вещества, тем больше его оптическая плотность. Так, алмаз имеет большую оптическую плотность, чем стекло, которое, в свою очередь, имеет большую оптическую плотность, чем вода, которая имеет большую оптическую плотность, чем воздух. Когда луч света попадает из менее оптически плотного вещества в более оптически плотное, луч перегибается по направлению к нормали. Так происходит, когда луч попадает из воздуха в воду или из воды в алмаз, например. Луч света, попадающий из более плотного материала в менее плотный, преломляется по направлению от нормали. Одно воздействие отменяет другое. Так, если свет попадает из воздуха в стекло, падая под углом i , а двигаясь в стекле под углом r , то затем, попадая снова в воздух под углом r , он будет двигаться в воздухе дальше опять под углом i .

Допустим, к примеру, что луч света падает на стекло с углом падения 60° . Угол преломления $35,3^\circ$. Пройдя сквозь толщу стекла, луч света достигает поверхности стекла с другой стороны; как правило, обе поверхности стекла параллельны. Поэтому любая линия, являющаяся нормалью к одной поверхности, является нормалью и к другой. С этой поверхности луч попадает со стекла в воздух, преломляясь по направлению от нормали. Поскольку теперь он падает под углом $35,3^\circ$, то дальше он движется под углом 60° . Свет, вышедший из стекла, движется теперь в том же направлении, что до встречи со стеклом; эффект преломления, возникший с одной стороны, был отменен на другой, и небольшое изменение положения луча остается незамеченным. (Именно поэтому, глядя в окно из хорошего стекла под любым углом, мы не видим никаких искажений. Предметы, видимые через стекло, находятся именно там, где мы их видим.)

Изменим уравнение 2.8 для нахождения $\sin r$. Получим:

$$\sin r = \frac{\sin i}{n}. \quad (\text{Уравнение 2.9})$$

Если угол падения равен 0° , то синус i равен 0, а синус r равен $0/n$, то есть 0. Угол падения может возрасти до 90° , в таком случае луч света перпендикулярен нормали и просто скользит вдоль поверхности. Если угол падения принимает свое максимальное значение 90° , то $\sin i$ равен 1, а значение $\sin r = 1/n$. Другими словами, по мере того как i изменяется от 0° до 90° (это его крайние значения), $\sin r$ изменяется от 0 до $1/n$ (это его крайние значения). В случае с водой, где n равняется 1,33, $\sin r$ может изменяться от 0 до 0,75.

Если синус угла равен 0, то этот угол — 0° , а если этот синус равен 0,75, то (если верить таблице синусов) такой угол равен $48,6^\circ$. Следовательно, поскольку угол падения света, проходящего из воздуха в воду, может изменяться от 0° до 90° , угол преломления изменяется от 0° до $48,6^\circ$. Больше $48,6^\circ$ этот угол быть не может независимо от того, каков угол падения.

А если, наоборот, представить, что свет падает из воды на воздух? Отношение между углами сменилось на противоположное. Теперь свет преломляется по направлению от нормали. Поскольку свет (при попадании из воды в воздух) создает угол падения, изменяющийся от 0° до $48,6^\circ$, то угол отражения (получающийся при попадании света в воздух) изменяется от 0° до 90° . Однако ныряльщик с фонариком может направить луч света таким образом, что тот (под водой) создаст угол к нормали более $48,6^\circ$. Он должен выйти под углом более 90° , а это означает, что он вообще не выйдет, поскольку угол более 90° к нормали завернет луч обратно в воду. Другими словами, если луч, выходя из воды в воздух, приходит к водной поверхности под углом большим, чем критический ($48,6^\circ$), он будет полностью отражен. Это явление так и называется — *полное отражение*.

Из уравнения 2.9 мы видим, что чем больше коэффициент преломления вещества (n), тем меньше критический угол. Для обычного стекла критический угол составляет около 42° , а для алмаза — $24,5^\circ$. Свет может проходить сквозь прозрачные пластиковые трубы, обходя закругления и углы, если лучи с источника света, светящего с одного конца, всегда падают на границу пластика с воздухом с углом больше критического для этого пластика.

Коэффициент преломления самого воздуха, будучи очень маленьким, может творить замечательные вещи, когда речь заходит о больших его толщах. Если прямо наверху над нами находится большое тело, его свет проходит из космического вакуума в газ нашей атмосферы под углом падения 0° и преломления не происходит. Предмет же, находящийся не прямо над нами, излучает свет с углом преломления больше 0° , и этот свет несколько пре-

ломлен по направлению к нормали. Соответственно наш глаз, не делая поправки на искривление, видит такой предмет несколько выше в небе, чем он на самом деле находится.

Чем ниже в небе находится источник света, тем больше угол падения и тем больше его разница с углом преломления. Тем больше соответственно и разница между его видимым и реальным положением. Если предмет находится на горизонте, глаз видит его выше, чем он действительно есть, более чем на диаметр солнца. Следовательно, когда солнце на самом деле уже ушло за горизонт, атмосферное преломление позволяет нам видеть его на горизонте. Более того, нижний край солнца подвергается наиболее сильному преломлению и зрительно поднимается больше. В результате закатное солнце кажется овальным и сплюснутым снизу.

Искривление через преломление луча, попадающего в нашу атмосферу из космоса, происходит не резко. Плотность воздуха не одинакова, она возрастает по мере приближения к поверхности Земли. Коэффициент его преломления возрастает вместе с плотностью. Следовательно, по мере прохождения света из космоса к нашим глазам он все более и более искривляется, следуя по кривой линии (а не по прямой, как мы считали).

Коэффициент преломления воздуха колеблется и в зависимости от температуры, и, когда слой воздуха, находящийся у земли, нагревается и накрывается слоем более холодного воздуха, свет искривится таким образом, что далекие предметы станут видимыми. Температурные условия воздуха могут привести к тому, что предметы, находящиеся на земле, будут видны вверх ногами в воздухе. Так возникают миражи (чаще всего в пустынях, где разница температур между слоями воздуха бывает больше, чем где-либо), которые морочили своим жертвам головы на всем протяжении человеческой истории. В наше время такие случаи попадают в заголовки газет, когда, например, человек принимает свет фар далекого автомобиля, летящий к нему по долгому искривленному пути, за мчащуюся по небу «летающую тарелку».

Глава 3

ЛИНЗЫ

Передача фокуса

Когда две стороны стекла не параллельны, нормаль к одной стороне не будет параллельна нормали к другой. В таких условиях преломление на дальней стороне не будет соответство-

вать преломлению, получасмому на ближней, и луч света, проходящий сквозь стекло, не будет выходить из него в том же направлении, что и входил. В частности, так случается, когда свет проходит через стеклянный треугольник или призму¹.

Представьте себе, что вы наблюдаете, как луч света, переходя из воздуха в стекло, попадает на грань такой призмы, расположенной острым концом вверх. Если луч света подходит к нормали под углом снизу, он проходит в стекло выше нормали, но под меньшим углом к ней, потому что оптическая плотность стекла выше, чем воздуха. Когда луч света проходит призму насквозь и достигает противоположной грани, у него образуется угол с новой нормалью, выходящей из той же точки, и к этой нормали он подходит уже под углом сверху. К тому же, попадая в воздух, он должен отклониться дальше от этой новой нормали, потому что оптическая плотность воздуха меньше, чем стекла.

В результате воздух преломляется дважды в одном и том же направлении: первый раз — когда попадает из воздуха в стекло и второй раз — когда переходит из стекла в воздух.

Возвращаясь из стекла в воздух, он движется в направлении, отличном от того, в котором двигался до попадания в призму. Свет всегда проходит сквозь призму, отклоняясь от вершины в направлении к основанию.

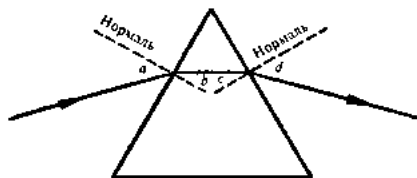
Предположим, что две призмы соединены у нас основанием к основанию и параллельный пучок света попадает в эту призму параллельно плоскости их оснований. Верхняя половина лучка, попадая в верхнюю призму, будет преломлена вниз, к основанию верхней призмы, нижняя, попадая в нижнюю призму, — вверх, к основанию нижней. Две половины пучка света, входя в призму параллельными, сойдутся и пересекутся с другой ее стороны.

Сечение двойной призмы имеет две прямые линии с одной стороны и две — с другой, соответственно целиком является параллелограммом (как знак, нарисованный в середине туза бубен). В такой двойной призме нормали ко всем точкам на верхней половине параллельны, потому что поверхность ровная. Следовательно, все лучи в световом пучке, который на нее падает, имеют одинаковые углы к нормали и преломляются под одним и тем же углом. То же самое верно и по отношению к нижней части

¹ Любое твердое тело с параллельными боковыми поверхностями и многоугольным сечением, будучи разрезанным под углом к этим поверхностям, является призмой. Если его сечение является треугольником (треугольная призма), то именно это тело обычно и называется призмой, как таковой, хотя это только один случай из бесконечного множества.

двойной призмы, только в этом случае лучи преломляются вверх, а не вниз. Две половины пучка выходят с другой стороны двоянной призмы в виде снопов параллельных лучей света и пересекаются друг с другом по широкому фронту.

А что, если отшлифовать поверхности двоянной призмы до двух участков сферы? Получившаяся в результате фигура останется такой же тонкой в верхней и нижней частях и широкой в середине, но теперь нормали к поверхности в каждой точке будут иметь свое направление.



Угол a больше угла b
Угол d больше угла c

Призма

Если тело находится в вертикальном положении, то нормали в центре будут горизонтальной, направляясь все выше по мере приближения точки, из которой исходит, к верхнему краю и все ниже по мере продвижения к нижнему краю.

Теперь предположим, что параллельный пучок лучей света падает на это тело таким образом, что луч, попадающий в самую широкую часть, проходит призму строго вдоль нормали. Он не преломляется и выходит с другой стороны в том же направлении. Лучи света, попадающие на поверхность чуть выше, образуют небольшой угол к направленной вверх нормали и немного преломляются вниз. Лучи света, попадающие на поверхность еще выше, образуют еще больший угол с нормалью (ведь она еще сильнее направлена вверх) и преломляются еще резче вниз и т. д. Падающие ниже центра лучи света преломляются вверх тем резче, чем ниже они падают. В результате все лучи собираются с другой стороны линзы, встречаясь в фокусе.

Отшлифованная двойная призма только что описанного типа имеет форму чечевицы и поэтому называется *линзой* (от латинского названия этого растения). В более широком смысле линзой называется любой кусок стекла или другого прозрачного

материала, у которого хотя бы одна сторона отшлифована подобным образом.

У определенного вида линз, напоминающих сложенную двоянную призму, обе поверхности выпуклые. Такая линза называется *двояковогнутой*. Именно она напоминает чечевицу: она нам лучше всего знакома, и именно ее представит себе обычный человек, если его спросят о линзе.

Не обязательно, чтобы обе стороны линзы были изогнуты одинаково. Одна сторона может быть менее выпуклой, чем другая, или даже может вообще быть плоской. В этом случае линза именуется *плоско-выпуклой*. Одна из поверхностей может быть вогнутой (*вогнуто-выпуклая* линза), так что сечение такой линзы будет похоже на полумесяц. Такая линза может еще называться *мениском* (от латинского слова, означающего «маленькая луна»). Каким бы ни было отношение форм поверхностей линзы, лучам света придется сойтись, пройдя сквозь нее, если линза имеет наибольшую толщину в середине и наименьшую по краям. Все линзы такого типа могут быть объединены в один класс *выпуклых*, или *собирательных*, линз.

Свойства выпуклой линзы в точности соответствуют свойствам выпуклого зеркала (см. гл. 2). Свет, отраженный от выпуклого зеркала, рассеивается, но если мы мысленно продолжим линии расходящихся лучей за зеркало, то они придут к фокусу с другой его стороны; там формируется мнимое (не перевернутое) изображение. В случае с выпуклой линзой свет на самом деле проходит сквозь нее и сходится в фокусе, где появляется реальное (перевернутое) изображение. Поскольку изображение реальное, то свет концентрируется, и хорошо известно, что у линзы есть свойство собирать лучи солнца и зажигать огонь.

Чем толще середина собирательной линзы по сравнению с ее диаметром, тем резче сходятся лучи света и тем ближе находится фокус линзы к ней самой, то есть тем меньше *фокусное расстояние* (расстояние от фокуса до центра линзы). Линзы с коротким фокусным расстоянием, резче изменяющие направление световых лучей, естественно, считаются более мощными.

Сила линзы измеряется в *диоптриях* (от греческого слова, означающего «видеть насквозь»), которые получают путем обращения фокусного расстояния в метрах. Если фокусное расстояние — 1 м, то сила линзы — 1 диоптрия. Фокусное расстояние в 50 см, или 0,5 м, подразумевает силу в $1/0,5 = 2$ диоптрии. Чем больше значение в диоптриях, тем сильнее линза.

Линза может быть вогнутой с обеих сторон (*двояковогнутая линза*) таким образом, что она имеет наибольшую толщину по

краям, а наименьшую — в центре. Она может быть с одной стороны плоской (*плоско-вогнутой*) или даже выпуклой (*вогнуто-выпуклая*). В любом случае, если толщина линзы по краям превышает толщину в центре, то она считается вогнутой. Поскольку параллельный снап лучей света, проходя через любую вогнутую линзу, рассеивается с другой стороны, такие линзы называют еще *рассеивающими*.

И опять же, свойства вогнутой линзы соответствуют свойствам вогнутого зеркала. Лучи света, отражаясь от вогнутого зеркала, собираются в фокусе. Если мы мысленно продолжим собирающиеся лучи сквозь зеркало, то они пересекутся с другой стороны. Сквозь рассеивающую линзу свет на самом деле проходит и рассеивается.

Проходя сквозь вогнутую линзу, свет рассеивается и не создает никакого изображения. Однако мысленно рассеивающиеся лучи света можно отразить назад, и тогда они сформируют мнимое изображение там, где вогнутое зеркало создало бы изображение действительное.

Сила рассеивающей линзы измеряется так же, как и сила собирающей линзы. Однако в случае рассеивающей линзы речь может идти только о мнимом фокусе, и соответственно фокусное расстояние имеет отрицательное значение. Рассеивающая линза может иметь силу значением, скажем, -2 диоптрий.

Очки

В глазу человека, сразу за зрачком, находится тело, имеющее форму линзы и именуемое *хрусталиком* (не потому, что оно состоит из хрусталя, а потому, что слово «хрусталь» является искаженным «кристалл», что, как мы помним, означает «прозрачный»). Это двояковыпуклая, а следовательно, собирающая линза, около трети дюйма в диаметре. Наиболее выступающая часть глаза, прозрачная *роговица*, тоже является собирающей линзой, чья собирающая сила в два раза больше, чем у хрусталика.

Линзы роговицы и хрусталика собирают световые лучи в фокус на светочувствительном внутреннем покрытии задней стенки глаза (*сетчатке*). На сетчатке создается перевернутое изображение. К каждой светочувствительной клетке сетчатки (где формируется видимое нами изображение) подходит свое отдельное нервное окончание, поэтому получившаяся картинка без потерь передается в мозг. Мозг делает поправку, переворачивая изображение обратно, и в результате мы видим все таким, какое оно есть в реальности.

Однако нельзя полагаться на то, что изображение, создаваемое собирающей линзой, всегда будет приходить в фокус (который, строго говоря, является точкой, где сводятся лучи из параллельного пучка). Когда источник света удален, то лучи действительно параллельны или почти параллельны, и тогда все нормально. Чем ближе источник света подносят к линзе, тем больше становится угловое расстояние между расходящимися от него лучами, и тогда они собираются дальше от линзы, чем находится фокус, т. е. на расстоянии, превышающем фокусное.

Отношение между расстояниями до объекта, рассматриваемого как источник света (D_0), до изображения (D_1) и до фокуса (f) выражается уравнением 2.2 (см. гл. 2). В предыдущей главе это уравнение было использовано в связи с зеркалами, но для линз оно тоже справедливо. Фактически его так часто используют для линз (а не для зеркал), что его называют *формулой линзы*. (И у линз, и у зеркал мнимый фокус выражается в отрицательном значении f и соответственно $1/f$, а мнимое изображение — в отрицательном значении D_1 и соответственно $1/D_1$. А вот D_0 и соответственно $1/D_0$ всегда положительны.)

Давайте приведем формулу в следующий вид:

$$\frac{1}{D_1} = \frac{1}{f} - \frac{1}{D_0}. \quad (\text{Уравнение 3.1})$$

Если объект находится на бесконечном расстоянии, то $1/D_0 = 0$ и $1/D_1 = 1/f$, значит, $D_1 = f$. Следовательно, изображение формируется в фокусе. Но предположим, что суммарное фокусное расстояние роговицы и хрусталика — около 1,65 сантиметра (примерно таким оно и является), а объект, на который мы смотрим, находится от нас в 50 м (или 5000 см). В таком случае $1/D_1 = 1/1,65 - 1/5000$ и $D_1 = 1,6502$. Изображение формируется на 0,0002 см позади фокуса; это расхождение достаточно мало, чтобы не обращать на него внимания. Поэтому для глаза расстояние в 50 м можно считать бесконечным.

Но что, если предмет находится в 30 см — на расстоянии чтения? Тогда $1/D_1 = 1/1,65 - 1/30$ и $D_1 = 1,68$. Изображение формируется на 0,03 см позади фокуса, и для глаза это уже серьезное расхождение. Свет будет достигать сетчатки (находящейся на фокусном расстоянии) раньше, чем сфокусируются лучи света. Соответственно изображение будет размытым, а зрение — нечетким.

Чтобы этого не произошло, хрусталик меняет свою форму с помощью небольшой мышцы. Он может становиться толще и таким образом сильнее собирать свет. Фокусное расстояние

укорачивается. Изображение, также формируясь позади сетчатки, более короткого фокусного расстояния, попадает на сетчатку. Этот процесс называется *приспособлением* или *аккомодацией*.

По мере того как предмет приближается к глазу, хрусталику приходится все сильнее и сильнее выпячиваться, чтобы правильно преломлять свет. В конце концов он уже не может больше расширяться, и расстояние, на котором аккомодация подходит к пределу, называется *крайней точкой*. Предметы, находящиеся к глазу ближе крайней точки, кажутся размытыми, потому что их изображение не может нормально сформироваться на сетчатке.

Способность к аккомодации уменьшается с возрастом, и тогда крайняя точка отдалится. Ребенок с нормальным зрением может четко видеть предметы на расстоянии 10 см; молодой человек — на расстоянии 25 см, а старик может не разбирать ничего, что находится ближе 40 см. Другими словами, чем старше становится человек, тем дальше от глаз ему приходится держать телефонную книгу. Это отдаление крайней точки с возрастом называется *пресбиопией* (от греческого слова, означающего «зрение старика») или *старческой дальнозоркостью*.

Может случиться так, что глазное яблоко у человека окажется глубже суммарного фокусного расстояния роговицы и хрусталика. В этом случае фокус, в котором формируются изображения далеких предметов, находится не на сетчатке (которая расположена слишком глубоко), а перед ней. К тому моменту, когда свет достигает сетчатки, его лучи уже несколько расходятся, и зрение замутняется. По мере приближения предметов изображение формируется на расстояниях, превышающих фокусное, и вот они уже попадают на сетчатку. Люди с таким зрением ясно видят близкие предметы, но плохо — удаленные; их называют *близорукими*. Официально это заболевание именуется *миопией*, по причинам, изложенным ниже (п. «Камеры»).

Если глазное яблоко слишком неглубокое, то происходит обратное. Фокусное расстояние получается больше длины глазного яблока, и световые лучи, исходящие от удаленных объектов, попадают на сетчатку, сойдясь не до конца. Хрусталик приспособляется и сильнее преломляет лучи, так чтобы в результате удаленные объекты все-таки были четко видны. Однако по мере приближения объектов способность хрусталика к приспособлению довольно быстро доходит до предела, и близкие предметы различаются смутно. Для такого человека крайняя точка находится ненормально далеко, и, будучи способным четко и ясно видеть удаленные предметы, он не может так же четко различать предметы, находящиеся близко. Такой человек называется *дальнозорким*, а заболевание — *гиперопией* (дальнозоркостью).

Если поместить одну линзу сразу же перед другой, легко можно получить новый общий фокус. Для того чтобы найти общую силу преломления двух линз, достаточно сложить диоптрии обеих, и соответственно так же изменяется и их общее фокусное расстояние.

Представьте себе линзу с силой преломления 50 диоптрий. Ее фокусное расстояние — $\frac{1}{50}$ м, или 2 см. Если перед ней поместить еще одну собирающую линзу в 10 диоптрий, общая сила преломления этой комбинации линз будет равна 60 диоптриям, и новое фокусное расстояние будет $\frac{1}{60}$ м, или $1\frac{1}{3}$ см. С другой стороны, если поместить перед первой линзой линзу не собирающую, а рассеивающую с силой преломления — 10 диоптрий, то фокусное расстояние увеличится, поскольку общая сила линз теперь будет равна 40 диоптриям и будет составлять для обеих линз вместе $\frac{1}{40}$ м, или $2\frac{1}{2}$ см.

Нечто подобное может быть проделано и с глазом, и осуществлено это уже в XIII веке английским ученым Роджером Бэконом (ок. 1214—1292). В результате появились знакомые нам очки, великое изобретение Средних веков, в котором линзы получили практическое применение.

Суммарная сила роговицы и хрусталика — около 60 диоптрий, а в очках используются линзы от -5 до +5 диоптрий. Для дальновзорких людей со слишком неглубокими глазными яблоками диоптрии следует увеличивать, чтобы фокусное расстояние уменьшалось. Чтобы увеличивать диоптрии, перед глазом следует поместить линзу с положительным значением силы в диоптриях (т. е. собирающую). Для близоруких людей следует делать наоборот. Их глазное яблоко слишком глубоко, и поэтому фокусное расстояние глаза следует увеличить, уменьшая количество диоптрий. Для этого перед глазом следует поместить линзу с отрицательным количеством диоптрий (т. е. рассеивающую).

И для дальновзорких, и для близоруких людей линзы в очках делают в форме мениска. Только в то время как у первых этот мениск в середине имеет наибольшую толщину, у последних — наименьшую.

По мере старения наступление старческой дальновзоркости может потребовать применения уже двух независимых коррекций — отдельно для близорукости, отдельно для дальновзоркости. Одним из решений этой проблемы было наличие двух очков, которые можно было бы менять по мере необходимости. Американский ученый Бенджамин Франклин (1706—1790) в старости устал постоянно менять очки и додумался до того, что две линзы с разными значениями диоптрий и, следовательно,

с разными фокусными расстояниями могут быть объединены в одну оправу, так что верхняя часть ее будет занята линзой, корректирующей дальнозоркость, а нижняя — линзой, корректирующей близорукость. Такие *бифокальные* (а иногда и *трифокальные*) очки сейчас производят повсеместно.

Чтобы линза хорошо фокусировала, ее изгиб должен быть одинаковым во всех направлениях. Тогда лучи, попадающие на верх, низ и стороны линзы, одинаково преломляются по направлению к центру и встречаются в истинном фокусе.

Предположим, что изгиб линзы слева направо менее резок, чем сверху вниз. Тогда лучи света слева и справа не встретятся в фокусе в том месте, где встретятся лучи сверху и снизу. В этом месте вместо световой точки будет горизонтальная полоса света. Если отодвинуться назад, до того уровня, на котором встретятся «отстающие» лучи справа и слева, то на этом уровне лучи сверху и снизу уже пройдут свой фокус и будут снова расходиться. Тогда мы получим вертикальную полосу света. Световой точки не будет нигде. С глазами яблочками такое случается часто, и называется это состояние *астигматизмом*¹ (от греческого слова, означющего «отсутствие точки»). Это тоже исправляется очками, линзы которых имеют неровный изгиб поверхности, уравновешивающий неровности глаза, преломляя свет сильнее с тех сторон, с которых глаз преломляет его слабее.

Но чаще всего линзы имеют форму частей сферы, поскольку сферическую форму легче всего воспроизвести. Такая форма, даже совершенным образом отшлифованная во всех направлениях, все же не может собирать все лучи света в одну точку, так же как сферическое зеркало не может отражать все лучи в одну точку. Здесь, как и в случае с зеркалами, имеет место сферическая аберрация (см. гл. 2).

Величина этой аберрации возрастает по мере относительного утолщения линзы и увеличения расстояния от ее центра. По этой причине формула линзы (уравнение 3.1) хорошо применяется только для тонких линз. Около центра линзы сферическая аберрация очень мала, и ее можно игнорировать. Глаз человека имеет радужную оболочку, которая может изменять размер зрачка. На ярком свете размер зрачка сокращается до диаметра 1,5 мм. Входящего в него света все еще достаточно для всех целей, и сферическая аберрация сводится почти что к нулю. Поэтому на ярком

¹ В применении к линзам термин «астигматизм» — не то же самое, что в применении к глазу. В линзах он получается тогда, когда источник света находится не на главной оси линзы. В таком случае свет падает на линзу под углом и фокусируется не в точку, а в линию света.

свете человек видит ясно. На тусклом свете конечно же нужно, чтобы в глаз попадало как можно больше света, поэтому зрачок расширяется до диаметра 8—9 мм. При этом используется большая часть поверхности линзы, и сферическая aberrация усиливается. Поэтому на тусклом свете изображение размывается.

Существуют и другие типы aberrации (включая «хроматическую aberrацию», см. ниже), но общепринятый способ исправления всех aberrаций посредством оптических инструментов один, и заключается он в комбинировании двух линз (или линзы и зеркала) таким образом, чтобы aberrация одной линзы исправляла aberrацию другой. Используя подобное устройство, в 1930 году русско-немецкий оптик Бернард Шмидт (1879—1935) изобрел прибор, который без искажений может фотографировать сквозь толщу неба, потому что aberrации с каждого участка зеркала исправляются линзой неправильной формы, имеющей название «пластина коррекции». (Такой прибор называется камерой Шмидта или телескопом Шмидта.)

Камеры

Изображения можно создавать как внутри глаза, так и вне его. Представим себе точку в пространстве и предмет на некотором расстоянии, от которого исходит или отражается свет. От каждой части предмета можно провести линию к точке и сквозь нее. Луч, появляющийся справа, по прохождении точки пойдет влево от нее, и наоборот. Луч, появляющийся сверху, по прохождении точки пойдет вниз, и наоборот.

Предположим, что лучи света, пройдя точку, попадают на темную поверхность. Лучи света от ярко выпущенной (или отраженной) порции света проявятся яркими пятнами; лучи света, исходящие от тускло освещенной части, проявятся тусклыми. В результате мы будем иметь реальное перевернутое изображение источника света.

Фактически в обычных условиях мы не можем рассматривать единую точку в пространстве, поскольку имеется большое количество соседствующих точек, через которые можно провести лучи от каждой части источника света. Соответственно имеется и множество перевернутых изображений, которые появляются на поверхности, перекрывая друг друга, и картинка размывается до состояния светового пятна; в общем изображение не формируется.

Но предположим, что есть закрытая коробка с отверстием в боку, обращенным к источнику света, и предположим, что раз-

мер этого отверстия становится все меньше и меньше. В конце концов на поверхности коробки, противоположной отверстию, появляется изображение с размытыми краями, а если отверстие становится совсем маленьким, то изображение становится резким. Изображение будет оставаться резким независимо от расстояния между отверстием и поверхностью, на которое падает луч, ведь вопрос фокусировки отпадает, поскольку изображение формируется из прямых, непреломленных лучей. Чем дальше поверхность от отверстия, тем больше становится изображение, поскольку лучи продолжают расходиться от отверстия под постоянным углом. Однако из-за того, что одно и то же количество света расходится на все большее и большее пространство, изображение становится все тусклее в той же степени, в какой становится больше.

В большом объеме это можно сделать в темной комнате, окна которой плотно зашторены, за исключением одного маленького отверстия. На противоположной стене появится изображение того, что находится снаружи, — пейзажа, человека, здания, конечно вверх ногами.

Свет, попадающий в такое отверстие, сформирует круг, являющийся на самом деле изображением солнца, а не отверстия. Если отверстие будет иметь форму треугольника, но не будет достаточно маленьким, то на стене образуется треугольное пятно света, но этот треугольник будет состоять из кругов, каждый из которых будет отдельным изображением солнца. По мере того как отверстие будет уменьшаться, будет уменьшаться и треугольник, пока не станет меньше, чем отдельное изображение солнца. Тогда изображение станет круглым, несмотря на треугольность отверстия.

Листья дерева создают множество шевелящихся отверстий, сквозь которые проникает солнечный свет. Пятна света на земле предстают как маленькие накладывающиеся друг на друга круги, вместо того чтобы повторять действительную неправильную форму отверстий в листе. Во время солнечного затмения солнце имеет форму не круга, а полумесяца, и, когда это происходит, перекрывающиеся друг друга круги под деревом становятся перекрывающимися друг друга полумесяцами. Просто потрясающий эффект.

За создание изображений в темных комнатах принялись давно, и такие итальянские ученые, как Жан-Батиста делла Порта (ок. 1538—1615) и Леонардо да Винчи (1452—1519), пользовались этим. Устройство было названо *камера-обскура*, что в переводе с латыни означает «темная комната». Впоследствии для создания изображений в затемненных пространствах стали ис-

пользовать и другие устройства, и к ним тоже стала применяться первая часть этого словосочетания — «камера». Изначальную камеру-обскуру сейчас принято называть *точечной камерой*.

Главная трудность в работе с точечной камерой состоит в том, что для увеличения резкости изображения требуется поддерживать минимальный размер отверстия. Это значит, что сквозь отверстие будет проходить очень мало света и изображение получится тусклым. Чтобы можно было расширить отверстие и впустить больше света и при этом избежать накладок, которые разрушили бы изображение, необходимо вставить в отверстие собирающую линзу. Это сконцентрирует свет с большой площади в фокус, во много раз повышая яркость изображения без потери резкости. В 1599 году делла Порта описал такое устройство, изобретя тем самым собственно камеру, какой мы ее знаем.

Если снабдить камеру линзами, изображение будет резким уже не на любом расстоянии, а только на той точке, где сходятся световые лучи. Камеры фиксированных размеров могут создавать резкие изображения только достаточно далеких предметов, в случае если задняя стенка камеры находится на фокусном расстоянии. Что касается достаточно близких предметов, то лучи света от них собираются на точке за фокусным расстоянием, и в этом случае линзу следует выдвинуть вперед посредством «гармошки» (как в старых камерах) или сдвига по резьбе (как в современных). Это увеличивает расстояние между линзой и задней стенкой камеры и является механическим аналогом способности глаза приспособляться.

Пытаясь разглядеть предметы, находящиеся на среднем расстоянии, близорукие люди быстро обнаруживают, что, прищурившись, они могут видеть более четко. Это так, потому что глаз в таком случае приближается по своему устройству к точечной камере, и четкость изображения меньше зависит от глубины глазного яблока. (Поэтому для обозначения близорукости и используется слово «миопия», происходящее от греческого «закрытое зрение», описывающего постоянно прищуренные глаза.) Конечно, в глаз попадает меньше света, и резкость изображения достигается за счет яркости. Более того, мышцы век устают от постоянного поддержания глаз в почти, но не до конца закрытом состоянии; результатом является головная боль. (Фактически дискомфорт вызывается напряжением глазных мышц, а не напряжением глаз.)

Камера с линзами была создана в то время, когда были изобретены способы записывать изображения. Для этого изображение должно быть сформировано на поверхности, на которую

нанесены химические вещества, реагирующие на свет¹. В эту работу внесли свой вклад: французский физик Жозеф Нисефор Ньепс (1765—1833), французский художник Луи Жак Манде Дагер (1789—1851) и английский изобретатель Уильям Генри Фокс Толбот (1800—1877). К середине XIX века камера была уже вполне практичным устройством для создания и хранения изображений и *фотография* («светопись») стала незаменимой во всех областях научной работы.

Для получения ярких изображений нужно собрать как можно больше света. Для этого требуется линза большого диаметра с коротким фокусом. Чем больше диаметр, тем больше света собирается в изображение. Необходимость в коротком фокусе обоснована тем, что, как уже описывалось в гл. 2, применительно к зеркалам, чем ближе изображение к линзе, тем оно меньше. А чем меньше изображение, создаваемое из фиксированного количества света, тем оно ярче. Чтобы измерить яркость изображения, которое может создать линза, мы должны учесть оба фактора и узнать отношение фокусного расстояния (f) к диаметру (D). Это отношение, f/D , называется *фокусным числом*. При уменьшении f и/или увеличении D фокусное число уменьшается. Чем меньше фокусное число, тем ярче изображение.

Изображение, изначально создаваемое на пленке с химическим покрытием, становится темным в интенсивно освещенных точках (поскольку действие света заключается в выделении черных частиц металлического серебра) и светлым — в слабо освещенных точках. Таким образом, изображение получается *негативным* — светлым при изображении темного и темным при изображении светлого. Если свет проходит сквозь него и попадает на бумагу, покрытую светочувствительными химикатами, получается негатив негатива. Тогда вновь достигается оригинальное соотношение светлого и темного. Это *позитив*, и это окончательная картинка.

Позитив может быть напечатан на прозрачной пленке. В таком случае маленький, но сильный источник света может быть сфокусирован на ней посредством линзы и зеркала, а изображение — спроецировано на экран. Выходя из проектора, лучи расходятся в стороны, и изображение на экране может быть очень сильно увеличено по сравнению с изначальным позитивом. Такие устройства могут быть использованы в некоторых случаях для демонстрации фотографий, но гораздо более обширное применение они получили как средства массового развлечения.

¹ Изложение деталей этого процесса более уместно в учебнике по химии и здесь рассматриваться не будет.

Следующая возможность проистекает из того факта, что, когда клетки роговицы реагируют на определенный образец света и темноты, им требуется доля секунды, чтобы восстановиться и приготовиться к принятию следующего образца. Если в темной комнате помахать длинной лучиной с красным угольком на конце, то вы увидите не отдельную движущуюся точку света, а непрерывную кривую, которой можно выписывать круги и овалы.

А представьте теперь, что движущиеся объекты быстро фотографируют несколько раз подряд. На каждой фотографии положение объекта окажется слегка измененным по сравнению с предыдущей. В 1889 году американский изобретатель Томас Алва Эдисон (1847—1931) поместил такие фотографии на непрерывную ленту с перфорацией по краю. За эту перфорацию пленку можно было протягивать линейно с постоянной скоростью с помощью равномерно вращающейся звездочки. Если настроить свет проектора таким образом, чтобы он быстро мигал, то каждая вспышка будет последовательно выдавать на экран изображение, соответствующее одному кадру. Тогда глаз видит одну картинку за другой, причем последующая лишь немного отличается от предыдущей. Поскольку глаз еще будет восстанавливаться после предыдущей картинки, он будет еще видеть ее в тот момент, когда на экране уже появится следующая. Таким образом достигается иллюзия непрерывного движения. Так были представлены «живые картинки».

Увеличение

Любой, кто имел дело с собирающими линзами, прекрасно знает, что предмет, на который глядишь сквозь них, кажется больше. Похоже, что это знали уже в древности, потому что такой же эффект достигается и просто с помощью стеклянного сосуда округлой формы, в который налили воду.

Чтобы понять это, нужно сначала уяснить, что мы не воспринимаем истинные размеры предмета напрямую, а лишь судим о них по набору косвенных признаков, среди которых — угол, под которым падает свет от края предмета.

Например, допустим, что в 25 см от глаз горизонтально держат палочку длиной 4 см. Угол между лучами света, попадающими в глаз с одного и с другого концов палочки, составляет $9,14^\circ$. Другими словами, если мы посмотрим прямо на один конец палочки, а затем повернем голову, чтобы посмотреть прямо на другой, нам придется повернуть ее на $9,14^\circ$. Это *угол зрения*, или *угловой диаметр* предмета.

Если бы палочка была только два сантиметра длиной, то угол зрения составил бы $4,58^\circ$, а для восьмисантиметровой палочки — $18,8^\circ$. Угол зрения не совсем пропорционален размеру, но при небольших значениях — почти. На собственном опыте мы познаем эти пропорции и автоматически оцениваем относительный размер предметов по углу зрения.

Однако угловой размер предмета также зависит и от расстояния. Допустим, что восьмисантиметровая палочка, находясь на расстоянии 25 см, занимает угол зрения в $18,18^\circ$. На расстоянии 50 см угол зрения будет уже $9,14^\circ$, а на расстоянии 100 см — $4,58^\circ$. Другими словами, мы также хорошо знаем по собственному опыту, что чем дальше предмет отстоит от глаза, тем меньше он кажется. Большой предмет, отстоящий далеко от глаза, будет выглядеть меньше, чем маленький, находящийся близко к глазу. Так, восьмисантиметровая палочка, отстоящая от глаза на 100 см, будет занимать угол зрения меньше, чем четырехсантиметровая, находящаяся на расстоянии 25 см, и соответственно будет выглядеть меньше.

Не похоже, чтобы это могло ввести нас в заблуждение. С малых лет мы приучаемся принимать в расчет при оценке истинных размеров предмета не только угол зрения, но и расстояние. Для того чтобы, взглянув сперва на отдаленную восьмисантиметровую палочку, посмотреть потом на приближенную четырехсантиметровую, наш глаз должен изменить хрусталик, а также оба наших глаза должны изменить направление взгляда, чтобы оба они сфокусировались на одном и том же предмете (чем ближе предмет, тем сильнее глазам надо скоситься к переносице). Нам не обязательно надо осознавать, что наши хрусталики изменяются или что взгляд сходится к переносице; мы просто правильно оцениваем эти ощущения и можем сделать из них вывод, что четырехсантиметровая палочка находится ближе. Приняв это во внимание наряду с углом зрения, мы обычно без проблем можем сделать вывод, что палочка, кажущаяся меньше, на самом деле больше. Мы даже можем убедить себя, что она и *выглядит* больше.

Изменения в приспособлении хрусталика и сведение глаз используются, когда речь идет о сравнительно близких предметах. Глядя же на удаленные предметы, мы оцениваем расстояние в сравнении с соседними предметами, размер которых мы знаем. Так, далекая секвойя может не показаться нам особенно большой, пока мы не увидим у ее подножия крохотного человека. Тогда мы понимаем, насколько далеко она находится, и ее полный размер становится очевидным. Она начинает казаться большой.

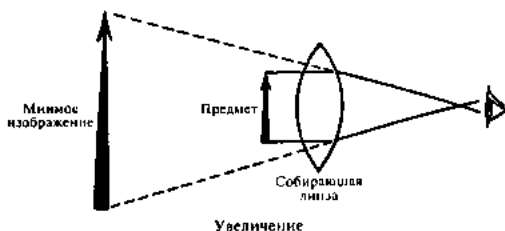
Если рядом с далеким предметом нет предметов известного размера, с которыми его можно было бы сравнить, нам остается только угол зрения, который сам по себе мало что дает. К примеру, Луна в небе занимает, грубо округляя, $0,5^\circ$. Если мы попытаемся исходить из этого и считать подлинный диаметр Луны, мы окажемся в замешательстве. Можно сделать вывод, что Луна «где-то шириной в фут». Однако предмет шириной в фут занимает угол в $0,5^\circ$, только если он находится не далее чем в шестидесяти футах. А это уж слишком не соответствует реальному расстоянию до Луны, хотя бессознательно многие считают его именно таковым.

Когда луна висит над горизонтом, то видно, что она находится за домами и деревьями, и мы понимаем, что она явно дальше чем в шестидесяти футах от нас. До нее, должно быть, целая миля. Чтобы занимать угол в $0,5^\circ$, находясь на расстоянии в милю, Луна должна быть 88 футов в диаметре. Это (неосознаваемое) изменение нашей оценки удаленности Луны меняет и наше (неосознаваемое же) представление о ее размерах. Как мы все замечали, Луна над горизонтом кажется больше, чем когда она высоко в небе¹. Эта оптическая иллюзия ставила людей в тупик еще со времен древних греков, но в настоящее время принято считать, что причиной ее является ошибка в бессознательной оценке размера Луны.

Собирающая линза — это возможность изменить угол зрения, не изменяя расстояния до предмета. Представьте себе, что лучи света идут от предмета к глазу и создают определенный угол зрения. Глаз не может почувствовать, что по пути лучи были преломлены; он воспринимает их как прямые линии, идущие от объекта большего, чем тот есть на самом деле. Только воспринимая объект как увеличенный, глаз может обработать больший угол зрения. Или, иначе, глаз видит не предмет, а увеличенное мнимое изображение (сохранившее правильную ориентацию) предмета, создаваемое собирающей линзой. Коэффициент, с которым увеличивается размер предмета, и есть *увеличение линзы*.

Если вернуться к формуле линзы (уравнение 2.2 или 3.1), то увеличение может быть выражено через фокусное расстояние линзы (f). Поскольку изображение мнимое, то расстояние до него (D_i) имеет отрицательное значение, в то время как рас-

¹ Измерения видимого диаметра Луны приборами показывают, что на самом деле на горизонте он чуть меньше, чем в зените, поскольку на горизонте к расстоянию до Луны добавляется еще и радиус Земли. Поэтому на горизонте Луна находится на 2 процента дальше и соответственно занимаемый ею угол на 2 процента меньше.



стояние до самого объекта (D_0) остается, как всегда, положительным. Тогда уравнение может быть приведено к виду:

$$\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1} = \frac{1}{f}. \quad (\text{Уравнение 3.2})$$

Как я уже сказал, увеличение можно описать как отношение размера изображения к размеру предмета, но об этом отношении можно судить двояко. Можно определить его как отношение углов зрения, занимаемых предметом и изображением на одинаковом расстоянии, а можно — как отношение расстояний, на которых объект и изображение занимают один и тот же угол. Давайте примем последнее определение и решим уравнение 3.2 для отношения расстояний до изображения и до предмета (D_1/D_0). Окажется, что:

$$\frac{D_1}{D_0} = \frac{f}{f - D_0} = m, \quad (\text{Уравнение 3.3})$$

где m и есть увеличение.

Если линзу держат вплотную к предмету, например к странице книги, то D_0 равняется практически нулю и $f - D_0 = f$. Тогда увеличение m равняется f/f , то есть единице, и буквы не увеличиваются. Когда линзу поднимают, D_0 увеличивается, что приводит к тому, что $f - D_0$ должно уменьшаться, и, как мы видим из уравнения 3.3, m , следовательно, должно возрасть. Буквы кажутся все крупнее по мере того, как поднимается линза. Когда расстояние от линзы до страницы становится равным фокусному, $f - D_0$ становится равным $f - f$, или 0. Тогда увеличение по формуле будет $f/0$, а на практике — бесконечным. Однако идеаль-

ных линз не существует, все они несовершенны. В результате изображение будет полностью размыто. Максимум практического увеличения достигается, когда расстояние до предмета становится приближенным к фокусному.

Если предмет находится на расстоянии больше фокусного, $f - D_0$ становится отрицательным, и соответственно m становится тоже отрицательным. По мере того как D_0 продолжает возрастать, m , оставаясь отрицательным, уменьшается в абсолютном значении (в значении, не зависящем от знака). Это значит, что изображение становится маленьким и перевернутым.

Из уравнения 3.3 следует также, что при фиксированном расстоянии до предмета (D_0) увеличение возрастает с уменьшением фокусного расстояния линзы (при условии, что фокусное расстояние остается большим, чем расстояние до предмета). Чтобы понять это, давайте представим, что $D_0 = 1$ и что f последовательно принимает следующие значения: 5, 4, 3 и 2. Поскольку увеличение (m) равняется $f/(f - D_0)$, то оно будет последовательно равным $5/4$, $4/3$, $3/2$ и $2/1$, или 1,2, 1,33, 1,5 и 2,0. Это еще одна причина, по которой собирающая линза становится более сильной с уменьшением своего фокусного расстояния. В итоге сила ее увеличения возрастает по мере того, как ее фокусное расстояние уменьшается.

С рассеивающими линзами все обстоит так же с точностью до наоборот. Здесь лучи света, сходящиеся на своем пути к глазу, рассеиваются линзой и попадают в глаз под меньшим углом зрения. По этой причине сквозь рассеивающую линзу предметы выглядят маленькими.

Таким образом, можно легко отличить близорукого человека от дальнорюкого по его очкам. Близорукий человек носит рассеивающие линзы, и если эти линзы находятся в нескольких дюймах над книгой, то буквы кажутся меньше. Дальнорюкий же человек носит собирающие линзы, которые делают буквы крупнее.

Микроскопы и телескопы

Клетки сетчатки либо «светятся», когда на них падает свет, либо не светятся, когда свет на них не попадает. В результате получающееся изображение является в общем комбинацией из светлых и темных точек. Это напоминает репродукцию в газете из полутонов, хотя «точки» сетчатки куда меньше, чем элементы фотографии в газете.

Когда предмет сравнительно больше точек, из которых состоит, он ясно виден. Если он немногим больше, то кажется

размытым. Так, если вы посмотрите на фотографию в газете невооруженным взглядом, увидите четко вырисованное лицо. Если посмотреть через увеличительное стекло, участок, который вы увидите в линзе, будет немногим больше увеличиваемых точек, и изображение не будет четким. «Деталей» его вы не увидите.

Таким же образом, есть предел объему деталей, которые можно различить на любом объекте невооруженным глазом. Если вы будете стараться различать все более и более мелкие детали объекта, эти детали (в изображении объекта на вашей сетчатке) станут в конце концов не крупнее, чем точки, из которых состоит само изображение.

Свет от двух точек, разделенных на угловое расстояние, меньше некоего критического, возбуждает одну и ту же клетку сетчатки или, возможно, смежные. В таком случае две точки воспринимаются как одна. Только когда свет от двух точек возбуждает две клетки сетчатки, между которыми находится хотя бы одна невозбужденная клетка, тогда две точки действительно видятся как две. На расстоянии 25 см (обычно именно на этом расстоянии просмотр наиболее удобен) между двумя точками должно быть расстояние, как минимум, 0,01 см, чтобы они воспринимались именно как две разные точки; минимально требуемый для этого угол зрения примерно равен $0,006^\circ$.

Разрешающая сила человеческого глаза (то есть его способность видеть две близко расположенные точки как две точки и в целом его способность различать мелкие детали) действительно очень высока, гораздо выше, чем у других видов животных. Тем не менее за пределами разрешающей силы человеческого глаза лежит целый мир деталей, которые были бы для нас недоступны, если бы не линзы.

Предположим, две точки, угол зрения между которыми равен $0,001^\circ$, поместили под линзу с увеличением 6. Угол зрения между этими двумя точками возрастет до $0,006^\circ$, и они станут видны как две. Без линзы они воспринимались бы как одна. В общем увеличительная линза не просто делает предмет крупнее, она делает его детали доступными глазу.

Чтобы извлечь из этого какую-то выгоду, нужны хорошие линзы с гладкими поверхностями, избавленные от неровностей. Плохо обработанная линза не сохранит порядок преломляемых лучей, и изображение, будучи увеличенным, станет смазанным. Мелкие детали будут размыты и потеряны.

Делать достаточно гладко отшлифованные линзы не умели до XVII века. Голландский мастер Антони ван Левенгук (1632—1723) использовал небольшие куски стекла (легче безупречно обрабо-

тат маленький, чем большой кусок стекла) и шлифовал их так аккуратно и прилежно, что получал увеличения более чем в 200 раз без потерь деталей. С помощью таких линз он мог видеть капилляры кровеносной системы, красные кровяные тела и сперматозоиды. Что важнее всего, он мог изучать подробности независимых живых существ (простейших одноклеточных) слишком мелких, чтобы их можно было различить невооруженным глазом.

Такие сильные увеличительные линзы называются *микроскопами* (от греческого слова, означающего «видеть маленькое»). Микроскоп, состоящий из одной линзы, как у Левенгука, является *простым микроскопом*.

Как бы тщательно не была обработана линза, ее увеличивающей силе есть предел. Для усиления увеличивающей способности линзы надо уменьшить фокусное расстояние, и Левенгук уже использовал самые крошечные фокусные расстояния в своих крошечных линзах. Ожидать дальнейших успехов в этом направлении было бы непрактично.

Однако предположим, что свет с предмета падает сквозь собирающую линзу и производит реальное изображение с другой стороны. Как и в случае с вогнутыми зеркалами (см. гл. 2), это реальное изображение будет гораздо больше, чем сам предмет, если этот предмет находится рядом с фокусом. (Изображение будет более тусклым, потому что то же самое количество света будет распространяться на больший объем. Поэтому свет, исходящий от объекта, должен быть очень ярким, чтобы преодолеть этот эффект затемнения.)

Поскольку изображение реальное, с точки зрения оптики оно имеет те же свойства, что и сам предмет. И для того чтобы увеличить это изображение еще раз, можно использовать еще одну собирающую линзу. Используя, таким образом, две линзы или больше, можно получить изображение гораздо большее, чем можно было бы получить с помощью самой сильной линзы. Микроскопы, в которых используется больше одной линзы, называются *сложными*.

Первые сложные микроскопы, скорее всего, были созданы за сто лет до Левенгука голландским же изготовителем очков Захарасом Янсеном в 1590 году. Из-за того что он использовал несовершенные линзы, прошло много времени, пока такие микроскопы стали пригодными для чего-либо, кроме развлечения. Однако к концу жизни Левенгука возможности сложных микроскопов уже начинали превоехивать все, на что были способны его простые линзы.

В *телескопах* (от греческого «видеть далеко») тоже используются линзы. Свет от предмета, скажем от Луны, проходит

сквозь собирающую линзу и формирует с другой ее стороны реальное изображение. Это изображение затем увеличивается с помощью другой линзы. Увеличенное изображение больше, и на нем видно больше деталей, чем на самой Луне, когда на нее смотрят невооруженным взглядом.

Телескоп можно использовать и на Земле. Здесь реальное изображение, формируемое линзой, перевернуто, а видеть удаленную перспективу, где небо внизу, а земля сверху, было бы несколько странно, поэтому для создания изображения используются две линзы, и вторая переворачивает изображение, перевернутое первой, обратно. Вот это дважды перевернутое изображение уже увеличивается, и мы получаем *подзорную трубу*. Две маленьких подзорных трубы, составленные вместе для двух глаз, дают нам *бинокль*.

В астрономических телескопах не используют дополнительную линзу, поскольку каждая линза вносит искажения, и чем меньше линз используется, тем лучше. Перевернутое изображение звезды или Луны не смущает астронома, и он не против того, чтобы видеть их такими.

Телескоп, кажется, был изобретен подмастерьем голландского изготовителя очков Ганса Липперши примерно в 1608 году¹. На следующий год слух о новом приборе дошел до итальянского ученого Галилео Галилея (1564—1642), о котором я уже имел случай упомянуть в I части книги, и он стал экспериментировать с линзами, пока не получил телескоп. Его инструмент был плохоньким по сравнению с современными; он увеличивал примерно раз в тридцать. Однако, повернув телескоп к небу, Галилей обнаружил там девственную территорию, и, куда бы он ни смотрел, он видел то, что не видел больше никто и никогда.

Большее количество деталей, увиденных им на Луне, позволило ему различить лунные горы и кратеры. Он видел пятна на Солнце, а Венера и Юпитер предстали перед ним размерами с глобус. Он смог разглядеть, что Венера проходит те же фазы, что и Луна (как то и предсказывала теория Коперника), и что Юпитер окружен четырьмя спутниками.

Линзы телескопа служили также и для собирания света. Весь свет, падающий на линзу, собирается в изображение. Если линза больше, чем зрачок глаза (а у телескопа она все-таки больше), то в изображении, создаваемом телескопом, концентрируется больше света, чем в изображении, создаваемом глазом. Когда Галилео направил свой телескоп в звездное небо, он уви-

¹ Мальчик играл с линзами вместо того, чтобы работать, — делаете выводы.

дел множество звезд, которые были ясно видны в телескоп и которые исчезали, когда он отнимал инструмент от глаза.

Естественно, чем больше линза, тем больше света она может собрать и тем более тусклые звезды она может показать. Современный телескоп в Йерксе (дальний потомок телескопа Галлея) имеет собирающую линзу 40 дюймов в диаметре; сравните с диаметром зрачка — он всего $\frac{1}{4}$ дюйма! Отношение диаметров — 120 к 1. Количество собираемого света зависит от площади линзы, которая пропорциональна квадрату диаметра. Следовательно, сила собирания света у телескопа в Йерксе в 14 400 раз больше, чем у человеческого глаза, и он показывает звезды, которые во столько же раз тусклее.

Более того, если свет из телескопа сфокусировать на фотопленке, а не на сетчатке, проявляется еще одно преимущество. Свет, попадающий на пленку, производит эффект накопления (которого он не производит, попадая на глаз). Звезда, которая слишком тускла, чтобы ее можно было увидеть даже в телескоп, будет медленно воздействовать на химию на пленке и после соответствующего времени выдержки может быть сфотографирована, даже не будучи увиденной.

Теоретически линзы можно делать все больше и больше, и Вселенная будет исследована все глубже и глубже. Но тут вмешиваются практические соображения. Чем больше линза, тем труднее и сложнее гладко отшлифовать ее и тем труднее не давать ей прогибаться под собственным весом (поскольку держаться она может только на оправе). Вдобавок чем больше линза, тем толще она должна быть, а поскольку ни одна линза не имеет стопроцентной прозрачности, то чем она толще, тем больше света она поглощает. Начиная с определенных размеров делать большие линзы становится невыгодно. Телескоп в Йеркской обсерватории в Висконсине имеет 40-дюймовую линзу и является самым большим телескопом подобного рода в мире. Он был построен в 1897 году, и с тех пор ничего большего не строили. И вряд ли построят.

Глава 4

ЦВЕТ

Спектр

До сих пор я говорил о свете так, как будто он весь одинаковый, за исключением разницы в яркости между лучками. На самом деле есть еще один различительный признак, знакомый

нам всем, — цвет. Мы знаем, что есть красный цвет, синий, зеленый, и так далее со множеством оттенков.

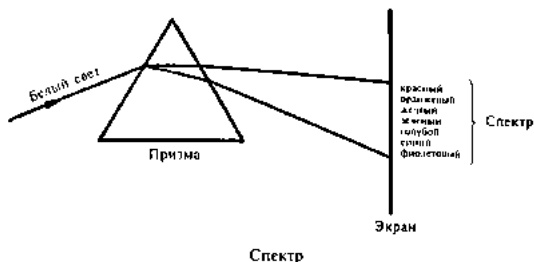
Раньше принято было считать белый свет Солнца простейшей формой света, «просто» светом. (И действительно, белый до сих пор является цветом чистоты, поэтому молодая невеста идет к алтарю в белом платье.) Цвет же, считалось, образуется, когда к свету добавляется примесь. Если свет проходит через красное стекло или отражается от синей поверхности, к нему примешивается краснота или синена и придает ему свойства, которых он сам по себе не имел.

С этой точки зрения нас привело бы в замешательство, если бы мы увидели, как чистый белый свет солнца отображает цвета без какого-либо воздействия цветного вещества. Одним из таких феноменов, известных людям всех возрастов, является радуга — дуга из разноцветного света, которая иногда появляется на небе, когда солнце выходит после дождя. Загадка радуги привела к появлению множества мифологических объяснений; наиболее известное — что она является мостом между небом и землей. Первая попытка дать ей рациональное объяснение была предпринята римским философом Луцием Аннеем Сенекой (ок. 4 до н. э. — 65 н. э.), который подметил, что радуга очень похожа на игру цветов, которую мы часто видим на краю стекла.

К XVII столетию физики начали подозревать, что радуга, так же как и цвета на краю стекла, каким-то образом производится преломлением света. Французский математик Рене Декарт разработал подробную математическую теорию преломления и полного отражения света сферами из воды. Таким образом, он довольно четко мог просчитать, каким будет положение относительно солнца радуги, появляющейся благодаря преломлению солнечных лучей крошечными капельками воды, остающимися висеть в воздухе после дождя, но не смог просчитать цвет.

Право сделать решающий шаг в этом направлении осталось английскому ученому Исааку Ньютону, трудам которого уделено так много внимания в I части этой книги. В 1666 году он пропустил в темную комнату пучок солнечного света так, чтобы тот упал на призму. Преломленный призмой пучок света затем попал на белую поверхность. И там он предстал не в виде белого луча света, а в виде разных цветов, непрерывно перетекающих друг в друга в том же самом порядке, как и в радуге (красный—оранжевый—желтый—зеленый—голубой—синий—фиолетовый). Это было цветное изображение, и оно получило название *спектр*, от латинского слова, означающего «изображение».

Если свет спектра формировался на поверхности с маленьким отверстием таким образом, что только один из цветов попадает на него и проходит дальше, и если эти цветные лучи попадают сквозь отверстие на следующую призму, пятно света будет шире, но другие цвета в нем уже не появятся.



Вклад Ньютона заключался не в том, что он получил эти цвета, а делал и до него, а в том, что он предложил им новое объяснение. Единственные ингредиенты, которые произвели спектр, — это простой солнечный свет и простое бесцветное стекло призмы. Тогда Ньютон решил, вопреки многолетнему сложившемуся мнению, что свет — не чистый, а является комплексной смесью всех цветов радуги. Он кажется белым только потому, что эта комбинация раздражает сетчатку таким образом, который мозг интерпретирует как «белый цвет».

В пользу этого предположения говорил опыт Ньютона об обратимости создания спектра. Ньютон пустил свет цветного спектра на вторую призму, находящуюся вверх ногами по отношению к первой. Свет в этом случае преломлялся в обратном направлении, и ситуация менялась на противоположную. Если раньше круглый пучок белого света распадался на толстую разноцветную линию, то теперь эта линия вновь сжималась в круг белого света.

Очевидно, белый свет состоит из широкого набора разных видов света, каждый из которых преломляется особым образом. Группа лучей, которые наименее преломляются, дают нам ощущение красного; следующая группа, преломленная чуть больше, дает ощущение оранжевого и так далее вплоть до наиболее преломляемых лучей, которые видятся нам фиолетовыми.

Белый свет из-за этой разницы в преломляемости своих компонентов всегда распадается на цвета, проходя под углом из одной среды в другую с другим коэффициентом преломления. Однако, если вторая среда ограничена параллельными поверхностями (что чаще всего относится к обычному стеклу), этот эффект, получаемый при входе, отменяется при выходе. По этой причине белый свет, входящий в стекло, выходит из него таким же белым. Когда края прозрачной среды не параллельны, как это бывает в призме на грани стекла или в случае круглых капелек воды, разбиение на цвета не отменяется, и в результате мы получаем спектр всех цветов радуги.

Это означает, что при определении коэффициента преломления прозрачного вещества использование белого света приводит к неточностям, поскольку различными цветовыми лучами, содержащимися в нем, демонстрируется достаточное многообразие коэффициентов преломления. По этой причине иногда для определения коэффициента преломления нужно использовать свет¹ какого-то конкретного цвета. Одним из часто используемых приборов является «натриевая лампа» — устройство, в котором свет излучается нагретым в лампе натриевым паром. Свет имеет желтый цвет, и его преломление колеблется в очень незначительном диапазоне.

При таком взгляде на свет легко объяснить существование цветных предметов. Нет необходимости предполагать, что предметы должны быть либо полностью прозрачными (пропускающими все цвета света), либо полностью непрозрачными (не пропускающими никаких). Некоторые вещества вполне могут быть непрозрачными для одних цветов и прозрачными для других. Например, красное стекло может обладать свойством химического вещества, которое поглощает все цвета, кроме красного, и пропускает красный. В этом случае белый свет краснеет, проходя сквозь красное стекло, не потому, что он приобретает от стекла «красноту», а потому, что теряет в этом стекле все компоненты, кроме красного. Таким же образом, предмет может отражать одни цвета и поглощать другие и поэтому предстает глазу окрашенным в определенный цвет.

Не следует, однако, и полагать, что все желтые предметы отражают только желтый свет, а все синие стекла пропускают только синий. Важно различать цвет в физическом и физиологическом понимании. Физически цвет может быть определен через преломление, которому он подвергается, переходя из од-

¹ Каждый цвет света имеет свою «длину волны». Это будет обсуждаться в следующей главе.

ного вещества в другое. Физиологически цвет — это то, как его интерпретирует наш мозг. Физиологический механизм сетчатки глаза действует таким образом, что физический оранжевый цвет дает ощущение оранжевого; соответственно он же будет физиологическим оранжевым. Однако сетчатка может таким же образом возбуждаться и смесью цветов, среди которых нет физического оранжевого, например смесью красного и желтого. Эта смесь тоже будет тогда физиологическим оранжевым.

Свет, окрашенный прохождением через цветное стекло или отражением от цветной поверхности, не обязательно содержит физические цвета, соответствующие физиологическим, которые мы видим. Мы можем определить присутствующие физические цвета, пропуская свет сквозь призму; для физиологических цветов достаточно нашего зрения. Если, конечно, наше цветовое зрение не нарушено.

В 1807 году английский ученый Томас Янг (1773—1829) указал, что красный, зеленый и синий цвета могут в правильных сочетаниях давать ощущения всех остальных цветов. Эту мысль позже развил немецкий физиолог Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц (1821—1894), и поэтому она получила название «теория цветового зрения Янга—Гельмгольца».

Многие физиологи считают, что способность красного, зеленого и синего цветов воссоздавать весь спектр происходит из природы сетчатки, то есть, должно быть, в сетчатке существуют три типа цветочувствительных клеток, одни сильнее всего реагируют на красный цвет, другие — на зеленый, третьи — на синий. Степень, в которой определенный цвет спектра или определенная смесь цветов возбуждают клетки каждого из трех типов, и приводит соответственно к цветовым ощущениям, которые нами воспринимаются. Цвет, одинаково раздражающий все три, воспринимается как «белый», цвет, возбуждающий их в одной пропорции, воспринимается как «желтый», в другой — как «фиолетовый» и т. д.

Этот же принцип используется в цветной фотографии. Пленка состоит из трех слоев, один из которых содержит вещество, чувствительное к красному цвету, другой — к синему, третий — к зеленому. В каждой точке изображения свет воздействует на все три слоя в определенной пропорции и в процессе воздействия создает на каждой точке изображения комбинацию цветочувствительных веществ в той же пропорции. Получившаяся смесь воздействует на три рецептора сетчатки, и на фотографии мы видим те же цвета, что и на самом предмете.

Далее, цветная печать тоже может быть произведена через сочетание точек нескольких различных цветов. Любые цвета

могут быть воспроизведены путем изменения пропорций представленных цветных точек. Под увеличительным стеклом отдельные точки могут оказаться достаточно большими, чтобы можно было увидеть их настоящий цвет, но, если отдельную точку нельзя увидеть невооруженным глазом, соседние точки будут воздействовать на один и тот же участок сетчатки и производить эффект, результатом которого будет общее восприятие цвета, а не самих точек.

Похожая ситуация происходит и на экране цветного телевизора. Экран покрыт множеством точек, некоторые из которых, реагируя на свет, светятся синим, другие — зеленым, третьи — красным. Каждый участок телевизионного изображения, снятый и переданный камерой, возбуждает эти точки в определенной пропорции яркости, и мы ощущаем эту пропорцию как те же цвета, что присутствовали в изначальном объекте¹.

Отражающие телескопы

Тот факт, что белый цвет является смесью цветов, объясняет феномен, считавшийся раздражающим несовершенством телескопов. Параллельный пучок лучей света, проходя сквозь собирающую линзу, собирается в фокус с другой стороны линзы. Точное положение этого фокуса зависит от степени, с которой свет преломляется, проходя сквозь линзу, и в этом кроется проблема, поскольку свет состоит из смеси цветов, каждый из которых имеет свою преломляемость, и почти всегда цвет, проходящий через линзы телескопов и микроскопов, — белый.

Красная составляющая белого цвета меньше преломляется, проходя сквозь линзу, и приходит к фокусу в одной точке. Оранжевая составляющая преломляется несколько больше и приходит к фокусу в другой точке, чуть ближе расположенной к линзе, чем красная. Желтый цвет фокусируется еще ближе, а за ним идут зеленый, голубой, синий, и ближе всех фиолетовый. Это означает, что если глаз принимает к окуляру телескопа таким образом, что красная составляющая света от небесного тела сфокусирована на сетчатке, то остальные цвета будут фокусироваться дальше от глаза и соответственно их изображение будет более широким и размытым. Изображение небесного тела будет окружено синим ореолом. Если глаз примет таким образом, что на нем сфокуси-

¹ Еще не решено окончательно, это ли трехцветная система описывает способ, которым цвета различает глаз человека, но ее вполне можно использовать в практических целях — для производства цветных фотографий и телевизионного изображения.

рована фиолетовая составляющая спектра, то все остальные, получается, будут еще не достигшими фокуса, и ореол будет оранжевым. Ничего не остается делать, кроме как фокусировать глаз где-то посередине и терпеть цветные ореолы, которые в таком случае становятся минимальными, но не исчезают.

Это называется *хроматической аберрацией*; слово «хроматическая» происходит от греческого слова, означающего «цвет». Ее не будет, если свет берется только из малой части спектра (такой свет будет *монохромным*, или одноцветным), но телескоп или микроскоп, как правило, имеет дело с обычным, не монохромным светом.

Ньютон догадывался, что хроматическая аберрация является абсолютно неизбежной погрешностью линз и ни один телескоп, действие которого основано на изображениях, создаваемых преломлением света в линзе (т. е. *телескоп-рефрактор*), не будет от этого избавлен. Он задумался об исправлении ситуации путем прикладывания к линзе зеркала. Как уже указывалось в этой книге, реальное изображение формируется вогнутым зеркалом, отражающим свет, так же как и выпуклой линзой, его пропускающей. Более того, и то время как разные цвета света преломляются сквозь линзы по-разному, отражаются от зеркала они строго одинаково. Следовательно, зеркала не создают хроматической аберрации.

В 1668 году Ньютон разработал телескоп, в котором использовалось такое зеркало. Это был первый в практике *телескоп-рефлектор*. Он был всего в шесть дюймов длиной и в один дюйм шириной, но был столь же хорош, сколь и первый телескоп Галилея. Вскоре после этого Ньютон создал и другие телескопы-рефлекторы — больше и лучше.

Помимо устранения хроматической аберрации, отражающие телескопы имели и другие преимущества перед телескопами-рефракторами. Линзы должны быть сделана из безупречного стекла с двумя изогнутыми поверхностями — передней и задней, отшлифована как можно идеальнее, раз слабый свет звезд должен быть передан без потерь и тщательно сфокусирован. Однако зеркало лишь отражает свет, и для него важно, чтобы была совершенной только отражающая поверхность. В телескопическом зеркале передняя поверхность (а не задняя стенка, как у обычных зеркал) покрыта тонкой отражающей металлической пленкой, поэтому стекло за металлической поверхностью не обязано быть идеальным. Оно не имеет дела со светом, оно просто поддерживает металлическую поверхность. Поскольку гораздо легче создать большое стекло с некоторой погрешностью, чем большое идеальное стекло, то легче сделать большое телескопическое зеркало, чем

большую телескопическую линзу, особенно учитывая, что в зеркале необходимо обработать одну поверхность, а в линзе — две.

Опять же, при прохождении сквозь линзу часть света обязательно поглощается. Чем больше и толще линза, тем больше поглощение. А в случае с зеркалом, с другой стороны, независимо от его величины свет просто отражается от поверхности и практически не теряется за счет поглощения. Далее, линза должна держаться в оправе, ведь вся ее площадь должна быть открыта для беспрепятственного прохождения света; большую, толстую линзу становится трудно поддерживать в оправе, потому что середина начинает провисать, и это приводит к искажениям. Зеркало же можно поддерживать сколько угодно по всей его площади.

Это привело к тому, что все большие телескопы в мире — рефлекторы. Самый большой из действующих — 200-дюймовый рефлектор, который был запущен в эксплуатацию в 1948 году на горе Паломар в Калифорнии. Еще есть 120-дюймовый рефлектор на горе Гамильтон и 100-дюймовый на горе Уилсон (оба в Калифорнии). В Крыму есть 103-дюймовый телескоп и строят 236-дюймовый.

Сравните это с 40-дюймовым рефрактором в обсерватории Йеркса в Висконсине, который стал самым большим телескопом-рефрактором в 1897 году, да, похоже, и останется таковым.

Однако даже рефлекторы имеют практические ограничения в размерах. Собираение и концентрация света включают в себя соби́рание и концентрацию несовершенств окружающей среды — дымки в воздухе, рассеянного света от далеких городов, разницы в температуре, которая выражается в быстрых изменениях преломляемости воздуха и застывает изображения звезд плясать и мерцать.

Для следующего этапа оптической телескопии нам, возможно, придется ждать того дня (может быть, уже не столь отдаленного), когда астрономическую обсерваторию можно будет основать на Луне, где нет воздуха, который поглощает, преломляет и рассеивает тусклый свет звезд, и где астроном (имея все средства для выживания во враждебной человеку среде) будет чувствовать себя как фигурально выражаясь, так и вполне буквально на седьмом небе.

Но Ньютон ошибался, считая, что хроматической абберрации в линзах избежать невозможно. Ему не довелось испытать призм, сделанные из различных сортов стекла, на предмет того, будет ли различие в преломлении разных цветов у них одинаковым. Более того, он проигнорировал сообщения от тех, кому довелось это сделать (конь с четырьмя ногами — и тот спотыкается!).

Разница в степени преломления света на красном и фиолетовом краях спектра определяет степень разброса спектра на заданном расстоянии от призмы. Это *дисперсия* спектра. У различных сортов стекла дисперсия различна. Так, оптическое стекло флинт-стекло (содержащее свинец) имеет дисперсию в два раза большую, чем кронглас (свинца не содержащий).

Следовательно, можно сделать собирающую линзу из кронгласса и добавить ее к менее сильной рассеивающей линзе из флинтгласса. Рассеивающая линза из флинтгласса будет нейтрализовать лишь часть собирающего эффекта линзы из кронгласса, но зато она сбалансирует всю дисперсию. В результате мы будем иметь комбинированную линзу, собирающая сила которой будет не так велика, как у одной линзы из кронгласса, но не создающую спектра и не приводящую к сферической аберрации. Это ахроматическая линза (от греческого «бесцветный»). Английский оптик Джон Доллон (1706—1761) создал первый ахроматический телескоп в 1758 году. Хотя он и не устранил этим всех недостатков рефракторов, но сделал практичными умеренно большие телескопы-рефракторы.

Развитие ахроматических линз имело особенно большое значение для микроскопии. Здесь невыгодно было заменять зеркалами линзы и отражением преломление. По этой причине приходилось бороться со смертельной для подробностей хроматической аберрацией еще долгое время после того, как пользователи телескопами от нее избавились.

Усилиями английского оптика Джозефа Джексона Листера (1786—1869) и итальянского астронома Джованни Баттисты Амичи (1786—1863) в начале XIX века в конце концов были разработаны микроскопы с ахроматическими линзами. И только после этого появилась возможность ясно видеть маленькие микроорганизмы, что дало начало процветанию бактериологии.

Линии спектра

Фактически мы не должны думать о солнечном свете как о составленном из нескольких разных цветов, как о смеси из семи пигментов. Солнечный свет — это смесь большого количества составляющих, разделенных очень незначительной разницей в преломляемости. К примеру, красная часть спектра не является однородно красной, а постепенно переходящей в оранжевую.

В радуге и в простом спектре вроде того, что получился у Ньютона, свет кажется непрерывным, как будто в солнечном

свете присутствует все возможное бесконечное множество преломляемости.

В пучке света, проходящем в маленькое отверстие в шторе и затем пропущенном сквозь призму, формируется большое количество круглых изображений, каждое из которых дано в виде света определенной преломляемости. Они накладываются друг на друга и сливаются в спектр. Если свет определенной преломляемости отсутствует, соседствующие по всем направлениям изображения перекроют пятно, где должна бы быть недостающая преломляемость, и пустоты не будет видно.

Ситуация может быть исправлена, если пучок лучей света пропустят в узкую щель. Тогда спектр будет состоять из миллиарда изображений щели, каждое из которых лишь слегка будет перекрывать соседнее. В 1802 году английский химик Уильям Хайд Уолластон (1766—1828) увидел в спектре несколько темных линий, представляющих недостающие изображения щели. Но он решил, что они представляют собой линии границ между цветами, и не пошел дальше.

Однако между 1814-м и 1824 годами немецкий оптик Йозеф фон Фраунгофер (1787—1826), работая с призмами очень высокого качества, заметил в спектре сотни таких темных линий. Он присвоил наиболее видным из них буквы от А до G и тщательно разметил относительные позиции всех пустот, которые только смог обнаружить. В его честь эти спектральные линии иногда называют *линиями Фраунгофера*.

Фраунгофер заметил, что набор линий в солнечном свете и свете отраженных лучей Солнца (от Луны или, скажем, от Венеры) всегда один и тот же. Однако свет звезд дает совсем другие наборы. Тусклый свет небесных тел, отличных от Солнца, он изучал, помещая призму к окуляру телескопа, — это был первый случай применения *спектроскопа*.

Работа Фраунгофера при его жизни была сильно недооценена, но спустя поколение немецкий физик Густав Роберт Кирхгоф стал использовать спектроскоп как химический инструмент и основал науку *спектроскопию*.

Химикам было известно, что пары различных элементов в раскаленном виде производят свет различных цветов. Пары натрия дают сильный желтый цвет; пары калия — тусклый фиолетовый свет; ртути — болезненно зеленоватый цвет и т. д. Кирхгоф пропустил такой свет через спектроскоп и обнаружил, что различные элементы производили свет, в очень малой степени изменяющийся преломление. В щели появлялось очень мало изображений, они широко распространялись, и это называли *спектром испускания*. Точное положение каждой линии измерили по тщательно разме-

ченному фону, и тогда стало видно, что каждый элемент дает линии одного и того же цвета на одном и том же месте, даже в химической комбинации с другими элементами. Более того, не нашлось двух элементов, которые давали бы линии на одном и том же месте.

Следовательно, линии спектра испускания можно использовать как «отличающие пальчики» элементов. Так, в 1859 году Кирхгоф и его старший сотрудник, немецкий химик Роберт Вильгельм Бунзен (1811—1899), раскалив определенный минерал и изучая спектр испускания полученных паров, обнаружили линии, не похожие на производимые ни одним из известных элементов. Кирхгоф и Бунзен, следовательно, предположили наличие нового элемента, который назвали *цезием* (от латинского слова, означающего «голубое небо») из-за небесно-голубого цвета самых ярких из новых обнаруженных ими линий. На следующий год они сделали подобное открытие и объявили о находке *рубидия* (от латинского «темно-красный»). Существование обоих металлов было быстро подтверждено более древними химическими методами.

Кирхгоф наблюдал и явление, обратное спектру испускания. Раскаленные твердые тела испускают свет всех цветов, создавая *непрерывный спектр*. Если свет угольной дуги, например, представляя такой непрерывный спектр, пропускают через натриевый пар, температура которого ниже температуры дуги, то натриевый пар поглотит некоторое количество света. Однако он поглотит свет только определенных видов, а именно тех видов, которые испускал бы сам натриевый пар, будучи раскаленным. Так, натриевый пар, будучи раскаленным и испускающим свет, производит две близкие друг к другу желтые линии, которые создают практически весь его спектр. Когда холодный натриевый пар поглощает свет такого непрерывного спектра, обнаруживается, что спектр пересекают две темные линии как раз на месте двух ярких линий спектра испускания натрия. Темные линии представляют *спектр поглощения* натрия.



Натриевые линии

Часть солнечного спектра в желтом секторе

Темные линии в солнечном спектре, кажется, являются спектром поглощения. Пылающее тело Солнца достаточно сложно по химической структуре, чтобы создавать непрерывный спектр. Проходя через несколько более холодную его атмосферу, свет частично поглощается. Те части, которые поглощаются сильнее и которые на спектре будут выглядеть как темные линии, соответствуют спектру испускания элементов, которых больше всего в солнечной атмосфере. Так, в солнечном спектре есть явные линии поглощения натрия (Фраунгофер обозначил их как «линию D»), и это — убедительное свидетельство присутствия натрия в солнечной атмосфере.

Таким образом в Солнце были найдены различные элементы. Один из них, гелий, был даже обнаружен за поколение до того, как его присутствие было обнаружено на Земле. Теперь можно определить даже состав далеких звезд. Поскольку детали спектроскопических исследований небес лучше описаны в учебнике астрономии, достаточно будет в завершение просто подчеркнуть: они ясно показали, что небесные тела состоят из тех же элементов, что и Земля, хотя и не обязательно в тех же пропорциях.

А еще они показали, как опасно устанавливать пределы человеческих возможностей. Французский философ Огюст Конт, пытаясь привести пример абсолютного предела, наложенного на познания человека, сказал, что человек никогда не будет знать, из чего состоят звезды. Если бы он прожил на несколько лет больше, он бы увидел, как его абсолютный предел легко превзойден.

Дифракция

Открытие, что белый цвет на самом деле есть смешение множества цветов, поставило перед физиками новые серьезные вопросы. Пока свет воспринимался как нераздельный чистый феномен, геометрической оптики было достаточно. Можно было рисовать линии, представляющие лучи света, и феномены отражения и преломления можно было анализировать, не принимая в расчет природу света. Этот вопрос оставался философам.

Если же принять свет как смесь цветов, становится необходимо искать объяснения того, каким образом свет одного цвета отличается от другого. Для этого следовало рассмотреть вопрос о природе света, как такового, — так родилась *физическая оптика*.

Как было указано в начале книги, есть два пути решить вопрос о воздействии на расстоянии. Один — это предположить некие частицы, стремящиеся сквозь пространство, которое рассматривается как пустое, а второй — предположить некие волны, катящиеся сквозь пространство, которое не является полностью пустым. Во второй половине XVII века для света предлагались оба типа объяснения.

Наиболее явная из двух альтернатив — теория частиц, которую поддерживал сам Ньютон. Для начала — она объясняет прямолинейное распространение света. Предположим, что светящиеся объекты суть постоянно горящие крошечные частицы, разлетающиеся во всех направлениях. Если эти частицы считать не имеющими массы, то светящееся тело не должно терять вес из-за того, что оно светится, и на свет не будет действовать сила гравитации. Не встречая препятствий, свет, если на него не действует сила притяжения, должен двигаться по прямой с постоянной скоростью, как того требует первый закон Ньютона (см. ч. I). Частицы света должны останавливаться и поглощаться непрозрачными препятствиями, а частицы, пролетевшие мимо препятствия, должны создавать резкую границу между освещенной областью и областью, находящейся в тени от препятствия.

Для Ньютона альтернатива в виде волновой теории была неприемлема. В то время ученым были знакомы только волны на воде и звуковые волны (см. ч. I), а они не обязательно движутся по прямой и не приводят к образованию резких теней. Звуковые волны обтекают препятствия, потому что, находясь за углом, мы все равно слышим звук; и на воде волны заметно обходят препятствие, например плывущее бревно или дерево. Казалось разумным предположить, что эти свойства характеризуют волны в целом.

Но и теория частиц имела узкие места. Пучки света могут пересекаться под любым углом, не воздействуя друг на друга в плане направления или цвета, что означает, что частички света, видимо, не сталкиваются и не отскакивают друг от друга, как это должны делать любые частицы. Более того, несмотря на оригинальные гипотезы, так и не нашлось удовлетворительного объяснения, почему некоторые частицы света дают ощущение красного, другие — зеленого и т. д. Конечно, частицы должны при этом чем-то отличаться друг от друга, но чем?

Некоторые из современников Ньютона приняли волновую теорию, которую отрицал сам Ньютон. Самым энергичным сторонником волновой теории в XVII веке был голландский физик Кристиан Хайгенс (1629—1695). У него не было реального свиде-

тельства в пользу волн, но он выбивался из сил, чтобы доказать, что волны можно рассматривать таким образом, чтобы они соответствовали фактам геометрической оптики. В 1678 году он предположил, что, когда фронт волны занимает определенную линию, каждая точка на фронте выступает в роли источника круговых волн, распространяющихся независимо. Эти волны сливаются, и можно провести линию по касательной к бесчисленному множеству маленьких кругов с центрами в каждой точке изначального фронта волны. Такая касательная является новым фронтом волны, который служит отправной линией для следующего бесконечного количества круговых волн, к которым можно нарисовать еще одну общую касательную, и т. д.

Если анализировать волны таким образом, по принципу, который сейчас называется *принципом Хайгенса*, видно, что фронт волны будет распространяться вперед по прямой (лю крайней мере, что касается отдельной его части) и будет отражен под углом отражения, равным углу падения, и т. д. Будучи нематериальными, эти световые волны не будут, пересекаясь, воздействовать друг на друга (и действительно, звуковые волны и волны в воде могут пересекаться, не влияя друг на друга).

Итак, казалось, что можно многое сказать и за и против каждой теории. Следовательно, нужно взглянуть на места, в которых две теории различаются, и посмотреть, какая из них соответствует природе описываемого ими феномена. Такие наблюдения помогут отбросить ту или другую теорию (а может, и обе). Этот метод обычно используется, когда теории конфликтуют или пересекаются друг с другом.

Например, теория Хайгенса могла объяснить преломление при определенных условиях. Предположим, что прямой фронт волны под углом попадает на плоскую стеклянную поверхность. Один край фронта волны первым ударяется о стекло, но предположим, что его продвижение замедляется, когда он входит в стекло. В этом случае, когда о стекло ударяется следующий участок фронта, он догоняет предыдущий, потому что двигается сквозь воздух, а первый — медленнее, сквозь стекло. Каждый участок фронта волны, попадая в стекло, замедляет движение, и его догоняет последующий. Таким образом преломляется весь фронт волны и в результате входит в стекло под меньшим углом к нормали. Выходя из стекла, первая порция вновь набирает скорость и отрывается от тех порций, которые еще находятся в стекле. Выходящий свет возвращается к своему изначальному направлению.

Тут можно провести аналогию со строем солдат на марше, которые под углом сходят с дороги на вспаханное поле. Сходящие

с дороги солдаты, естественно, замедляют ход; т. е. кто первыми вступают на поле, первыми замедляются, и весь строй (если они не будут специально выправляться) должен будет изменить направление марша по направлению к нормали, проводимой к границе между дорогой и полем.

Так волновая теория может объяснить преломление, предполагая, что скорость света в стекле меньше, чем в воздухе. Делая дальнейшие предположения, она может объяснить также и явление спектра. Если свет — форма волны, то у него должна быть длина волны (расстояние от гребня одной волны до гребня другой, см. ч. I). Тогда предположим, что эта длина волны меняется в зависимости от цвета, будучи самой длинной на красном краю спектра и самой короткой на фиолетовом краю. Тогда логично будет предположить, что короткие волны резко тормозятся, входя в стекло из воздуха, чем длинные. (Опять же, продолжая аналогию: марширующий солдат, у которого короткие шаги, большее количество раз увязнет во влаханном поле, чем солдат, у которого шаги длиннее, если они будут проходить одно и то же расстояние. Тогда солдат с короткими шагами отстанет больше, и марширующий строй, если не будет предприниматься никакие попытки исправить положение, разобьется на группы, марширующие в слегка отличающихся направлениях в зависимости от длины своего шага.)

Короче говоря, красный цвет будет преломляться меньше всех, за ним — оранжевый и т. д. В таком случае, проходя через призму, свет и создаст спектр.

Ньютон тоже мог объяснить преломление с точки зрения своей теории частиц, но ему приходилось признать, что скорость частиц света возрастает при переходе от низкой оптической плотности к более высокой. Здесь было явное противоречие между двумя теориями. Оставалось всего лишь измерить скорость света в разных средах и отметить, как меняется скорость; тогда можно было бы сделать выбор между частицами Ньютона и волнами Хайгенса. Единственная загвоздка состояла в том, что произведение такого замера стало возможным только двумя столетиями позже Ньютона и Хайгенса.

Однако была еще одна разница в предсказаниях теорий. Частицы, по Ньютому, перемещались по прямой во всех частях светового луча, поэтому луч и давал абсолютно резкие тени. Волны, по Хайгенсу, вели себя не так. Каждая точка фронта волны служила фокусом для волн во всех направлениях, но по большей части фронта волна, идущая от точки влево, гасилась волной, идущей от соседней точки вправо, и т. д. С учетом всех этих взаимных погашений оставалось только движение вперед.

Однако было и исключение — край фронта волны. На правом краю движение вправо не гасилось, потому что для этого недо- ставало соседней точки справа. На левом краю не гасилось дви- жение влево. Следовательно, пучок света, будучи волной, должен был бы «растекаться» в стороны. В особенности если сноп лучей проходит сквозь отверстие в непрозрачном препят- ствии, свет на границах пучка должен был бы начать растекать- ся в стороны с самого момента прохода сквозь отверстие, так что площадь освещенной отдаленной поверхности должна быть шире, чем можно ожидать при прямолинейном движении.

Феномен подобного распространения волны в стороны на- зывается *дифракцией*, и его легко наблюдать на примере волн в воде и звуковых волн. Поскольку свет, проходя сквозь от- верстие в препятствии, не демонстрирует дифракции, казалось, что права теория частиц. К сожалению, во времена Ньютона не было известно, что чем меньше длина любого вида волны, тем меньше эффект дифракции. Следовательно, если сделать еще одно предположение — что длина световой волны очень мала, — то логично ожидать, что эффект дифракции не будет заметен, и с решением следовало бы подождать.

На самом-то деле дифракция света наблюдалась и в XVII ве- ке. В 1665 году итальянский физик Франческо Мария Гримальди (1618—1663) пропустил свет через два отверстия и показал, что площадь светового пятна на освещенной в итоге поверх- ности была несколько больше, чем должна быть, если бы свет проходил через два отверстия абсолютно прямолинейно. Дру- гими словами, дифракция имела место.

Что еще важнее, границы освещенной области были цветны- ми, внешний их круг был красным, а внутренний — фиолетовым. Это тоже, как поняли в конце концов, подходило под волновую теорию, потому что, если красный цвет имеет наибольшую дли- ну волны, он подвергнется наибольшей дифракции, а фиолето- вый, с самой короткой длиной волны, — наименьшей.

И действительно, именно по этому принципу формируется спектр. Если стекло разметить ровными параллельными лини- ями, каждая из них будет представлять собой непрозрачную об- ласть, отделенную от других прозрачной областью, это будет ряд темных полос, по краям которых будет иметь место ди- фракция. Фактически, если полосы будут очень узкими, мож- но сказать, что стекло будет состоять из одних только краев этих полос. Если разметка очень прямая, а полосы очень узкие, то дифракция на каждом краю будет одинаковой, и дифракция с каждого края будет усиливать дифракцию со всех остальных. Таким образом, получится спектр не хуже, а вернее, лучше, чем

у любой призмы. Полосы легче точно проводить по полированному металлу, чем по стеклу. В таком случае каждая линия является непрозрачным участком поверхности, отделенным от других отражающей поверхностью, и в таком случае тоже будет создан спектр (хотя при обычном отражении от нетронутых поверхностей этого не происходит).

Спектр, создаваемый такой *решеткой дифракции*, является обратным по отношению к спектру, сформированному рефракцией. В то время как фиолетовый является наиболее преломляемым цветом, а красный — наименее, говоря о дифракции, мы видим, что фиолетовый является наименее дифрагируемым. Следовательно, если в первом случае спектр красный слева и фиолетовый справа, то во втором — наоборот, красный справа и фиолетовый слева. Точнее, в случае спектра рефракции красный является цветом, ближайшим к изначальной линии движения света, а фиолетовый — ближайшим к изначальной линии в случае спектра дифракции.

(В наше время решетка дифракции используется для формирования спектра гораздо чаще, чем призма. Первым, кто использовал решетку дифракции для этих целей, был Фраунгофер — человек, который первым произвел и полное наблюдение линий спектра.)

Ньютон знал об экспериментах Гримальди и даже повторял их, особо отмечая появление цвета по краям. Однако этот феномен показался ему столь незначительным, что он не счел его поводом усомниться в теории частиц и поэтому недооценил его значение. Более показательные свидетельства дифракции и возможность измерять скорость света в различных средах все еще были на тот момент делом будущего. В результате физикам XVI века осталось выбирать между двумя личностями, а не между двумя наборами физических представлений. Престиж Ньютона был на тот момент велик, и еще сотню лет после этого, на протяжении всего XVIII века, почти все физики считали свет частицами по природе, и обсуждению это не подлежало.

Глава 5

СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

Интерференция

Бытовавшая в XVIII веке уверенность в существовании световых частиц была поколеблена в самом начале XIX века. В 1801 году Янг (помните теорию цветового зрения Янга—Гельм-

гольца?) провел эксперимент, который вдохнул новую жизнь в волновую теорию.

Янг пропустил свет сквозь шель на поверхности, в которой были проделаны две близко расположенные прорези. Каждая прорезь стала, таким образом, источником конуса света, и два этих конуса частично перекрыли друг друга, перед тем как попасть на экран.

Если свет состоит из частиц, то область, где два конуса перекрывают друг друга, должна получать частицы из обеих прорезей. Следовательно, концентрация частиц должна в этой области удвоиться и яркость освещения должна быть выше, чем яркости освещения областей, где конусы не перекрывают друг друга. Этого не произошло — область наложения состояла из полос, в которой чередовались яркие и тусклые линии.

Это оказалось препятствием для развития теории световых частиц. Однако с точки зрения волновой теории проблемы не было. В одних точках экранной поверхности свет из двух пучков состоял из волн *в фазе* (т. е. гребень наложился на гребень — см. ч. I). В этом случае два световых пучка влияют друг на друга таким образом, что результирующая волна будет двойной амплитуды и произведет двойную яркость. В других же точках два световых пучка будут *вне фазы* (то есть гребень одной волны будет соответствовать провалу другой). Тогда две волны погасят, по крайней мере частично, друг друга, и амплитуда результирующей волны будет меньше, чем у любой из ее составляющих. Там, где погашение будет полным, волны не будет вообще. В результате мы получим тусклую область.

В общем, если частица, о которых говорил Ньютон, не может воздействовать на другую частицу и погасить ее, то волна вполне может смешиваться с другой волной или гасить другую волну, и без труда делает это. *Интерференцию* можно наблюдать на примере волн в воде, и именно она приводит к эффекту пульсации, например (см. ч. I) в случае звуковых волн. Янг смог продемонстрировать, что волновая теория позволяет рассчитать интерференцию именно так, как ее наблюдали.

Более того, по расстоянию между темными и светлыми полосами интерференции Янг смог высчитать длину световой волны. Если луч света от одного конуса влияет на луч света из второго, усиливая его, то оба луча должны быть в фазе, а это означает, что разница расстояний от точки усиления света на экранной поверхности до одной и другой прорези должна быть кратна длине волны.

Выбирая полосы интерференции, требующие все меньшей разницы расстояний, Янг смог высчитать длину единичной волны и

обнаружил, что это величина порядка одной пяти тысячной дюйма, достаточно малая, чтобы эффект дифракции был труднодоступен для наблюдения (см. гл. 4). Далее, оказалось возможным продемонстрировать, что длина волны красного света оказалась примерно в два раза длиннее фиолетового, что отвечает требованиям волновой теории при объяснении появления спектра.

В метрической системе удобным оказалось измерять длину волны света в миллимикронах, где миллимикрон ($m\mu$) — это одна миллиардная метра (10^{-9} м) или одна десятимиллионная сантиметра (10^{-7} см). В этих единицах спектр простирается от 760 $m\mu$ для самой длинной волны красного цвета до 380 $m\mu$ для самой короткой волны фиолетового цвета. Положение любой линии спектра может быть определено через длину ее волны.

Одним из тех, кто произвел особенно точные измерения длин волн линий спектра, был шведский астроном и физик Андерс Йонас Ангстрем (1814—1874), совершивший это в середине XVIII века. Он использовал единицу измерения в одну десятую миллимикрона. Эту единицу измерения называли *ангстремом* (Å) в его честь. Таким образом, спектр варьируется от 7600 до 3800 Å .

Длина волны для различных цветов примерно (поскольку цвета плавно переходят друг в друга без резких границ) такова: красный — 7600—6300 Å , оранжевый — 6300—5900 Å , желтый — 5900—5600 Å , зеленый — 5600—4900 Å , голубой и синий — 4900—4500 Å , фиолетовый — 4500—3800 Å .

Раскаленный пар натрия дает яркую линию желтого, в то время как поглощение натрия производит темную линию в том же самом месте. Эта линия, которая считалась единой и которая была обозначена Фраунгофером как D, по применению спектроскопов более высокого качества была разделена на две близкие друг к другу линии, D₁ и D₂. Длина волны первой — 5896 Å , последней — 5890 Å . Таким же образом, линии C и F по Фраунгоферу (красный и синий цвета) производятся поглощением водорода и имеют длину волны соответственно 6563 Å и 4861 Å . (Кстати, именно Ангстрем первым показал посредством своих спектральных линий, что в Солнце есть водород.) В результате все линии спектра, производимые любым элементом как через поглощение, так и через испускание, можно точно установить.

Несмотря на всю убедительность (для нас, оглядывающихся назад) эксперимента Янга, волновая теория света тогда не получила признания. Однако на протяжении всего XIX века постоянно появлялись дополнительные свидетельства в пользу световых волн, и различные явления, трудно объяснимые в рамках теории частиц, получали готовое и элегантное решение в рамках волновой теории. Возьмем, к примеру, цвет неба...

Когда свет, до того двигавшийся без помех, встречает на своем пути препятствие, то, что происходит с ним, зависит от размеров препятствия. Если диаметр препятствия более 1000 м μ , то свет поглощается, и световой луч на этом перестает существовать, по крайней мере как свет. Если же диаметр препятствия менее 1 м μ , то свет проходит неизменным. Однако если диаметр препятствия имеет размер от 1 до 1000 м μ , оно может начать вибрировать, поглощая свет, а затем может испустить луч света, равный по частоте (а значит, и по длине волны), первоначальному, но идущий в другом направлении. Это *рассеивание света*.

Мельчайшие частички воды или льда в облаках имеют как раз подходящий размер, чтобы рассеивать свет подобным образом, поэтому небо покрыто облаками белого цвета (или, если облака достаточно густы, чтобы поглощать достаточное количество света, серого).

Пыль, присутствующая в атмосфере, также рассеивает свет. Поэтому тени и не бывают абсолютно черными, а хотя и являются более темными, чем области яркого освещения, но получают достаточно рассеянного света, чтобы можно было читать газету в тени здания или даже внутри здания в пасмурный день.

После захода солнца оно еще светит над горизонтом, освещая верхние слои атмосферы. Рассеиваясь вниз, свет погружает землю в постепенно сгущающиеся *сумерки*. Только после того как солнце погружается на 18° ниже горизонта, можно сказать, что началась полная ночь. Утром рассвету солнца предшествует второй за сутки период сумерек.

По мере уменьшения размеров частиц становится более заметной разница в том, как рассеивается свет в зависимости от длины волны. Свет с короткой длиной волны рассеивается сильнее, чем с длинной. Так, если солнце светит на облако табачного дыма, то сильнее рассеивается свет с короткой волны, и поэтому табачный дым кажется голубым.

Это явление изучал британский физик Джон Тиндаль (1820—1893). Он обнаружил, что свет, проходя через чистую воду или раствор таких маломолекулярных веществ, как соль или сахар, не подвергался рассеиванию. Луч света, двигающийся только вперед, невозможно увидеть со стороны, и жидкость является *оптически чистой*. Однако, если в растворе содержатся частицы достаточно большие для того, чтобы рассеивать свет (например, молекулы протеинов или маленькие конгломераты обычных нерастворимых веществ, таких как золото или оксид железа), часть света излучается в стороны, и тогда луч света можно видеть со стороны. Это явление названо *эффектом Тиндаля*.

Английский физик Джон Уильям Струтт, лорд Рейлиф (1842—1919), глубже проник в суть явления в 1871 году. Он вывел уравнение, показавшее, каким образом количество света, рассеиваемого молекулами газа, изменяется в зависимости от различных факторов, среди которых — длина волны света. Он показал, что количество рассеивания было обратно пропорционально четырехкратной длине волны. Поскольку на красном краю спектра длина волны в два раза больше, чем на фиолетовом, то красные волны и рассеивались меньше (а фиолетовые больше) — с коэффициентом 2, то есть в 16 раз.

На коротких расстояниях рассеивание такими мелкими частицами, как молекулы газа в атмосфере, незначительно. Однако, если брать в расчет мили атмосферы, тянущиеся вдаль, рассеивание увеличивается и, как показал Рейлиф, по большей части представляется фиолетовым краем спектра. Достаточное количество света рассеивается настолько, чтобы забить слабый свет звезд (которые, естественно, днем находятся в небе, так же как и ночью). Более того, рассеянный свет, освещающий небо, по большей мере представленный в области коротких волн, имеет синий цвет; само же солнце, поскольку из его излучения теряется небольшое количество света с короткой длиной волны, представляется несколько краснее, чем оно казалось бы в отсутствие атмосферы.

Когда солнце висит над горизонтом, этот эффект усиливается, потому что солнце светит сквозь более плотный слой воздуха, когда его лучи проходят сквозь атмосферу под углом. Рассеивается достаточно света и из средних слоев спектра, для того чтобы придать небу несколько зеленоватый оттенок, в то время как само солнце, поскольку рассеивается уже значительная пропорция его света, приобретает и в самом деле красный цвет. Когда он отражается от облаков, это выглядит очень красиво.

Поскольку в вечернем небе после дневной деятельности больше пыли, чем в небе утреннем, и поскольку пыль вызывает рассеивание, то закаты бывают более живописны, чем рассветы. После сильных извержений вулканов (например, вулкана Кракауа, который буквально взлетел на воздух в 1883 году) в верхние слои атмосферы было выброшено несчетное количество пыли, и еще долгие месяцы после этого закаты оставались особенно красивыми.

На Луне, лишенной атмосферы, небо черное даже тогда, когда на нем солнце. Тени — черные как смоль, и терминатор — граница между освещенной и теневой поверхностью тела — крайне резка, потому что сумерек здесь не существует. Земля, если на нее

посмотреть из космоса, тоже дает терминатор, но более размытый, имеющий постепенный переход от света к темноте. Более того, сам шар Земли имеет явный голубой цвет благодаря рассеянному в атмосфере свету.

Скорость света

В свое время даже решение вопроса о скорости света в различных средах подтвердило точку зрения Хайгенса, став кульминацией двухвекового спора.

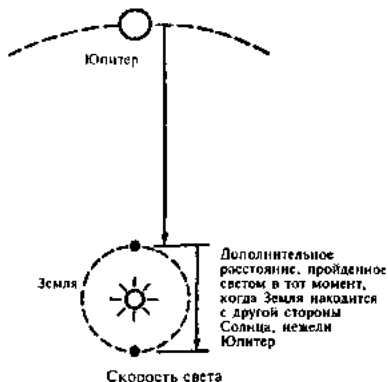
Первая попытка измерить скорость света была предпринята Галилеем примерно за полвека до начала противостояния между волнами и частицами.

Галилей поднимался на вершину холма, а его помощник — на вершину другого холма в полумиле от первого. Галилей планировал ночью зажечь фонарь, а его помощник должен был зажечь свой фонарь в ответ, как только заметит свет от фонаря Галилея. Промежуток времени от зажигания огня Галилеем до появления света от ответного сигнала и должен был примерно соответствовать времени, за которое свет проходит от Галилея до помощника и обратно. Таким же образом в то же время была успешно установлена скорость звука (см. ч. I).

Галилей обнаружил ощутимую разницу во времени между отправлением и получением света; однако для него было очевидно, что разница эта имела место не за счет того, что свету требовалось время на преодоление расстояния, а за счет того, что нервной системе человека требовалось время, чтобы отреагировать на ощущение, потому что в случае, когда между двумя людьми было расстояние в милю, задержка была не больше, чем когда это расстояние составляло шесть футов.

В общем, единственное, что Галилею удалось таким экспериментом доказать, — что свет движется быстрее, чем звук. На самом деле оставалась вероятность, что свет движется с бесконечной скоростью, как всерьез предполагали многие ученые.

Только в 1670 году было предоставлено определенное свидетельство того, что скорость света, хоть и очень высокая, все же конечна. Датский астроном Оле Рёмер (1644—1710) тогда производил доскональное исследование спутников Юпитера (которые открыл Галилей в 1610 году). Орбиты этих спутников были тщательно рассчитаны, и время, в которое каждый спутник должен проходить за Юпитером и для наблюдателя с Земли должен быть закрыт, теоретически могло быть очень точно рассчитано. Однако Рёмер обнаружил, что затмения происхо-



дили не по расписанию — в одних случаях на несколько минут позже, а в других — на несколько минут раньше.

При дальнейшем исследовании он обнаружил, что всякий раз, когда Земля и Юпитер оказывались с одной стороны от Солнца, затмения происходили раньше намеченного; когда же обе планеты были по разные стороны от Солнца, затмения запаздывали.

Представьте себе луч света, идущий от спутника Юпитера к Земле, то есть луч, посредством которого мы и видим спутник. Во время затмения этот пучок перерезается, и мы спутник не видим. По крайней мере, так бы было, если бы скорость света была бесконечной. Когда пучок света перерезан, он при таких условиях перестал бы существовать на всем своем протяжении, независимо от своей длины. Было бы не важно, находится ли Земля с той же стороны от Солнца, что и Юпитер, или с противоположной.

Но если скорость света все же конечна, то луч, будучи оборванным Юпитером, продолжал бы свое движение к Земле; следовательно, наблюдатель на Земле продолжал бы видеть спутник вплоть до того момента, пока его не достиг бы «оборванный конец» луча: тогда, и только тогда спутник исчез бы из вида, и наблюдалось бы затмение. Чем больше расстояние между Юпитером и Землей, тем больше будет этот промежуток.

Если бы расстояние от Земли до Юпитера было все время одним и тем же, этот временной промежуток был бы постоянным и, следовательно, его можно было бы игнорировать. Но расстояние между Землей и Юпитером не постоянно. Когда Юпитер и Земля находятся на одной стороне от Солнца, их разделяют всего 400 000 000 миль. Когда же они находятся по разные стороны, их может разделять то же расстояние плюс полный диаметр орбиты Земли, то есть около 580 000 000 миль.

Если при наибольшем приближении затмение наступает, скажем, на 8 минут раньше, а при наибольшем отдалении — на 8 минут позже, то получается, что на то, чтобы пересечь диаметр земной орбиты, свету требуется примерно 16 минут. Зная диаметр земной орбиты, несложно высчитать скорость света. Ремер так и сделал в 1676 году. С высоты сегодняшних знаний полученное им значение является сильно заниженным. Однако ему удалось доказать, что свет движется со скоростью порядка ста пятидесяти тысяч миль в секунду.

Работа Ремера не была встречена с распростертыми объятиями, но в 1728 году английский астроном Джеймс Брэдли (1693—1762) использовал явление *абберации света* для выполнения схожих расчетов. Предположим, что свет от звезды, находящейся рядом с астрономическим Северным полюсом, вертикально падает на Землю. Однако Земля движется по своей орбите под углом к этому направлению и соответственно навстречу лучу света. Чтобы поймать этот луч, телескоп должен быть несколько наклонен, так же как приходится наклонять зонтик в грозу, чтобы защититься от капель дождя, падающих вертикально вниз, но сносимых ветром.

Телескоп должен быть наклонен таким образом, чтобы точно продолжать направление, по которому движется Земля по своей округлой орбите, поэтому и кажется, что звезда движется в небе по крошечной эллиптической орбите. Размер эллипса зависит от отношения скорости движения Земли к скорости движения света. (Если бы Земля стояла неподвижно или если бы скорость света была бесконечной, эллипс бы не наблюдался.) Поскольку скорость движения Земли вокруг Солнца, как известно, равняется 18,5 мили в секунду, скорость света нетрудно подсчитать. По Брэдли, скорость света равнялась около 190 000 миль в секунду.

Однако только в 1849 году вопрос скорости света спустился с небес на землю. Исследователем, сделавшим это, оказался французский физик Арман Ипполит Луи Физо (1819—1896); он вернулся к принципам Галилея, но попытался устранить элемент человеческой реакции.

В его опыте свет вернулся обратно на вершину его холма с вершины другого, не будучи включенным человеком, а будучи отраженным зеркалом. Более того, испускаемый свет должен был проходить между спицами вращающегося колеса; следовательно, свет был «нарезан» на серию кусочков — получалось что-то вроде пунктирной линии света.

Представим себе поведение такого пунктирного света. Свет движется так быстро, что если бы колесо вращалось с обычной скоростью, то каждый отрезок луча успевал бы долететь до зеркала, отразиться и снова оказаться с первоначальной стороны колеса, прежде чем колесо успело бы сколько-нибудь повернуться. Свет вернулся бы в тот же самый промежуток между спицами, из которого был испущен. Глазу наблюдателя предстал бы настолько часто пульсирующий луч, что он показался бы единым и непрерывным. Более того, свет был бы вполне ярким, потому что почти весь испускаемый свет возвращался бы обратно.

Конечно же последняя часть каждой порции света, часть, которая проскочила между спицами в тот момент, когда спица уже почти перерезала луч, на своем пути обратно наткнется на преграду и будет поглощена. Следовательно, отраженный свет потеряет часть своей силы и будет не таким ярким, каким он был бы, если бы никакого колеса на его пути не было.

Чем быстрее будет вращаться колесо, тем большая доля света будет перекрываться спицами по возвращении и тем тусклее, на взгляд наблюдателя, будет становиться отраженный свет. Наконец, его яркость достигнет минимума, когда свет, выходящий в промежуток между спицами, будет полностью приходится по возвращении на спицу. Но если вращать колесо еще быстрее, то некоторая часть света будет проходить в следующий промежуток, и свет снова будет становиться ярче. В определенный момент весь свет, проходящий через один промежуток, будет возвращаться через следующий, и яркость света вновь достигнет максимума.

Измеряя скорость вращения колеса во время минимума и максимума яркости и зная расстояние от источника света до зеркала, можно было высчитать скорость света. Результаты Физо были не так точны, как результаты того же Брэдли, но Физо спустил измерение на землю, и для его опытов не требовалось участия небесных тел.

У Физо был товарищ по работе, французский физик Жан Бернар Леон Фуко (1819—1868). Он ввел новшество, еще полнее устранившее фактор человеческой ошибки. В устройстве Физо было все еще необходимо выбирать моменты наивысшей

и низшей яркости света. Для этого требовалось суждение человека, а на него нельзя полагаться. Вместо колеса Фуко поставил второе зеркало и заставил его вращаться. Вращающееся зеркало посылало свет на закрепленное зеркало только тогда, когда было повернуто в правильном направлении.

К тому времени, как свет отражался от закрепленного зеркала, вращающееся зеркало немного сдвигалось. Соответственно свет отражался не обратно к закрепленному зеркалу, а под небольшим углом. Этот угол можно было измерить по шкале. Из того, насколько повернулось зеркало, и из расстояния между двумя зеркалами можно было с определенной точностью измерить скорость света, что и было сделано.

И более того, Фуко удалось провести эти измерения и тогда, когда свет проходил под водой, а не в воздухе. Он сделал это в 1850 году и обнаружил, что скорость света в воде была заметно меньше, чем в воздухе. Это вполне соответствовало тому, что предполагал Хайгенс почти два века назад, и противоречило тому, что предполагал Ньютон. Для физиков это стало последним доводом, и больше препятствий для принятия волновой теории света не оставалось.

Скорость света при прохождении его в любой прозрачной среде равна его скорости в вакууме, разделенной на коэффициент преломления (n) среды. Скорость света в вакууме принято обозначать c , от латинского *celeritas*, что означает «скорость». Тогда можно сказать, что:

$$v = \frac{c}{n}. \quad (\text{Уравнение 5.1})$$

Если принять скорость света примерно равной 186 000 миль в секунду, то, поскольку коэффициент преломления воды равен 1,33, скорость света в воде получится равной $186\,000/1,33 = 140\,000$ миль в секунду. Таким же образом, скорость света в стекле с коэффициентом преломления 1,5 равна 124 000 миль в секунду, в то время как в алмазе, коэффициент преломления которого равен 2,42, скорость света падает до 77 000 миль в секунду.

Вещества, у которого коэффициент преломления был бы меньше единицы, пока не обнаружено, и весь предыдущий опыт говорит о том, что такого вещества не существует. Другими словами, в вакууме свет распространяется быстрее, чем в любой материальной среде.

Со времен Фуко в технологию измерения скорости света было внесено много усовершенствований. В 1923 году американский физик Альберт Абрахам Михельсон (1852—1931) применил усо-

вершенствованный аналог установки Фуко и поставил зеркала на расстоянии 22 миль, измерив это расстояние с точностью до дюйма. Еще позже, в 1931 году, он решил устранить помехи, вызываемые воздухом (во-первых, его коэффициент преломления несколько больше 1, а во-вторых, в нем содержится пыль), выкачав воздух из трубы длиной в милю и установив комбинацию из зеркал таким образом, чтобы луч света отражался в одну и в другую сторону, пока не пройдет в вакууме путь длиной в десять миль.

Последние измерения Михельсона свели погрешность измерения скорости света до плюс-минус десяти миль в секунду, но это не удовлетворило физиков. В 1905 году (как мы еще будем иметь возможность удостовериться позднее), скорость света в вакууме была принята за одну из фундаментальных констант Вселенной, поэтому речи не шло ни о какой передышке в процессе установления точной скорости света. После Второй мировой войны были разработаны еще более тонкие способы измерения скорости света, и, наконец, в 1963 году Национальное бюро стандартов приняло следующее значение для c : 186 281,7 мили в секунду.

Для полной точности они приняли это значение в метрической системе, и в ней по любопытному совпадению скорость света оказалась почти круглым числом: 299 792,8 километра в секунду.

Как вы видите, этому значению чуть-чуть не хватает до 300 000 километров в секунду, или 30 000 000 000 сантиметров в секунду. Это последнее значение можно записать как 3×10^{10} см/с.

На этой скорости свет проходит от Луны до Земли за $1\frac{1}{4}$ секунды, а от Солнца до Земли за 8 минут. За год свет проходит 9 450 000 000 000 километров, или 5 900 000 000 000 миль, и это расстояние называется *световой год*.

Световой год стал удобной единицей измерения в астрономии, поскольку все объекты вне нашей Солнечной системы отделены от нас столь большими расстояниями, что меньшие единицы измерения для них не годятся. Ближайшие к нам небесные тела, составляющие систему альфы Центавра, находятся от нас на расстоянии в 4,3 светового года, а диаметр нашей Галактики составляет около 100 000 световых лет.

Эффект Доплера—Физо

Представляя свет как волновое движение, естественно было предположить, что его свойства будут аналогичны свойствам других волн. Австрийский физик Йоганн Кристиан Доплер

(1803—1853) указал, что высота звука изменяется при движении источника звука к слушателю. Когда источник звука приближается к слушателю, звуковые волны сгущаются, и за секунду на ухо попадает больше волн.

Это воспринимается как учащение волн, поэтому звук слышится более высоким, чем если бы его источник находился на фиксированном расстоянии от слушателя. По тем же причинам удаляющийся источник звука издает звук более низкий, и гудок поезда, когда поезд пронесется мимо, внезапно меняет свой тон с высокого на низкий (см. ч. I).

В 1842 году Допплер выяснил, что этот эффект, эффект *Допплера*, справедлив и по отношению к световым волнам. В случае приближающегося источника света волны сгущаются, их частота становится более высокой и свет становится более синим. Если же источник света удаляется, волны растягиваются, их частота становится ниже, так что свет становится более красным¹.

Допплер считал, что все звезды излучают белый свет, более-менее равномерно распределенный по всему спектру. Он полагал, что красноватые звезды красны потому, что отдаляются от нас, а синеватые — наоборот, приближаются к нам. Это предположение, однако, было легко опровергнуто; в его основе лежало заблуждение о том, что видимый нами свет — это весь существующий свет...

Свет так тесно увязан со зрением, что естественно считать, что если мы ничего не видим, то свет отсутствует. Однако свет может присутствовать в форме волн такой длины, к которой сетчатка нечувствительна. Так, в 1800 году британский астроном Уильям Гершель (1738—1822) проверял, каким образом различные участки спектра влияют на термометр. К своему удивлению, он обнаружил, что максимальное повышение температуры наблюдалось при длине волны ниже красного края спектра, когда глаз ничего не мог увидеть.

После признания волновой теории объяснение оказалось простым. Существуют световые волны длиной более 7600 Å. Волны такой длины не воздействуют на глаз и поэтому невидимы; тем не менее они реальны. Свет с такой длиной волны может поглощаться и обращаться в тепло; таким образом его можно обнаружить. Такой свет обычным образом подвергается преломлению, отражению и так далее, только обнаруживается он специальными теплочувствительными приборами, а не гла-

¹ Обратите внимание, что эти изменения не влияют на скорость света. Длина волны может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от того, как движется друг относительно друга источник света и наблюдатель; однако, длинны ли волны или коротки, они все движутся с одной скоростью.

зами. Эти световые волны в том виде, как мы получаем их от Солнца, можно даже разложить на спектр протяженностью от 7600 Å (граница видимой области) до примерно 30 000 Å.

Эта часть спектра носит название «тепловых лучей», потому что была обнаружена по теплу. Однако более правильным является ставшее уже общеизвестным название *инфракрасное излучение* (ниже красного).

Другой край видимого спектра тоже не является краем в полном значении этого слова. Свет влияет на некоторые химикаты, например вызывает распад хлорида серебра, белой составляющей, и приводит к появлению черных пятнышек на металлическом серебре. Соответственно, хлорид серебра быстро чернеет на свету (и это явление лежит в основе фотографии). По причинам, которых не понимали в 1800 году, но которые были уже объяснены к 1900-му, по мере приближения к фиолетовому краю спектра свет сильнее влияет на потемнение хлорида серебра.

В 1801 году немецкий физик Иоганн Вильгельм Риттер (1776—1810) обнаружил, что хлорид серебра темнеет на участке за фиолетовым краем спектра, где никакого света не было видно. Более того, он темнеет быстрее, чем на любом участке видимого спектра.

Так была обнаружена часть спектра, принадлежащая «химическим лучам», или, как их правильнее называть, *ультрафиолетовому излучению* («выше фиолетового»), длина волны которого менее 3600 Å. Даже ранние исследования отодвигали нижнюю границу спектра до 2000 Å, а в XX веке были обнаружены еще более короткие волны.

Итак, в середине XIX века было четко понятно, что солнечный спектр и, по-видимому, спектр других звезд простирается от глубокого ультрафиолетового до глубокого инфракрасного. Относительно небольшой участок посреди спектра (правда, на котором наблюдается максимальная яркость излучения Солнца), выделяющийся лишь тем, что свет с длиной волн, лежащей на этом отрезке, возбуждает сетчатку, на всем протяжении истории человечества и считался «светом». Теперь же его стали обозначать как «видимый свет». То, что до 1800 года было таавтологией, теперь стало осмысленным словосочетанием, поскольку по обе стороны от видимого спектра было обнаружено много невидимого света.

Теперь понятно, почему предположение Допплера было ошибочным. Величина допллеровского сдвига в любой волне зависит от скорости волны в сравнении со скоростью движения друг относительно друга источника волны и наблюдателя. Звезды в нашей Галактике движутся (относительно нас) со скоростями по-

рядка всего лишь десятков километров в секунду, в то время как скорость света — 300 000 километров в секунду. Следовательно, применительно к свету эффект Допплера будет очень невелик. Будет наблюдаться лишь крошечный сдвиг в сторону красного или синего — слишком малый для того, чтобы вызывать синеву или красноту видимого света конкретных звезд. (Эта цветовая разница имеет другие причины, см. гл. 8.)

Более того, если имеется крошечный сдвиг в сторону фиолетового, часть фиолетового на краю спектра конечно же исчезает, уходя в ультрафиолетовый спектр, но это уравнивается тем, что часть инфракрасного спектра смещается в красную часть. В результате цвет звезды вообще не меняется. То же самое происходит и в случае сдвига в красную сторону: часть спектра добавляется в инфракрасную часть и забирается из ультрафиолетовой, но общий видимый цвет звезды не меняется.

Физо указал на это в 1848 году, но добавил, что если обратить внимание на волну одной определенной длины, выбрав ее по присутствию спектральной линии, то можно отметить ее сдвиг либо в сторону красного, либо в сторону фиолетового. Так и оказалось, и, говоря об эффекте Допплера применительно к свету, его иногда называют *эффектом Допплера—Физо*.

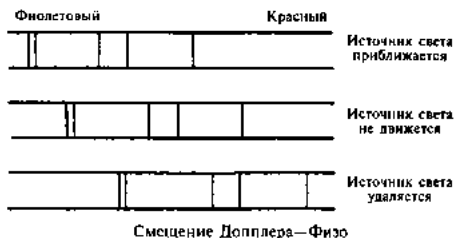
Важные астрономические открытия были сделаны в результате наблюдения перемен в положении известных спектральных линий в спектре небесных тел по сравнению с положением тех же линий, воспроизводимых в лаборатории, где нет никакого относительного движения. Одним изучением спектра, например, можно было доказать вращение Солнца, показав, что одна сторона вращающегося Солнца удалялась, а другая приближалась; об этом свидетельствовало положение линий спектра в свете с одной стороны и с другой. Или опять же свет от колец Сатурна показал, что внешнее кольцо движется настолько медленнее внутреннего, что кольца явно не могут вращаться как единое целое, а должны состоять из отдельных фрагментов.

В 1868 году английский астроном Уильям Хэггинс (1824—1910) изучил линии спектра звезды Сириус и смог показать, что Сириус удаляется от нас со скоростью около 40 километров в секунду (позднейшие исследования несколько уменьшили эту цифру). С тех пор была измерена *радиальная скорость* (скорость удаления от нас или приближения к нам) тысяч звезд, и для большинства звезд она составила от 10 до 40 километров в секунду. Для одних звезд это оказалась скорость приближения, для других — скорость удаления.

В XX веке такие измерения проводились уже для света, идущего к нам из других галактик. Тогда быстро выяснилось, что про-

исходит вселенское отдаление. За исключением двух ближайших к нам галактик, везде наличествовал неизменный сдвиг спектральных линий в сторону красного края — эффект, известный как *красное смещение*. Более того, чем тусклее светит (соответственно, предположительно, чем дальше находится) галактика, тем больше было красное смещение. Эту связь расстояния со скоростью удаления можно ожидать, только если галактики, все до одной, движутся все дальше и дальше друг от друга, как будто вся Вселенная расширяется; именно этой гипотезой и принято обычно объяснять красное смещение.

Поскольку красное смещение возрастает по мере удаления галактики от нас, значит, скорость этого удаления тоже возра-



стает. Для очень удаленных галактик эти скорости уже можно выражать в значительных долях скорости света. В некоторых из удаленных галактик были отмечены скорости до $\frac{1}{5}$ скорости света. В таких условиях есть массивное смещение света в инфракрасный спектр, большее, чем может компенсировать замещение из ультрафиолетового излучения, присутствующего в свете этих галактик. Поэтому общий объем видимого света из этих далеких галактик тусклее и это ставит предел тому, какую часть Вселенной мы можем увидеть в лучах видимого света, какими бы сильными ни были наши телескопы.

Поляризованный свет

Недостаточно просто сказать, что свет состоит из волн, потому что существуют два класса волн, свойства которых сильно различаются. Так, волны на воде — *поперечные волны*, волнообразно

пульсирующие вверх и вниз под правильными углами к направлению, в котором движется сама волна. Звуковые волны — продольные волны, волнообразно пульсирующие вперед и назад в том же самом направлении, в котором движется сама волна (см. ч. I). К какой же разновидности относятся световые волны?

До второго десятилетия XIX века то меньшинство ученых, которые считали свет волновой формой, рассматривали его как продольную волну. В частности, так считал и Хайгенс. Однако оставался еще эксперимент XVII века по свету, который не объяснили удовлетворительно ни ньютоновская теория частиц, ни хайгенсовская теория продольных волн, и это в конце концов изменяло всеобщую точку зрения.

Этот эксперимент был впервые описан в 1669 году голландским физиком Эразмом Бартолином (1625—1698). Он обнаружил, что кристалл исландского шпата (прозрачной формы карбоната кальция) производил двойное изображение. Если, например, кристалл поместить на поверхность, на которой есть черная точка, то сквозь него можно было увидеть две точки. Если кристалл вращать, сохраняя контакт с поверхностью, одна из точек оставалась неподвижной, а то время как вторая начинала вращаться вокруг первой. Очевидно, проходя сквозь кристалл, свет расщеплялся на два луча, преломлявшиеся по-разному. Это явление так и называли «двойное преломление». Луч, воспроизводивший неподвижную точку, Бартолин назвал *ординарным лучом*, второй же — *экстраординарным*.

И Хайгенс и Ньютон принимали во внимание этот эксперимент, но не могли прийти к четкому заключению. Очевидно, если свет преломлен двумя различными способами, его составляющие, будь то частицы или продольные волны, должны чем-то различаться. Но чем?

Ньютон выдвинул какие-то смутные предположения, что частицы света могут различаться между собой полярностью, как магниты (см. гл. 9). Он не стал развивать эту теорию, но сама идея не была забыта.

В 1808 году французский военный инженер Этьен Луи Малюс (1775—1812) экспериментировал с некоторыми кристаллами, дающими двойное преломление. Он поместил один из них на солнечный свет, отраженный от окна, снаружи на некотором расстоянии от комнаты и обнаружил, что вместо того, чтобы увидеть пятно солнечного света раздвоенным (как он ожидал), он увидел его единым. Он решил, что, отражая свет, окно отразило только один «полюс» света, о котором говорил Ньютон. Отраженный свет он назвал *поляризованным светом*. Это было неправильное название, оно не отражало реального поло-

жения вещей, но закрепилось и уже, несомненно, будет сохраняться.

Когда вследствие экспериментов Янга вновь приобрела известность волновая теория света, вскоре стало ясно, что достаточно только признать, что свет имеет форму поперечных, а не продольных волн, и поляризацию света можно без труда объяснить. Янг пришел к этому выводу в 1817 году, а дальше его развил французский физик Огюстен Жан Френель (1788—1827). В 1814 году Френель обнаружил несомненные примеры интерференции и продолжил иметь дело с поперечными волнами, используя подробный математический анализ.

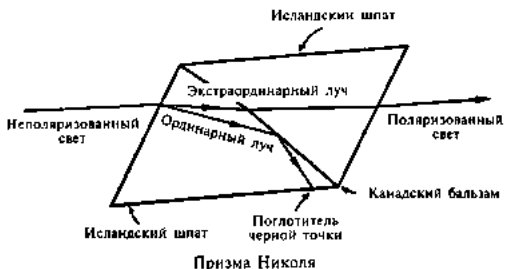
Чтобы понять, как поперечные волны объясняют поляризацию, представьте себе луч света, движущийся от вас, в котором волны пульсируют под правильным углом к линии движения, как и положено поперечным волнам. Допустим, волны света колеблются вверх и вниз. Однако они могут также колебаться вправо и влево, сохраняя при этом правильный угол к линии движения. Они могут даже колебаться по диагонали под любым углом, сохраняя при этом правильный угол к линии движения. Когда составляющие свет волны колеблются во всех возможных направлениях под правильным углом к движению и распределены по всем плоскостям поровну — это *неполяризованный свет*.

Давайте остановим внимание на двух видах колебания — вверх-вниз и влево-вправо. Все колебания, принимающие диагональные положения, можно разделить на вертикальную и горизонтальную составляющие (так же как вектор силы можно разделить на составляющие, между которыми будет прямой угол, см. ч. I). Следовательно, для простоты мы можем представить неполяризованный свет, как состоящий только из вертикальной и горизонтальной составляющих, где интенсивность обеих одинакова.

Возможно, вертикальная составляющая может пройти через прозрачную среду там, где не может пройти горизонтальная. По аналогии, допустим, вы держите конец веревки, вплетенной в изгородь. Если вы пустите по веревке вертикальную волну, она будет ходить вверх-вниз без помех; если же пустите по веревке волну горизонтальную, то волнообразные движения наткнутся на жерди изгороди и будут подавлены.

Способ, которым свет проходит сквозь прозрачное вещество, в таком случае зависит от того, как сформировано это вещество из атомов — другими словами, как ориентированы промежутки между атомами. В большинстве случаев атомы сгруппированы так, что световые волны с любой ориентацией могут без

труда проходить сквозь вещество. Свет входит неполяризованным и выходит наружу неполяризованным. Что же касается исландского шпата, с ним все не так: сквозь него могут проходить только четко вертикально и горизонтально колеблющиеся волны, причем одни из них — с большим трудом, следовательно, сильнее замедляются и сильнее преломляются. В результате из кристалла выходят два луча: один — состоящий только из вертикально колеблющихся волн, а другой — только из горизонтально колеблющихся. Оба луча представляют собой поляризованный свет. Поскольку колебания световых волн в каждом луче происходят только в одной плоскости, такой свет более точно можно назвать *плоскополяризованным*.



Призма Николя

В 1828 году британский физик Уильям Николь (1768—1851) создал устройство, где использовались различные направления, в которых двигались эти плоскополяризованные лучи внутри кристалла исландского шпата. Он начал с ромбоэдрического кристалла вещества (все грани которого имели форму параллелограмма) и разрезал его по диагонали. Две половинки были вновь склеены канадским бальзамом (смолой дерева, именуемого бальзамической пихтой).

Лучи света, попадавшие в кристалл, расщеплялись на два плоскополяризованных луча, движущиеся в несколько различных направлениях. Один луч попадал в слой канадского бальзама под таким углом, что отражался полностью. Отраженный луч попадал на окрашенную часть призмы и поглощался. Второй луч, попадая в слой канадского бальзама под несколько другим углом, передавался, проходил во вторую половину кристалла и вновь попадал в открытый воздух.

Исходящий из такой призмы (*призмы Николя*) свет состоял из одного плоскополяризованного луча, представлявшего примерно половину яркости изначального света.

Предположим, что свет, проходящий через призму Николя, пропускают через вторую призму Николя. Если вторая призма ориентирована так же, как первая, то свет пройдет сквозь нее беспрепятственно. (Как если веревку, по которой пустили волну вверх-вниз, пропустить сначала через одну изгородь, потом через вторую. Ни одна, ни другая не мешает колебаниям.)

Но предположим, что вторую призму Николя повернули под небольшим углом. Поляризованный свет, исходя из первой призмы, не может с полной силой пройти через вторую. Происходит небольшая потеря (как будет и с колебаниями веревки, если жерди второй изгороди будут немного наклонены диагонально).

Количество света, которое пройдет через вторую призму, будет уменьшаться по мере того, как будет возрастать угол ее вращения. Когда, наконец, он дойдет до 90° , свет вообще не будет проходить.

Таким образом, вторую призму можно использовать для точного определения плоскости, по которой поляризован свет, исходящий из первой призмы. Вращая вторую призму и отмечая положение, при котором видимый свет имеет максимальную яркость, можно обнаружить плоскость поляризации. Если света вообще не видно, то плоскость второй призмы находится под прямым углом к плоскости поляризации.

Поскольку трудно с точностью судить о максимуме или минимуме яркости, вторую призму можно сделать таким образом, чтобы она состояла как бы из двух призм под небольшим углом друг к другу. Если одна выровнена верно, другая будет слегка отклонена. Таким образом, глядя в окуляр, можно будет увидеть, что одна половина отчетливо ярче другой. Настроив выравнивание таким образом, чтобы обе половины имели одинаковую яркость, можно найти плоскость поляризации.

Первая призма является инструментом, который производит поляризованный свет, — *поляризатором*. Вторая, определяющая плоскость поляризации, — *анализатор*. Весь прибор в целом — *полярископ*.

Еще до того, как была изобретена призма Николя, французский физик Жан Батист Био (1774—1862) в 1815 году обнаружил, что, когда поляризованный свет движется через растворы некоторых веществ или некоторые прозрачные кристаллы, его плоскость поляризации сдвигается.

Предположим, например, что между двумя призмами полярископа находится цилиндрический сосуд, содержащий воздух, и

что призмы выровнены в том же направлении. Если в сосуд налить воды, ничего не происходит; две половинки поля, видимого в окуляр, остаются одинаково яркими. Плоскость поляризации света не изменилась, пройдя сквозь воду. Если вместо чистой воды в сосуд поместить раствор сахара, то две половинки, видимые в окуляр, будут иметь различную яркость. Чтобы они вновь стали одинаково яркими, анализатор придется повернуть на определенный угол. Этот угол покажет, насколько раствор сахара повернет плоскость поляризации света.

Размер этого угла зависит от различных факторов: от концентрации раствора и природы растворенного вещества; от расстояния, проходящего светом в этом растворе; от длины волны света; от температуры раствора. Если стандартизировать эти факторы и посмотреть или подсчитать, какой угол вращения будет иметь свет с длиной волны, которую производит натриевая лампа, проходя один дециметр раствора, содержащего 1 г/см³ при температуре 20 °С, то мы получим *удельное вращение*.

Значение удельного вращения характеризует любую прозрачную систему. Для многих систем оно равно 0°, то есть плоскость поляризованного света вообще не поворачивается. Такие системы называются *оптически неактивными*. Системы, которые поворачивают плоскость поляризованного света, называются *оптически активными*.

Некоторые оптически активные системы вращают плоскость поляризованного света по часовой стрелке. Это описывается как *правостороннее вращение*, и такие системы — *правосторонние*. Другие же вращают свет против часовой стрелки и являются *левосторонними*.

В 1848 году французский химик Луи Пастер (1822—1895) смог продемонстрировать, что оптическая активность прозрачных кристаллов зависит от асимметричности таких кристаллов. Далее, если таким асимметричным кристаллам придать форму двух зеркал, одно будет правосторонним, а другое — левосторонним. Тот факт, что определенные растворы также были оптически активными, не позволял предположить, что асимметрия должна присутствовать в самих молекулах этих веществ. В 1974 году голландский физик и химик Якоб Ван Гофф (1852—1911) представил теорию молекулярной структуры, которая рассчитывала такую асимметрию в оптически активных средах. Обсуждение этого, однако, более уместно в учебнике химии, и я не буду здесь углубляться в эту тему.

Призмы Николя не только являются приборами для формирования плоскополяризованного света. Есть некоторые типы кристаллов, которые не просто расщепляют свет на два плос-

кополяризованных луча, а поглощают один и передают другой. Кристаллы сульфата йодохинина ведут себя именно так. К сожалению, невозможно создать большие полезные кристаллы из этого материала, потому что они получаются хрупкими и разрушаются при малейшем воздействии.

Однако в середине 1930-х годов студент Гарварда Эввин Герберт Ленд (р. 1909) сообразил, что большие цельные кристаллы использовать не обязательно. Крошечные кристаллы, все соразмеренные в одном и том же направлении, вполне могут быть использованы для этих же целей. Чтобы поддерживать их ориентацию и удерживать от дальнейшего разрушения, их следует включить в лист прозрачной гибкой пластмассы. Ленд закончил колледж в 1936 году, ушел в бизнес и создал то, что сейчас называют *поляроидом*. Он может выполнять все функции призм Николя более экономичным и удобным образом (правда, не столь точным).

Как обнаружил Малюс, лучи поляризованного света могут также быть произведены отражением под определенным верным углом от такого материала, как стекло; точный размер угла зависит от коэффициента преломления вещества. Солнечные очки, сделанные из поляроида, могут блокировать большую часть отраженного поляризованного света и урезать блеск.

Так, XIX век описал свет не просто как волну, а как поперечную волну; это решило много проблем, но и поставило некоторые проблемы.

Глава 6

ЭФИР

Абсолютное движение

Если свет — это форма волны, то большинству ученых вплоть до начала XX века казалось логичным, что что-то должно колебаться, передавать эту волну. В случае волн на воде, к примеру, вверх и вниз движутся молекулы воды; в случае звуковых волн вперед и назад двигаются атомы или молекулы окружающей среды. Соответственно, казалось, что в вакууме должно что-то существовать, что-то, что двигалось бы вверх и вниз или вперед и назад, чтобы проводить волны света.

Это что-то не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на движение небесных тел, поэтому логично было предположить, что это чрезвычайно разреженный газ. Этот чрезвычайно разреженный газ (или нечто иное, что заполняет вакуум)

получил название «эфир», от слова, которое использовал Аристотель для описания вещества, из которого состоят небеса и небесные тела (см. ч. I). Эфир может быть также средой, в которой передается сила гравитации, и может быть идентичен эфиру, который проводит (или не проводит) свет. Для того чтобы выделить эфир, именно проводящий свет (на случай, если существуют несколько разновидностей эфира), в XIX веке было введено популярное словосочетание «люминофорный (что означает «светоносный») эфир».

Когда мы начинаем говорить об эфире, разница в свойствах между поперечными и продольными волнами становится важной. Продольные волны могут передаваться в среде, находящейся в любом состоянии — твердом, жидком или газообразном. Поперечные же волны могут передаваться только в твердых телах или при наличии гравитационного поля по поверхностям жидкостей (см. ч. I). Поперечные волны не могут проходить через массу газа или жидкости. Именно по этой причине в ранних версиях волновой теории света, в соответствии с которыми эфир считался газом, также считалось, что свет состоит из продольных волн, которые могут проходить через газ, а не из поперечных, которые не могут.

Однако когда вопрос о поляризации, казалось, твердо установил тот факт, что свет состоит из поперечных волн, концепцию эфира пришлось кардинально пересмотреть. Для того чтобы пропускать поперечные сисловые волны, эфир должен быть твердым телом; он должен быть веществом, все частицы которого жестко закреплены на своем месте.

Если бы это было так, то, когда участок эфира подвергался бы искажению под правильным углом по направлению от движения светового луча (как требовалось бы, если бы свет являлся поперечно-волновым явлением), силы, держащие этот участок на месте, толкнули бы его обратно. Этот участок пролетел бы свое прежнее место, его бы толкнуло назад, он бы снова пролетел свое законное место и т. д. (Именно так происходит в случае волн на воде, когда гравитация является той силой, которая обеспечивает толкание взад-вперед, а в случае звуковых волн эту работу проделывают межмолекулярные силы.)

Так, колебания эфира вверх-вниз и создают световую волну. Более того, скорость, с которой поперечная волна проходит сквозь среду, зависит от размера силы, толкающей обратно сдвинутую область. Чем больше сила, тем быстрее толчок обратно, тем быстрее движется волна. В случае света, движущегося со скоростью 126 000 миль в секунду, обратный толчок должен быть действительно сильным, и сила, удерживающая

каждую часть эфира на месте, должна быть гораздо жестче, чем сталь.

Следовательно, светonosный эфир должен быть одновременно и чрезвычайно разреженным газом, и иметь жесткость выше, чем сталь. Такую комбинацию сложно представить¹, но в середине XIX века физики упорно работали, чтобы создать последовательную модель такого «твердого газа» и обнаружить его наличие. Они делали это по двум причинам. Во-первых, они не видели альтернативы, раз свет состоит из поперечных волн. Во-вторых, эфир был нужен им в качестве точки отсчета для измерения движения. Эта вторая причина чрезвычайно важна, потому что в отсутствие такой точки отсчета сама идея движения теряет четкость и все физические построения XIX века становятся зыбкими.

Чтобы объяснить, почему это происходит, давайте предположим, что вы находитесь на поезде, движущемся с постоянной скоростью по абсолютно прямым рельсам без вибрации. Обычно вы можете сказать, едет поезд или стоит, по наличию вибрации или по воздействию инерции, когда поезд ускоряется, тормозит или поворачивает. Однако, если поезд движется равномерно и без вибрации, все эти факторы устранимы и обычные методы определения наличия движения становятся бесполезными.

Теперь представим, что в поезде есть окно, в которое вы видите другой поезд на соседних рельсах. В другом поезде тоже есть окно, и в него кто-то на вас смотрит. На языке жестов он спрашивает вас: «Мой поезд движется?» Вы смотрите на него, ясно видите, что он не движется, и отвечаете: «Нет, он стоит на месте». Тогда он выпрыгивает и разбивается насмерть, потому что оказывается, что оба поезда движутся в одном и том же направлении со скоростью 70 миль в час по отношению к поверхности Земли.

Поскольку оба поезда движутся в одном и том же направлении на одной и той же скорости, они не меняют положения по отношению друг к другу, и каждый кажется неподвижным наблюдателю из другого. Если бы в каждом из поездов было по окну с другой стороны, можно было бы посмотреть на пейзаж

¹ Такое сочетание противоречит «здравому смыслу», но такие соображения не должны стоять на пути принятия гипотезы. Мы воспринимаем своими чувствами очень ограниченную часть Вселенной, и наш опыт ограничивается очень узкой группой явлений. Поэтому опасно предполагать, что то, что кажется нам знакомым, должно быть истинным для всей Вселенной во всех своих аспектах. Например, в соответствии со «здравым смыслом» следует полагать, что Земля плоская и недвижная, и этот аргумент усиленно использовался для того, чтобы оспаривать представление о Земле как о сферической и движущейся.

и увидеть, что он несется навстречу поезду. Поскольку мы автоматически признаем, что пейзаж не движется, мы делаем очевидный вывод, что на самом деле движется поезд, несмотря на то что кажется, что это не так.

Опять же предположим, что, наблюдая второй поезд, вы замечаете, что он движется назад со скоростью две мили в час. Вы сообщаете эту информацию человеку из другого поезда. Он резко возражает. Он настаивает на том, что он стоит на месте, а вы движетесь вперед со скоростью две мили в час. Кто из вас прав?

Чтобы принять решение, надо свериться с окружающим пейзажем. Тогда может оказаться, что поезд А не движется, а поезд В действительно движется вперед со скоростью две мили в час. Или что поезд В не движется, а поезд А движется со скоростью две мили в час. Или что поезд А движется вперед со скоростью одна миля в час, а поезд В движется назад со скоростью одна миля в час. Или что оба поезда движутся вперед: поезд А со скоростью 70 миль в час, а поезд В — со скоростью 68 миль в час. Количество возможных вариантов по отношению к поверхности Земли бесконечно, и все они могут соответствовать наблюдаемому движению поезда А и поезда В относительно друг друга.

Имея обширный опыт передвижения на поездах, люди научились не придавать большого значения движению поездов относительно друг друга. Только движение поездов относительно поверхности Земли принято считать «настоящим»

Но так ли это? Предположим, что человек в поезде, мягко едущем по прямому участку рельсов со скоростью 70 миль в час, роняет монету. Он видит, как монета падает по прямой на пол поезда. Человек, стоящий в стороне от дороги и выходящий, как поезд проезжает и как падает монета, увидит, что монета проделывает движение двух видов: она падает вниз с увеличивающейся скоростью из-за силы гравитации и одновременно вместе с поездом движется вперед. Общее воздействие двух видов движения сказывается в том, что монета движется по параболе (см. ч. I).

Мы делаем вывод, что монета движется по прямой по отношению к поезду и по параболе по отношению к Земле. Так какое же движение истинно? По параболе? Человек в поезде, уронивший монету, может быть готов поверить, что, хотя ему и кажется, что он стоит на месте, «на самом деле» он движется со скоростью 70 миль в час. Но он будет не совсем готов поверить, что монета, которую он видит движущейся по прямой, «на самом деле» движется по параболе.

Это очень важный момент в научной философии. Первый закон движения Ньютона (см. ч. I) утверждает, что предмет, к

которому не прилагается внешних усилий, движется по прямой с постоянной скоростью. Однако то, что кажется прямой линией одному наблюдателю, не обязательно покажется прямой линией другому. В этом случае, что же означает первый закон Ньютона? Что такое прямолинейное движение, как таковое?

В древности и Средневековье почти все ученые считали, что Земля расположена в центре Вселенной и никогда не сдвигалась с этого места. Тогда Земля действительно не двигалась с места. Она находилась (как считалось) в состоянии *абсолютного покоя*. Любое движение могло измеряться по отношению к такой точке абсолютного покоя. Это *абсолютное движение* было бы «истинным» движением, с которым согласились бы все наблюдатели. Разница между любым наблюдаемым движением и абсолютным движением простекала из абсолютного движения наблюдателя.

Конечно, вопросы о том, действительно ли Земля неподвижна, поднимались даже в древности. Звезды, казалось, движутся вокруг Земли за 24 часа с постоянной скоростью. Стоит ли Земля на месте, а небесная сфера вращается, или, наоборот, небесная сфера стоит на месте, а Земля вращается? Проблема выглядела так же, как и вопрос о двух поездах, движущихся относительно друг друга, где проверить «реальность» движения невозможно, не поглядев на пейзаж. Когда же речь шла о Земле и небесной сфере, не было никакого пейзажа, к которому можно было бы обратиться, чтобы быстро принять решение, с которым все бы согласились.

Большинство людей считали, что вращалась именно небесная сфера, потому что в это легче поверить, чем в то, что это огромная Земля вращается, да так, что мы не можем этого почувствовать. (Мы все еще говорим о Солнце, Луне, планетах и звездах, что они «восходят» и «сходятся».) Однако в современности по ряду причин, описание которых уместно скорее в учебнике по астрономии, стало более удобным полагать, что Земля вращается, чем что она стоит на месте.

В таком случае если Земля как целое не находится в абсолютном покое, то, может быть, не движется ее ось? Однако к началу Нового времени все больше и больше астрономов приходили к уверенности, что даже ось Земли не неподвижна. Земля — вся, целиком — носится как угорелая вокруг Солнца вместе с другими планетами. Ни одна часть ее не находится в большем покое, чем любой поезд, мчащийся по ее поверхности. Поезд может двигаться равномерно по отношению к поверхности Земли, но это не будет «истинное» движение поезда.

Пару веков после того, как было признано движение Земли, еще оставалась возможность верить в то, что центром Вселен-

ной может быть Солнце. Оно очевидно вращалось, потому что пятна на его поверхности двигались по кругу с периодом около 27 дней. Однако ось Солнца все еще могла находиться в том самом вожделенном состоянии абсолютного покоя.

К сожалению, становилось все яснее по мере приближения XIX века, что Солнце — лишь звезда среди прочих и что оно движется среди звезд. На самом деле сейчас мы знаем, что так же, как Земля движется вокруг Солнца с периодом в один год, Солнце движется вокруг центра нашей Галактики с периодом в 200 000 000 лет. И разумеется, наша Галактика — лишь одна среди прочих галактик и, должно быть, движется по отношению к другим.

К середине XIX века появилась серьезная причина полагать, что ни один материальный объект где-либо во Вселенной не представлял собой состояния абсолютного покоя и что абсолютное движение поэтому не может быть измеренным ни для одного материального объекта. Это могло привести к ужасному сомнению в применимости ко Вселенной законов Ньютона, на которых была основана вся физика XIX века. Однако не обязательно иметь материальный объект для установления абсолютного движения.

Физикам XIX века казалось, что если пространство заполнено эфиром, то логично было бы предположить, что этот эфир служит только для передачи сил, таких как сила притяжения, и сам по себе вообще не подвергается их воздействию. В таком случае его невозможно вовлечь в движение. Он может колебаться туда-сюда, как при передаче световых волн, но в целом двигаться не будет. В таком случае эфир следует рассматривать находящимся в абсолютном покое. Все движение становилось абсолютным движением, если измерять его по отношению к эфиру. Это пространство, заполненное эфиром, одно и то же для всех наблюдателей, отстраненное, неизменное, недвижимое, пересекаемое телами и силами, не подвергаясь их воздействию, пассивноеместилище материи и энергии и есть *абсолютное пространство*.

Во времена Ньютона и еще два столетия спустя не было способа измерить движение какого-либо материального тела по отношению к эфиру. Однако это не имело значения. В принципе абсолютное движение считалось существующим вне зависимости от того, можно ли было его измерить или нет, и законы движения принято было считать действительными в рамках этого абсолютного движения, а следовательно, они должны действовать и на все виды относительного движения (которые являлись не более чем суммой двух абсолютных движений).

Эксперимент Михельсона—Морли

В 80-х годах XIX века Михельсону (тому самому, который позже измерил скорость света) пришло в голову, что можно придумать способ измерения абсолютного движения.

Точка зрения того времени гласила, что свет состоит из эфирных волн, и, если бы эфир двигался, он мог бы нести собственные вибрации (свет) с собой. Если бы эфир двигался по направлению от нас, он уносил бы от нас свет и, следовательно, задерживал бы свет, иначе говоря, уменьшал бы скорость света. Если бы эфир двигался от нас со скоростью в два раза меньшей скорости света, свет потерял бы половину своей скорости по отношению к нам и соответственно в два раза дольше добирался бы к нам из некоей фиксированной точки. Таким же образом, если бы эфир двигался по направлению к нам, он бы достигал нас быстрее.

Точнее, физики считали, что эфир сам по себе не движется ни при каких обстоятельствах. Однако Земля должна, казалось, неизбежно двигаться по отношению к эфиру. В том случае, если принять Землю как неподвижную, эфир будет казаться движущимся по отношению к нам, поскольку мы закреплены на Земле. Тогда проявлялось бы то, что получило название «эфирный ветер».

Если бы эфирного ветра не существовало, если бы Земля находилась в абсолютном покое, тогда свет двигался бы во все стороны с одной и той же скоростью. Кажется, что так оно и есть, но, скорее всего, это так только потому, что скорость эфирного ветра слишком мала по сравнению со скоростью света; следовательно, свет очень незначительно меняет свою скорость с переменной направления. Учитывая, что точное измерение скорости света представляло собой на тот момент очень сложную задачу, неудивительно, что небольшая разница в скорости оставалась незамеченной.

Однако в 1881 году Михельсон изобрел устройство, достаточно тонкое, чтобы произвести эту работу.

В этом приборе свет с определенной длиной волны падал на стеклянную плоскость под углом 45° . Задняя поверхность стекла была «полупосеребрянной», то есть поверхность была покрыта достаточным слоем серебра, чтобы отражать половину света, а другую половину пропускать. Пропущенный свет продолжал движение в том же направлении, а отраженный двигался под прямым углом к этому направлению. Оба световых луча отражались зеркалом и возвращались обратно на полупосеребрянную стеклянную плоскость. Часть изначально отраженного луча лучей те-

перь проходила насквозь, а часть изначально пропускаемого пучка теперь отражалась. Таким образом, оба луча воссоединялись¹. В результате единый луч света разбивался надвое: две половинки отсылались в направлениях перпендикулярных друг другу, вращались и вновь соединялись в один луч.

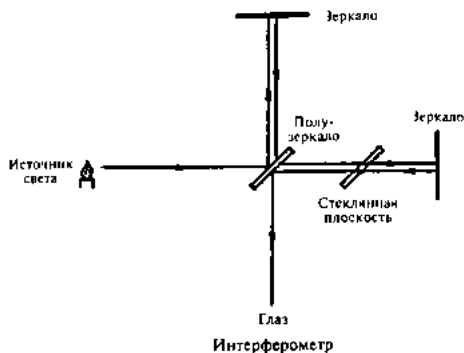
Соединяясь, два луча производили линии интерференции, как это происходило с двумя лучами из эксперимента Янга. Одно из зеркал могло быть так настроено, что расстояние, пройденное лучом до этого зеркала и обратно, могло изменяться. Когда зеркало настроено, линии интерференции двигаются. По количеству линий, проходящих перед взглядом, когда зеркало перемещается на определенное расстояние, можно определить длину волны света. Чем большее количество зубцов проходит перед взглядом, тем короче длина волны.

Михельсон определял длину волны света своим инструментом, который он называл *интерферометром* («измерителем по интерференции»), настолько точно, что он предположил, что длина волны некоторых определенных спектральных линий может служить фундаментальной единицей измерения длины. В то время за такую фундаментальную единицу измерения был только что принят международный эталон метра. Это было расстояние между двумя тонкими отметками на брусе из платиново-иридиевого сплава, хранимого в Севре, пригороде Парижа.

В 1960 году предложение Михельсона было в конце концов одобрено и за фундаментальную единицу измерения длины было принято явление природы, а не рукотворный предмет. Оранжево-красная спектральная линия разновидности редкого газа криптона была принята за стандарт. Сейчас метр официально установлен как величина в 1 650 763,73 раза больше волны этого света.

Но Михельсон желал большего, чем установление длины волны спектральных линий. Он признавал тот факт, что пучок света в интерферометре был расщеплен на две половины, которые двигались под прямым углом друг к другу. Предположим, что один из этих двух лучей идет по эфирному ветру. Тогда его скорость будет равной c (скорость света по отношению к эфиру) плюс v (скорость источника света по отношению к эфиру).

¹ Пропущенный свет движется наружу сначала сквозь стеклянную плоскость. По возвращении он попадает на слой серебра и отражается, не входя в стекло. Отраженный же свет сначала проходит через стекло, прежде чем войти до слоя серебра, отразившись, снова проходит сквозь стекло и третий раз делает это на пути обратно. Поэтому на пути пропускаемого света ставилась вторая стеклянная плоскость, идентичная первой. Он должен был проходить сквозь нее на пути туда и обратно, и таким образом каждый луч света проходил через одинаковую толщину стекла. Михельсон очень старался, чтобы оба луча находились в одинаковых условиях.



Если расстояние от отражающего зеркала до полупросеребрянной призмы принять за d , то время, которое понадобится свету, чтобы преодолеть расстояние от полупросеребрянной призмы до отражающего зеркала, будет равно $d/(c + v)$. После отражения свет вновь преодолевает расстояние d точно в обратном направлении. Теперь он будет двигаться против эфирного ветра и будет замедлен, его полная скорость будет равна $c - v$, а время, требующееся ему для того, чтобы вернуться, будет $d/(c - v)$. В результате время, которое потребуется лучу на то, чтобы пройти туда и обратно, будет вычисляться по формуле:

$$t_1 = \frac{d}{c + v} + \frac{d}{c - v} = \frac{2dc}{c^2 - v^2}. \quad (\text{Уравнение 6.1})$$

Однако в то же время вторая половина луча движется под прямым углом к первой; возвращается она также под прямым углом к первой. Она не движется ни по эфирному ветру, ни против него. И туда и обратно этот второй луч движется «поперек ветра».

Время, которое потребуется лучу света на то, чтобы преодолеть путь туда и обратно (t_2), может быть вычислено с помощью плоскостной геометрии¹ и оказывается равным:

¹ Тот, кому будут любопытны подробности этих вычислений, может обратиться к с. 807–810 моей книги «The New Intelligent Man's Guide Science», Basic Book, 1965.

$$t_1 = \frac{2d}{\sqrt{c^2 + v^2}}. \quad (\text{Уравнение 6.2})$$

Поделив уравнение 6.1 на уравнение 6.2, мы найдем отношение времени, которое требуется на преодоление расстояния по эфирному ветру и против него, ко времени, которое требуется на преодоление того же расстояния поперек эфирного ветра. Мы получим:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{2dc}{c^2 - v^2} + \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{c\sqrt{c^2 - v^2}}{c^2 - v^2}. \quad (\text{Уравнение 6.3})$$

Выражение в самой правой части уравнения 6.3 принадлежит известной формуле $a\sqrt{x}/x$, и если и числитель и знаменатель разделить на \sqrt{x} , то получим эквивалентное выражение a/\sqrt{x} . Соответственно уравнение 6.3 можно упростить до:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}. \quad (\text{Уравнение 6.4})$$

Дальнейшее упрощение возможно в случае умножения и числителя и знаменателя на $\sqrt{1/c^2}$ (умножение числителя и знаменателя на одно и то же число, естественно, не меняет значения всего выражения). Тогда числитель уравнения 6.4 становится равным $c\sqrt{1/c^2} = c/c = 1$. Знаменатель же становится равным $\sqrt{c^2/c^2 - v^2/c^2}$. Соответственно уравнение 6.4 может быть записано в виде:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (\text{Уравнение 6.5})$$

Если источник света неподвижен по отношению к эфиру, то $v = 0$ и $t_1/t_2 = 1$. В таком случае время, затраченное лучом света, движущимся по эфирному ветру и против него, будет таким же, как и время, затраченное лучом света, движущимся поперек эфирного ветра. (На самом деле это время одно и то же для лучей света, движущихся во всех направлениях.) Если движущееся зеркало настроено таким образом, чтобы два луча света

проходили в точности одно и то же расстояние, вернутся они точно одновременно, и линий интерференции не возникнет. Более того, не будет возникать линий интерференции и при повороте прибора таким образом, чтобы лучи света двигались в других направлениях.

Однако, если по отношению к эфиру свет движется, то v больше чем 0, следовательно, $1 - v^2/c^2$ меньше единицы и t_1/t_2 больше единицы. Свет, движущийся по эфирному ветру и против него, будет дольше преодолевать определенное расстояние, чем свет, движущийся поперек него. На самом деле это отношение не намного больше единицы для любой разумной скорости по отношению к эфиру. Даже если источник света движется со скоростью 0,1 скорости света (так, что v равно огромной цифре в 30 000 км/с), это отношение будет составлять всего 1,005. Для обычных же скоростей это отношение будет совсем мало.

Тем не менее разница во времени была бы достаточной, чтобы разделить два луча света и привести к появлению линий интерференции. Естественно, невозможно было заранее знать направление эфирного ветра, но это не имело значения. Прибор можно было повернуть в любом направлении, и передвижное зеркало могло быть настроено таким образом, чтобы устранять линии интерференции. Если прибор повернуть теперь, то лучи света поменяли бы направление и теперь испытывали бы другое воздействие со стороны эфирного ветра, так что линии интерференции появились бы вновь.

По расстоянию между линиями можно было определить скорость источника света по отношению к эфиру. Поскольку источник света был жестко закреплен на Земле, это означало определить скорость Земли по отношению к эфиру, то есть установить абсолютное движение Земли. Если бы это было сделано, то можно было бы установить абсолютное движение всех тел, зная их движение по отношению к Земле.

С помощью американского химика Эдварда Уильямса Морли (1838—1923) Михельсон в 1886 году провел свой эксперимент. Он проводил его и до того, один, но ни разу не делал этого в условиях, которые бы его удовлетворяли. Теперь же он и Морли доскональнейшим образом закрепили интерферометр и применили фантастические предосторожности против возможных ошибок.

Снова и снова они повторяли свой эксперимент, и результаты оказывались одними и теми же — негативными! Когда они настраивали прибор, чтобы удалить линии интерференции, они не расширялись сколько-нибудь заметным образом при любых

поворотах интерферометра. Можно было подумать, что им не повезло и для проведения эксперимента они выбрали момент, когда Земля не двигалась относительно эфира. Однако Земля движется по эллиптической орбите вокруг Солнца и ежемоментно меняет направление своего движения. Если в один день она оказалась неподвижной относительно эфира, то в следующий день она должна была двигаться.

Михельсон и Морли провели тысячи наблюдений в течение многих месяцев и наконец в июле 1887 года объявили свое заключение. Никакого эфирного ветра не было!

Я углубился в детали этого эксперимента из-за его шокирующего результата. Заявить об отсутствии эфира означало заявить о том, что, скорее всего, не существует способа установить абсолютное движение. А если это так, что станет с законами Ньютона и со всей картиной Вселенной, основанной на этих законах?

Физикам принесло бы облегчение извещение о том, что в эксперименте Михельсона—Морли были погрешности и эфирный ветер, несмотря ни на что, существует. Однако этот эксперимент повторялся снова и снова с 1887 года. В 1960 году для этой цели были использованы гораздо более точные приборы, чем интерферометр, но результат оставался прежним. Эфирного ветра не существует. Этот факт оставалось просто принять и изменить соответствующим образом картину Вселенной.

Сокращение Фитцджеральда

Естественно, предпринимались попытки объяснить результаты эксперимента Михельсона—Морли в рамках теории эфира. Наиболее успешная попытка принадлежала ирландскому физiku Джорджу Франсису Фитцджеральду (1851—1901), который в 1893 году предположил, что все предметы укорачиваются в направлении своего абсолютного движения, так сказать сплющиваясь под воздействием эфирного ветра. Размер такого «укорачивания» будет возрастать вместе со скоростью абсолютного движения, поскольку давление эфирного ветра тоже будет возрастать.

Фитцджеральд предположил, что для любой заданной скорости длина (L) предмета или расстояния между предметами будет фиксированным образом относиться к длине L_0 того же самого предмета или расстояния в состоянии покоя; L_0 можно назвать длиной покоя. Это отношение выражается формулой $\sqrt{1 - v^2/c^2}$, где c — скорость света в вакууме, v — скорость тела, и то и другое — по отношению к эфиру. Другими словами,

$$L = L_0 \sqrt{1^2 - v^2 / c^2}. \quad (\text{Уравнение 6.6})$$

Коэффициент Фитцджеральда равен знаменателю выражения из уравнения 6.5, которое представляет отношение расстояний, проходимых двумя лучами в интерферометре. Будучи умноженным на коэффициент Фитцджеральда, значение уравнения 6.5 становится равным 1.

Расстояние, проходимое лучом света, движущимся по эфирному ветру и против него, теперь уменьшается ровно на такую длину, которую луч проходит за то же время, за которое и луч, движущийся поперек эфирного ветра. Другими словами, существование эфирного ветра заставит один луч тратить большее время, но существование сокращения Фитцджеральда, источником которого является тот же самый эфир, позволяет лучу совершить свой путь за то же самое время, которое требовалось бы ему, если бы никакого эфирного ветра не существовало.

Эти два эффекта эфирного ветра взаимно аннулируют друг друга, и это напомнило физикам отрывок из стихотворения Льюиса Кэрролла, герой которого собирался покрасить усы в зеленый цвет и прикрыть их большим веером, чтобы никто этого не увидел.

Книга Кэрролла была написана в 1872 году, поэтому вряд ли он имел в виду сокращение Фитцджеральда, но описано оно здесь один к одному.

На обычных скоростях это сокращение чрезвычайно мало. Земля движется по своей орбите вокруг Солнца со скоростью 30 километров в секунду (по отношению к Солнцу), что по земным стандартам является немалой скоростью. Если у принять равным 30 и подставить это значение в уравнение Фитцджеральда, мы получим $\sqrt{1 - 30^2 / 300\,000^2}$, что равняется 0,999995. В таком случае сокращенный диаметр Земли будет равен 0,999995 от ее диаметра, перпендикулярного этому направлению (если, конечно, принять Землю за идеальную сферу). Величина этого сокращения составит 62,5 метра.

Если измерить диаметр Земли по всем направлениям и установить то направление, в котором ее диаметр сокращен, можно будет установить направление движения Земли по отношению к эфиру. Более того, исходя из величины этого сокращения можно вычислить абсолютную скорость Земли по отношению к эфиру.

Но есть затруднение. Оно заключается не в малой величине сокращения, поскольку не важно, насколько оно мало, если его

можно обнаружить в принципе. Дело в том, что его нельзя обнаружить, находясь на Земле. Когда мы находимся на Земле, все инструменты, которые мы могли бы использовать для измерения диаметра Земли, находятся в том же движении, что и Земля, и подвергаются тому же сокращению. Сокращенный диаметр измерялся бы сокращенными инструментами, и сокращение не было бы обнаружено.

У нас могло бы что-нибудь получиться, если бы мы сошли с Земли и, не разделяя ее движения, измерили бы ее диаметр по всем направлениям (очень точно), пока она пролетала мимо. Это не очень реально, но только так это было бы выполнимо.

Чтобы сделать это на практике, надо найти что-то, что двигалось бы очень быстро, и при этом чтобы мы не разделяли этого движения. В качестве таких объектов подошли бы субатомные частицы¹, имеющие скорость относительно поверхности Земли от 10 000 км/с до скоростей, близких к световым.

Сокращение Фитцджеральда на таких скоростях становится очень значительным. Например, скорость может быть достаточно высокой, чтобы длина движущегося тела сократилась вдвое. В этом случае $\sqrt{1^2 - v^2/c^2} = 1/2$, и если мы решим это уравнение для v , то получим его равным $\sqrt{3}c^2/4$. Поскольку $c = 300\ 000$ км/с, то $\sqrt{3}c^2/4 = 260\ 000$ км/с. На этой огромной скорости, в $2/3$ света, предмет сокращается до половины своей длины, а некоторые субатомные частицы движутся еще быстрее.

На еще более высоких скоростях сокращение становится еще более заметным. Предположим, что скорость тела становится равной скорости света. При таких условиях v равно c , и коэффициент Фитцджеральда принимает значение $\sqrt{1^2 - c^2/c^2}$, что равняется 0. Это означает, что по уравнению 6.6 длина движущегося тела (L) становится равной его длине покоя (L_0), умноженной на нуль. Другими словами, на скорости света все тела вне зависимости от их длины покоя сокращаются совершенно и становятся бесконечно тонкими блинами.

Но что, если скорость света будет превышена? В этом случае v становится больше, чем c , выражение v^2/c^2 становится больше 1 и выражение $1 - v^2/c^2$ становится отрицательным числом. Пропорция Фитцджеральда становится квадратным корнем из отрицательного числа, а это то, что математики именуют «мнимым числом». Длина, представляемая мнимым числом,

¹ Эти частицы гораздо меньше, чем атомы, и из них атомы состоят. О них мы поговорим подробнее в III части этой книги.

безусловно, имеет математическую ценность, но работать с такой физической величиной невозможно.

Это было первым знаком того, что скорость света должна иметь какое-то важное значение для Вселенной — как наивысшая, в каком-то смысле, скорость. На самом деле никогда не наблюдалось, чтобы субатомные частицы двигались со скоростью выше, чем скорость света, в вакууме, хотя и наблюдались скорости выше чем 0,99 скорости света. На таких скоростях субатомные частицы должны были бы истончиться в направлении своего движения, но, увы, они так малы, что невозможно на практике измерить их длину, когда они пролетают мимо, и нельзя сказать, сокращены они или нет. Однако, если для проверки наличия пропорции Фитцджеральда нельзя использовать субатомные частицы, можно подойти по-другому...

Сокращение Фитцджеральда дополнил, придав ему правильную математическую форму, голландский физик Хендрик Антон Лоренц (1853—1928), поэтому это явление иногда называют «сокращение Лоренца—Фитцджеральда».

Лоренц продолжил доказательство того, что, если применить сокращение Фитцджеральда к субатомным частицам, несущим электрический заряд, можно сделать вывод, что масса тела должна возрастать в той же пропорции, в которой сокращается его длина. Короче, если его масса в движении равна m , а масса покоя — m_0 , то

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (\text{Уравнение 6.7})$$

И опять же, прибавление массы на обычных скоростях очень мало. На скорости в 260 000 км/с масса движущегося тела увеличивается в два раза, а на более высоких скоростях — еще больше. Когда скорость движущегося тела становится равной скорости света, $v = c$, то уравнение 6.7 приобретает вид: $m = m_0/0$. Это означает, что масса движущегося тела становится больше любой доступной величины. (Обычно говорят, что масса движущегося тела становится бесконечной.) И опять же скорости больше световой должны приводить к появлению масс, выражаемых мнимыми числами, для которых не предвидится физических интерпретаций. Снова подчеркивается ключевая важность скорости света в вакууме.

Но очень быстро движущиеся субатомные частицы, развивающие скорости вплоть до 0,99 скорости света, должны значительно увеличивать свою массу; и если длина субатомных час-

тиц не может быть измерена по мере их пролетания мимо, их массу легко можно измерить.

Масса таких частиц может быть получена путем измерения их инерции, то есть силы, необходимой для придания им ускорения. На самом деле именно количество инерции Ньютон использовал для определения массы в своем втором законе (см. ч. I).

Полет заряженных частиц можно искривить в магнитном поле. Таким образом, магнитное поле придает частицам ускорение, и радиус искривления их полета и есть показатель величины инерции частицы, следовательно, и ее массы.

Из искривления пути частицы, движущейся на малой скорости, можно высчитать массу частицы и затем предсказать, как ее путь должен искривиться, проходя через то же самое магнитное поле на более высоких скоростях при условии, что его масса окажется прежней. Действительные же измерения искривления пути частиц, движущихся на высоких скоростях, показали, что эти искривления были менее значительными, чем ожидалось. Это можно объяснить увеличением массы при увеличении скорости, и, когда это было сделано, получившиеся данные четко укладывались в уравнение Лоренца.

Верр вывал, и зеленые усы оказались у всех на виду. Уравнение Лоренца совпало с наблюдаемыми фактами. Поскольку оно было основано на уравнении Фитцджеральда, то явление сокращения тоже оказалось совпадающим с фактами, и это объяснило негативные результаты эксперимента Михельсона—Морли.

Глава 7

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Специальная теория

Если приращение массы движущейся с большой скоростью заряженной частицы является результатом ее движения относительно эфира, то напрашивается новый способ измерения такого движения. Предположим, что одни заряженные частицы взвешивают по мере того, как они пролетают в одном направлении, другие — пока они пролетают в другом направлении, и т. д. Если охватить все направления, то получится, что одни частицы должны будут двигаться по эфирному ветру, в то время как другие, движущиеся в противоположном направлении, будут перемещаться против него.

Те частицы, что предположительно движутся против эфирного ветра, будут двигаться быстрее по отношению к эфиру и

прибавят больше массы, чем те, которые будут двигаться с той же скоростью (относительно нас) по эфирному ветру. По изменению прибавления массы в зависимости от перемены направления можно установить скорость эфирного ветра, а стало быть, и абсолютное движение Земли.

Однако и этот способ оказался неудачным, так же как и эксперимент Михельсона—Морли. Прибавление массы по мере движения оказалось одним и тем же независимо от направления движения. Более того, все эксперименты, целью которых было установить абсолютное движение, провалились.

В общем-то еще в 1905 году молодой швейцарский физик — немец по месту рождения — Альберт Эйнштейн (1879—1955) уже понял, что поиск способов измерения абсолютного движения ни к чему не приведет. Допустим, что мы возьмем быка за рога и примем за данное, что невозможно измерить абсолютное движение каким бы то ни было допустимым методом¹, и рассчитаем следствия из такого решения. Итак, первое допущение Эйнштейна было таково: любое движение должно быть признанным по отношению к некоему объекту или некоей системе объектов, произвольно принятых за находящиеся в покое; любой объект или система объектов (любая *система отсчета*) могут быть приняты с равной верностью за находящиеся в покое. Другими словами, нет ни одного объекта, который находится в «более реальном» состоянии покоя, чем другие.

Поскольку с этой точки зрения любое движение может быть только относительным, Эйнштейн выдвинул теорию, которая позже получит название *теория относительности*. В своей первой работе на эту тему в 1905 году Эйнштейн рассматривал только специальный случай движения с постоянной скоростью; следовательно, данная часть его концепции — это *специальная теория относительности*.

Затем Эйнштейн произвел второе допущение: скорость света в вакууме, по данным измерений, всегда будет одной и той же независимо от движения источника света по отношению к наблюдателю. (Обратите внимание, что я говорю о скорости «по данным измерений».)

¹ Это не то же самое, что просто сказать, что абсолютного движения не существует. Все, что ученым известно о физической Вселенной, основано прямо или косвенно на наблюдениях и измерениях. Если некое явление нельзя наблюдать, ни измерить в реальных обстоятельствах, то в рамках экспериментальной науки его следует считать несуществующим. Существует ли оно на самом деле, будучи ненаблюдаемым и неизмеряемым, остается интересным вопросом для философов и теологов, но абсолютно не имеющим значения для ученых.

Это постоянство данных измерений скорости света, казалось бы, должно противоречить «фактам», касающимся движения, которые были признаны со времен Галилея и Ньютона.

Предположим, некто бросает мяч мимо нас, мы измеряем горизонтальную скорость мяча относительно нас и находим ее равной x футов в минуту. Если человек находится на платформе, движущейся в противоположном направлении со скоростью y футов в минуту, и бросает мяч с той же силой, его горизонтальная скорость относительно нас должна быть $x - y$ футов в минуту. Если бы платформа двигалась в том же направлении, в котором он бросал мяч, горизонтальная скорость мяча относительно нас должна быть $x + y$ футов в минуту.

И казалось бы, в жизни мы наблюдаем именно такую картину, и измерения подтверждают это. Разве не так должно быть, если человек «бросает» не мяч рукой, а свет фонариком?

Для того чтобы второе допущение Эйнштейна оказалось верным, следует предположить, что эта ситуация не распространяется на свет, да и для мяча-то она на самом деле не такова.

Допустим, что воздействие движения платформы на скорость мяча не так велико, как нам кажется, и что, когда движение платформы добавляется к движению мяча, общая скорость мяча немного меньше, чем $x + y$. А если движение платформы противоположно движению мяча, то общая скорость мяча немного больше, чем $x - y$. Предположим также, что эта разница возрастает по мере возрастания x и y , но что для скоростей всех материальных тел, которые было возможно наблюдать до 1900 года, эта разница оставалась слишком малой, чтобы ее можно было измерить. Следовательно, мы могли сделать вполне естественный вывод, что общая скорость равна строго $x + y$ или строго $x - y$ и что это верно для всех скоростей.

Но если иметь возможность наблюдать за очень большими скоростями, порядка тысяч километров в секунду, эта разница станет достаточно большой, чтобы ее можно было заметить. Если добавить скорость y к скорости x , общая скорость будет заметно меньше, чем $x + y$, и будет лишь немногим больше одной скорости x .

Таким же образом, если y вычитается из x , общая скорость будет значительно больше, чем $x - y$ и лишь немного меньше одной скорости x . В конце концов на скорости света воздействие движения источника тела движущегося равно нулю, так что $x + y = x$, и $x - y = x$ независимо от величины y . И это — еще один способ выражения второго допущения Эйнштейна.

Фактически для сохранения этого допущения необходимо складывать скорости таким образом, чтобы их сумма никогда не превышала скорость света. Например, предположим, что платформа движется вперед (по отношению к нам) со скоростью 290 000 км/с, или лишь на 10 000 км/с медленнее скорости света в вакууме. Далее предположим, что с платформы вперед бросают мяч со скоростью 290 000 км/с относительно платформы. Скорость мяча относительно нас должна быть 290 000 + 290 000 км/с при движении вперед, но на этих скоростях влияние движущейся платформы настолько снижено, что общая скорость будет всего лишь 295 000 км/с и все еще остается меньше, чем скорость света.

На самом деле это может быть выражено математически. Если две скорости (V_1 и V_2) прибавляются друг к другу, то, по Ньютону, их суммарная скорость должна быть $V = V_1 + V_2$. По Эйнштейну же, суммарная скорость будет равна:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{1 + \frac{V_1 V_2}{C^2}}$$

где C — скорость света в вакууме. Если V_1 равно C , то уравнение Эйнштейна примет вид:

$$V = \frac{C + V_2}{1 + \frac{C V_2}{C^2}} = (C + V_2) \left(\frac{C}{C + V_2} \right) = C.$$

Другими словами, если одна скорость равна скорости света, то добавление к ней другой скорости, даже равной той же скорости света, составит общую скорость, не превышающую скорость света.

Короче говоря, из утверждения Эйнштейна о постоянной измеряемой скорости света можно сделать вывод, что измерение скорости любого движущегося тела всегда покажет величину меньше скорости света¹.

Кажется странным и неудобным принимать такую необычную картину мира только для того, чтобы придерживаться до-

¹ Это часто выражалось как «тело не может двигаться быстрее света», но это не совсем так. Лишь *данные измерений* всегда будут показывать скорость меньше, чем скорость света. Вполне вероятно, что во Вселенной существуют объекты, движущиеся со скоростями (относительно нас) больше скорости света, но мы эти тела не можем ни видеть, ни осязать и соответственно не можем измерить их скорость.

пушения Эйнштейна о постоянности измеряемой скорости света. Тем не менее независимо от того, можно ли измерить скорость света, эта скорость всегда представлялась постоянной, и независимо от того, можно ли измерить скорость движущихся тел, их скорость всегда представлялась меньше скорости света. Короче, еще ни один физик не обнаружил ни одного явления, которое бы нарушало утверждение Эйнштейна об относительности движения или его же утверждение о постоянстве скорости света, а искали они усердно, уж будьте уверены.

Эйнштейн мог вывести из своих утверждений и существование сокращения Лоренца—Фитцджеральда, так же как и описанное Лоренцем приращение массы с движением. Более того, он показал, что не только электрически заряженные частицы прибавляют массу с движением, но и незаряженные частицы тоже. Фактически по мере движения все объекты прибавляют в массе.

Может показаться, что вряд ли есть причина так усиленно вдаваться в специальную теорию. Какая разница, начинать ли с утверждения сокращения Лоренца—Фитцджеральда и из него выводить постоянство скорости света или начинать с утверждения о постоянстве скорости света и выводить из него сокращения Лоренца—Фитцджеральда?

Если бы это было все, то значительной разницы действительно не было бы. Однако Эйнштейн соединил свое допущение о постоянстве скорости света со своим первым допущением об относительности всего движения.

Это означало, что прибавление массы является не «реальным» явлением, а лишь изменением данных измерений. Размер, на который сокращена длина или увеличена масса, не является чем-то определяемым абсолютно, он различается от наблюдателя к наблюдателю.

Чтобы понять, что это означает, представьте себе два одинаковых космических корабля, движущиеся в противоположных направлениях по пересекающейся траектории; на каждом космическом корабле находится оборудование, позволяющее измерить длину и массу другого корабля в то время, как тот пролетает мимо.

С космического корабля X видно, как мимо в определенном направлении пролетает космический корабль Y со скоростью 260 000 километров в секунду, и на этой скорости корабль Y , по данным измерений, имеет только половину своей длины покоя и удвоенную массу сравнительно со своей же массой покоя.

Но люди в корабле Y не чувствуют движения (так же как и мы не чувствуем своего движения сквозь космос вокруг Солнца).

Люди на корабле *У* ощущают себя недвижимыми и имеющими длину локтя и массу покоя. А видят они, что мимо них пролетает (в противоположном направлении) корабль *Х* со скоростью 260 000 километров в секунду. Для них именно показатели корабля *Х* изменились на половину длины и удвоенную массу.

Если бы наблюдатели могли общаться между собой во время движения, у них были бы солидные аргументы. Каждый мог бы сказать: «Я нахожусь в покое, а ты движешься. Я нормальной длины, а ты сокращенной. Я имею нормальную массу, а ты — удвоенную».

Так кто же на самом деле «прав»?

Правильный ответ — никто (или оба). Видите ли, вопрос не в том, что «на самом деле» происходит с длиной и массой или какой из кораблей «на самом деле» имеет сокращенную длину или увеличенную массу. Вопрос только в измерениях. (Это как — проводя тривиальную аналогию — измерять стороны прямоугольника размером четыре на два метра, а потом спорить, какова «на самом деле» длина прямоугольника — два или четыре метра. Ведь это зависит от того, с какой стороны мерить.)

Но допустим, что вы пытаетесь произвести некий эксперимент, который, предположим, лежит за пределами измерений «реальности». Предположим, например, что вы поставили два корабля рядом и сравнили их напрямую, чтобы выяснить, который из них длиннее и тяжелее. Это на самом деле не может быть произведено в рамках специальной теории Эйнштейна, поскольку она имеет дело только с равномерным движением. Чтобы свести корабли вместе, нужно, чтобы, как минимум, один из них изменил направление движения и развернулся, то есть произвел бы неравномерное или ускоренное движение.

Однако, даже если мы это сделаем и представим оба корабля бок о бок и неподвижными относительно друг друга, после того как они пролетят мимо друг друга на таких суперскоростях, мы не можем делать выводы относительно «реальности». Находясь в покое, каждый из них будет и измерять другого как имеющего нормальную длину и массу. Если и происходило «реальное» изменение длины и массы какого-либо корабля в прошлом, то теперь это изменение исчезло бы без следа.

Несмотря ни на что, сложно перестать думать о «реальности». Тут может помочь воспоминание о том, что были времена, когда мы отказались от иллюзорной «реальности» и с нами не только ничего не случилось, но и адаптировались к жизни мы гораздо лучше.

Так, ребенок очень точно знает, что такое «верх» и «низ». Его голова показывает «вверх», его ноги указывают «вниз» (если он

стоит нормально); он прыгает «вверх», он падает «вниз». Более того, вскоре он обнаруживает, что все вокруг него разделяют его мнение по поводу «верха» и «низа».

Если ребенку с такими убеждениями показать глобус, где США находятся сверху, а Австралия — внизу, так что маленькие американцы стоят вверх головой, а маленькие австралийцы — вниз головой, его первой реакцией может быть: «Но это же невозможно! Маленькие австралийцы упадут!»

Конечно, если понимать воздействие силы притяжения (а это понимали задолго до Аристотеля, как минимум, с тех пор, как появилось само представление о Земле, см. ч. I), то бояться, что кто-нибудь упадет с любой части Земли, вы уже не будете. Однако вопрос о природе «верха» и «низа» останется открытым. Вы можете позвонить жителю Австралии по международному телефону и сказать: «Я стою вверх головой, поэтому вы, должно быть, вниз головой». Он ответит: «Нет, нет. Я явно стою вверх головой, стало быть, вниз головой стоите вы».

Видите ли вы, таким образом, насколько бессмысленно спрашивать о том, кто прав и кто «на самом деле» вверх головой? Оба правы, и оба не правы. Каждый стоит вверх головой в рамках собственной системы координат, и каждый стоит вниз головой в рамках системы координат другого.

Большинство людей настолько привыкли к этому, что для них «относительный верх» и «относительный низ» не являются больше нарушениями «здравого смысла». На самом деле именно представление об «абсолютном верхе» и «абсолютном низе» кажется теперь неправильным. Если кто-то всерьез будет утверждать, что австралийцы ходят, будучи подвешенными за ноги, его засмеют.

Если принять принципы релятивистской Вселенной (в как можно более юном возрасте), вышеописанное тоже не будет казаться противоречащим здравому смыслу.

Равнозначность массы и энергии

В XIX веке химики все больше убеждались, что масса не может ни появляться ниоткуда, ни исчезать и никуда (*закон сохранения массы*). Однако Лоренцу и Эйнштейну казалось, что масса появляется при увеличении скорости и исчезает при уменьшении скорости. Конечно, изменения массы на обычных скоростях крайне малы, но они есть. Откуда же тогда берется масса и куда исчезает?

Начнем с того, что представим, что к телу определенной массы (m) прикладывается определенная сила (f). В таких ус-

ловиях тело получает ускорение (a), а из второго закона Ньютона (см. ч. I) можно сделать вывод, что $a = f/m$. Присутствие ускорения означает, что скорость тела увеличивается, но в старой ньютоновской модели Вселенной это не влияло на массу тела, она оставалась постоянной. Если силу также рассматривать как постоянную, то f/m тоже остается постоянным и a , ускорение, тоже постоянно. В результате такого постоянного ускорения скорость тела (в ньютоновском представлении) будет возрастать неограниченно и достигнет любого значения, которое вы назовете, — надо только дождаться.

В эйнштейновской же Вселенной наблюдатель, измеряющий скорость объекта, к которому прилагается непрерывная постоянная сила, никогда не сможет увидеть, как скорость этого объекта превысит скорость света в вакууме. Следовательно, хотя его скорость и возрастает под воздействием постоянной силы, эта скорость возрастает все меньше и меньше и по мере приближения к скорости света она увеличивается гораздо меньше. Короче, ускорение тела под влиянием постоянной силы уменьшается по мере увеличения скорости и становится нулевым, когда скорость достигает световой.

Но опять же по второму закону Ньютона масса тела равна силе, к нему прилагаемой, поделенной на ускорение, производимое этой силой, то есть $m = f/a$. Если сила постоянна, а ускорение уменьшается по мере увеличения скорости, то a уменьшается по мере увеличения скорости, a/f — нет; следовательно, f/a увеличивается по мере увеличения скорости. А это означает, поскольку $m = f/a$, что масса увеличивается вместе со скоростью. (Так увеличение массы по мере увеличения скорости можно вывести из эйнштейновского допущения о постоянстве скорости света в вакууме.)

Подвергаясь воздействию силы, тело получает кинетическую энергию, которая равна половине его массы, умноженной на квадрат его скорости ($e_k = \frac{1}{2}mv^2$, см. ч. I). С ньютоновской точки зрения это увеличение кинетической энергии вытекает только из увеличения скорости, поскольку масса считается неизменной. С эйнштейновской же точки зрения это увеличение кинетической энергии является результатом увеличения как скорости, так и массы.

В случаях, когда масса не задействована в изменениях энергии (как гласит точка зрения Ньютона), естественно представлять себе массу как что-то не имеющее отношения к энергии и думать, что, с одной стороны, существует закон сохранения энергии, а с другой — закон сохранения массы и оба закона самостоятельны.

Если же масса меняется и, таким образом, является тесно связанной в процессах изменения энергии (как это предсказывал Эйнштейн), естественно думать о массе и энергии как о различных аспектах одного и того же, поэтому закон сохранения энергии будет включать в себя и массу. (Чтобы это стало абсолютно понятным в свете наших предыдущих выводов, мы иногда говорим о законе сохранения массы-энергии, но слово «масса» не является действительно обязательным.)

Движение не создает массу в любом реальном ощущении; масса — лишь один из аспектов общего возрастания кинетической энергии, получаемой из силы, на которую расходуется энергия где-то в другой части системы.

Но предположим теперь, что закон сохранения энергии (включающий в себя массу) остается действительным в релятивистской вселенной (а похоже, так оно и есть). По этому закону, хотя энергия и не может ни появляться, ни исчезать, она может переходить из одной формы в другую. Это означает, что определенное количество массы может быть конвертировано в определенное количество других форм энергии, таких как тепло, например, и что определенное количество энергии в другой форме, например тепло, может, следовательно, конвертироваться в определенное количество массы. А это и есть то, на чем настаивал Эйнштейн.

Равнозначность массы и энергии, объявленная Эйнштейном в его работе 1905 года, стала активно использоваться физиками его времени. Открытие тремя годами позже радиоактивности (частично я буду говорить об этом в III части), казалось, показало ситуацию, в которой энергия бесконечно порождалась из ниоткуда. Когда специальная теория относительности указала путь, ученые стали искать исчезновение массы — и нашли его.

Может показаться удивительным, что никто не заметил взаимных изменений массы и энергии, пока Эйнштейн не вывел их теоретически. Причина этого кроется в самой природе эквивалентности — в точном определении того, какое количество энергии соответствует какому количеству массы.

Чтобы определить это, давайте возьмем обратный коэффициент Фитцджеральда, равный $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Это также можно записать, следуя алгебраическим преобразованиям, как $(1-v^2/c^2)^{-1/2}$. Выражение, записанное этим образом, можно сказать, принадлежит типу $(1-b)^{-a}$. По теореме о биноме (математическое отношение, впервые разработанное самим Ньютоном) выражение $(1-b)^{-a}$ может быть развернуто в бесконечную последовательность слагаемых, начинающуюся так: $1 + ab + \frac{1}{2}(a^2 + a)b^2 + \dots$

Чтобы применить это к обращенному коэффициенту Фитцджеральда, примем $a = 1/2$, а $b = v^2/c^2$. Тогда коэффициент Фитцджеральда становится равным:

$$1 + v^2/2c^2 + 3v^4/8c^4 + \dots$$

Поскольку c , скорость света, принято считать имеющей постоянную величину, то второе и третье слагаемые (как и все последующие слагаемые этой бесконечной последовательности) увеличиваются по мере возрастания v . Но v достигает максимума тогда, когда скорость движущегося тела достигает скорости света (по крайней мере, большей скорости мы измерить не можем). Следовательно, различные слагаемые тогда достигают наибольшей величины, и при $v = c$ последовательность принимает вид $1 + 1/2 + 1/4 \dots$

Уменьшение становится еще более резким на более низких скоростях, и последующие слагаемые становятся все более и более незначительными. Когда $v = c/2$ (150 000 километров в секунду), эта последовательность выглядит как $1 + 1/8 + 3/128 \dots$. Когда $v = c/4$ (75 000 километров в секунду), серия выглядит как $1 + 1/32 + 3/2048 \dots$

Такого рода уменьшающийся ряд показывает, что завершающаяся часть последовательности (несмотря на то, что она бесконечна) приходит к конечному небольшому объему. Следовательно, мы можем устранить все члены последовательности, кроме нескольких первых, и рассматривать эти несколько первых как всю последовательность в достаточно точном приближении.

К примеру, на обычных скоростях все слагаемые последовательности, кроме первого (который всегда равеняется 1), принимают такие крошечные значения, что их можно полностью игнорировать. В таком случае обращенный коэффициент Фитцджеральда можно рассматривать как равный единице с большой степенью приближения (именно поэтому изменения в массе и длине оставались до XX столетия незамеченными). Чтобы сделать его еще более точным, особенно на очень высоких скоростях, мы можем рассматривать два первых слагаемых серии. Это достаточно точно для всех реальных целей, и о третьем и дальнейших слагаемых можно уже не думать.

Тогда с достаточной точностью можно сказать, что

$$\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = 1 + v^2/2c^2. \quad (\text{Уравнение 7.1})$$

Теперь же давайте вернемся к отношению массы Лоренца (уравнение 6.7), которое утверждает, что масса тела в движении

(m_1) равна его массе покоя (m_0), поделенной на коэффициент Фитцджеральда. Это то же самое, что сказать, что m_1 равно m_0 , умноженному на обращенный коэффициент Фитцджеральда. Следовательно, используя новое выражение для этого обращения, данного в уравнении 7.1, мы можем написать отношение массы в следующем виде:

$$m_1 = m_0(1 + v^2/2c^2) = m_0 + m_0v^2/2c^2. \quad (\text{Уравнение 7.2})$$

Увеличение массы в результате движения, то есть $m_1 - m_0$, мы назовем просто m . Решив уравнение 7.2 для $m_1 - m_0$, то есть для m , мы найдем, что

$$m = m_0v^2/2c^2 = \frac{1}{2}m_0v^2/c^2. \quad (\text{Уравнение 7.3})$$

Выражение $\frac{1}{2}m_0v^2$ из правой части уравнения 7.3 оказывается значением кинетической энергии движущегося тела (кинетическая энергия равна $\frac{1}{2}mv^2$, см. ч. I), которое обладает своей массой покоя. На самом же деле оно обладает чуть большей массой благодаря факту своего движения, но за исключением случаев особо высоких скоростей реальная масса его лишь немногим больше массы покоя — столь немногим, что на практике мы можем считать $\frac{1}{2}m_0v^2$ равным его кинетической энергии и быть уверенными в том, что это достаточно точно. Если мы обозначим эту кинетическую энергию как e , то уравнение 7.3 примет вид:

$$m = e/c^2. \quad (\text{Уравнение 7.4})$$

Вспомним о том, что m представляет прибавление массы, получаемое в ходе движения. Поскольку очень быстрое движение, представляющее очень большое значение e (кинетической энергии), производит лишь небольшой прирост массы, мы ясно видим, что большая часть обычной энергии равна крошечному количеству массы. Для подсчета отношения можно использовать уравнение 7.4, простым преобразованием приводимое к привычному виду:

$$e = mc^2. \quad (\text{Уравнение 7.5})$$

В системе СГС (см. ч. I), где все единицы измерения производятся из сантиметров, граммов и секунд, значение c (скорости света в вакууме) — 30 000 000 000 сантиметров в секунду. Соответственно значение c^2 — 900 000 000 000 000 000 см²/с². Если принять за m один грамм, то mc^2 равняется

900 000 000 000 000 000 000 000 граммов на сантиметр в квадрате в секунду в квадрате, или, поскольку $1 \text{ г на см}^2/\text{с}^2$ определяется как «эрг», $1 \text{ грамм массы равен } 900\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ эргов энергии}$.

Одна килокалория равна $41\,860\,000\,000$ эргов. Это означает, что $1 \text{ грамм массы равен } 21\,500\,000\,000$ килокалорий. Сгорание галлона бензина освобождает около $32\,000$ килокалорий. Этому количеству энергии соответствует масса в $^{32\,000}/_{21\,500\,000\,000}$ то есть $1/_{670\,000}$ грамма. Это означает, что сгорание целого галлона бензина, перевод энергии в тепло, свет, механическое движение поршней и т. д. приносит системе в целом потерю массы в $1/_{670\,000}$ грамма. Неудивительно, что химики и физики не замечали столь малых изменений, пока не стали искать их специально.

С другой стороны, если бы целые граммы массы можно было полностью перевести в энергию, эта обширная концентрация произведенной энергии имела бы огромное действие. В части III будут перечислены шаги, по которым постепенно стало понятным, как это сделать. В результате этого появились *атомные бомбы*, угрожающие уничтожить все человечество, и *атомные реакторы*, дающие человечеству новую надежду на будущее.

Еще уравнение 7.5 предлагает первое удовлетворительное объяснение того, откуда берут энергию Солнце и другие звезды. Для того чтобы излучать столько энергии, сколько оно излучает, Солнце должно терять $4\,600\,000$ тонн массы ежесекундно. Это довольно много по человеческим меркам, но незначительно для Солнца. Такими темпами оно может излучать практически неизменно еще миллиарды лет.

Формула Эйнштейна, $e = mc^2$, как вы видите, полностью происходит из допущения о постоянстве измеряемой скорости света, и само наличие атомных бомб является страшным свидетельством верности специальной теории относительности. Неудивительно, что из всех физических формул $e = mc^2$ получила наибольшую известность среди населения, не имеющие го отношения к физике.

Относительность времени

Эйнштейн пошел еще дальше в своих выводах из своих же допущений и вышел за рамки рассуждений Лоренца—Фитцджеральда о длине и массе, подойдя к обсуждению времени.

Время всегда измеряется посредством некоего ровного периодического движения: вращения Земли, капанья воды, уда-

ров метронома, колебаний маятника, даже вибраций атома в молекуле. Однако перемены в длине и массе при возрастании скорости неизбежно должны привести к замедлению любого периодического движения. Следовательно, время должно измеряться, как протекающее все медленнее по мере возрастания скорости относительно наблюдателя.

И вновь нам потребуется коэффициент Фитцджеральда. Так, промежуток времени (t), наблюдаемый на теле, движущемся с данной скоростью относительно промежутка времени в покое (t_0), вычисляется так:

$$t = t_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}. \quad (\text{Уравнение 7.6})$$

На скорости в 260 000 километров в секунду относительно наблюдателя t будет равным $t_0/2$. Другими словами, потребует-ся час времени наблюдателя на то, чтобы пронаблюдать, как на движущемся объекте проходит полчаса. То есть если на часах наблюдателя было 1.00 и на часах на движущемся объекте было 1.00, то через час на часах наблюдателя будет 2.00, а на часах на движущемся объекте будет только 1.30.

На скорости, равной скорости света, t будет равно 0. Следовательно, для того чтобы соответствовать любому промежутку часов наблюдателя, часам движущегося объекта потребуется вечность. Насколько наблюдатель сможет заметить, часы на движущемся объекте всегда будут показывать 1.00; время на объекте застынет. Это замедление времени в зависимости от движения называется *растяжением времени*.

Такое положение дел кажется странным, но это было проверено на определенных короткоживущих субатомных частицах. Двигаясь медленно, они распадались за определенное фиксированное время. Двигаясь же очень быстро, они продолжали существовать значительно дольше, прежде чем распались. Естественно сделать вывод, что мы наблюдали замедление времени для быстро движущихся частиц. Они все еще распадаются через, скажем, одну миллионную секунды, но для нас эта миллионная секунды растягивается из-за того, что частица быстро движется.

Как и в случае с длиной и массой, это изменение времени является только изменением измеряемой величины (пока мы остаемся верными принципам специальной теории) и изменяется вместе с наблюдателем.

Вернемся к примеру, к пролетающим друг мимо друга космическим кораблям X и Y. Люди на корабле X, видя, как мимо них пролетает корабль Y со скоростью 260 000 километров в се-

кунду, и наблюдая маятниковые часы на борту корабля *У*, будут видеть, что эти часы отбивают секунду за две секунды времени. Все на корабле *У* будет занимать в два раза больше времени (или так будет казаться наблюдателю на корабле *Х*). Даже атомы будут двигаться со скоростью в два раза меньше положенной.

Люди на корабле *У* конечно же не знают об этом. Считая себя находящимися в покое, они будут настаивать на том, что это на корабле *Х* время замедленно. (На самом деле, если бы корабли пролетали друг мимо друга таким образом, чтобы каждому скорость другого казалась равной скорости света, каждый настаивал бы на том, что на другом корабле время полностью остановилось.)

Однако вопрос о времени хитрее, чем вопрос о длине и массе. Если космические корабли после такой мимолетной встречи соприкоснутся вместе в состоянии покоя, их длина и масса снова станут «нормальными» и никаких следов их изменений не останется, поэтому вопрос «реальности» отпадает.

Но что касается времени... Находясь во взаимном покое, часы снова идут на обоих кораблях в одинаковом темпе. Однако следы от предыдущих расхождений во времени остаются. Если одни часы были замедлены и в прошлом проходили только полчаса, пока другие проходили час, то теперь первые часы будут на полчаса отставать! Каждый корабль будет твердо настаивать, что на другом часы отмеряли время медленнее, и каждый будет ожидать, что часы другого отстали.

Будет ли так? Будут ли чьи-либо часы отставать? А если да, то чьи?

Это *парадокс часов*, который хорошо известен физикам.

Если четко придерживаться условий специальной теории, то есть если оба корабля вечно продолжают равномерное движение, парадокса часов не будет. В этом случае они никогда больше не встретятся, и различие в измерениях останется непроверяемым на предмет «реальности».

Для того чтобы корабли сошлись вместе, как минимум, один из них должен замедлиться, выполнить поворот, набрать скорость и догнать другой.

Все это — неравномерное движение, или ускорение, что тут же выводит нас за рамки специальной теории.

Эйнштейн работал над подобными проблемами десять лет после провозглашения своей специальной теории и в 1915 году опубликовал *общую теорию относительности*, в которой рассматриваются последствия неравномерного, или ускоренного, движения. Это более тонкий и сложный аспект относительно-

сти, чем специальная теория, и не все физики-теоретики полностью согласны с выводами общей теории.

Предположим, что наши космические корабли — одни во Вселенной. Корабль Y замедляет движение, разворачивается и ускоряется так, чтобы стать бок о бок с кораблем X . Но по принципам относительности люди на корабле Y имеют полное право считать себя находящимися в покое, то, с их точки зрения, это корабль X замедляет движение, разворачивается и ускоряется так, чтобы вернуться к ним. То, что люди с корабля X наблюдают по отношению к кораблю Y , то люди на корабле Y наблюдают по отношению к кораблю X . Поэтому вполне возможно, что, когда корабли в конце концов окажутся бок о бок, часы на них каким-то образом покажут одно и то же время.

Однако на самом деле этого не произойдет, потому что эти корабли во Вселенной не одни. Вселенная наполнена большим количеством материи, и присутствие этого количества материи разрушает симметрию ситуации кораблей X и Y .

Так, если корабль Y выполняет разворот, корабль X наблюдает, как он это делает. Но, считая себя находящимся в покое, корабль X продолжает видеть, как вся остальная Вселенная (звезды и галактики) пролетают мимо него с постоянной равномерной скоростью, отражающей его собственную постоянную равномерную скорость. Другими словами, корабль X видит, что корабль Y , и только он, прodelывает неравномерное движение.

С другой стороны, если корабль Y считает себя находящимся в покое, он наблюдает, что не только корабль X подвергается ускорению, но и вся остальная Вселенная вместе с ним.

Другими словами, оба корабля подвергаются неравномерному движению относительно друг друга, но Вселенная в целом подвергается неравномерному движению только относительно корабля Y . Два корабля, вполне естественно, подвергаются разному воздействию вследствие огромной разницы в их истории, и когда их сводят вместе, то именно на корабле Y (который подвергся неравномерному движению по отношению ко всей Вселенной) часы будут отставать. Парадокса нет, поскольку получится, что команды обоих кораблей наблюдали неравномерное движение Вселенной по отношению к кораблю Y и оба согласны по поводу разницы в истории кораблей и не могут спрятаться за утверждение «моя система отсчета не хуже, чем твоя».

Теперь предположим, что космический путешественник покидает Землю и по прошествии некоторого времени удаляется

от нас со скоростью, близкой к световой. Если бы мы могли наблюдать, как он путешествовал, мы бы видели, как его время проходит раз в сто медленнее, чем наше. Если бы он наблюдал нас, он бы видел, как наше время проходит в сто раз медленнее, чем его. Другими словами, если бы, поворачивая, он настаивал на том, что находится в покое, ему пришлось бы тогда признать, что вся Вселенная поворачивается вокруг него. Эффектом этого будет уменьшение промежутка времени для него, если речь идет и о нем, и о оставшихся дома землянах.

Путь туда-обратно может показаться ему длившимся всего год, но на Земле может пройти сто лет. Если бы у нашего космонавта был брат-близнец, оставшийся на Земле, этот брат давно мог умереть от старости, в то время как наш космонавт едва ли постарел бы. (Это называется *парадоксом близнецов*.) Однако важно понимать, что космический путешественник не обнаружил источника вечной молодости. Он мог состариться только на год за земной век, но он и прожил за этот земной век всего год. Более того, независимо от его скорости время ни для него, ни для его наблюдателей, находящихся на Земле, не повернет вспять. Моложе он никогда не станет.

Изменяемость времени в зависимости от изменений скорости разрушает наши представления об абсолютности времени. Из-за этого становится невозможным определить время события таким образом, чтобы все наблюдатели согласились с этим. Вдобавок к этому время ни одного события не может быть определено, пока информация об этом событии не дойдет до наблюдателя, а эта информация может распространяться только со скоростью света.

В качестве простого примера давайте представим, что космический путешественник возвращается на Землю, для него прошел один год, и он обнаруживает, что его брат-близнец умер пятьдесят лет назад по земному времени. Для путешественника это может показаться невозможным, ведь по его меркам пятьдесят лет назад его брат еще не родился.

На самом деле в математическом обосновании теории относительности нет смысла работать отдельно с пространством или отдельно со временем. Вместо этого уравнивая описывают их объединение (обычно именуемое *пространство-время*). Чтобы разместить точку на пространстве-времени, надо назвать координаты на каждом из трех пространственных измерений и значение времени; время при этом рассматривается как подобное (хоть и не в точности) трем обычным измерениям. Именно в этом смысле время называют «четвертым измерением».

Иногда утверждают, что существование относительного времени позволяет измерять скорости больше световой. Допустим, к примеру, что космический корабль летит от Земли до какой-либо планеты, находящейся на расстоянии десяти световых лет, и делает это так быстро, что вследствие растяжения времени команде кажется, что путешествие заняло всего год.

Поскольку корабль, путешествуя всего год, прошел расстояние, на преодоление которого свету требуется десять лет, не означает ли это, что он двигался со скоростью в десять раз больше световой?

Правильный ответ — не означает. Если бы члены команды начали отстаивать это мнение, они бы измеряли промежуток времени в один год в своей собственной системе отсчета, а расстояние от планеты до Земли (десять световых лет) — в системе отсчета Земли. Вместо этого им следовало бы спросить: каково расстояние от Земли до планеты в системе отсчета корабля?

В системе отсчета корабля корабль, разумеется, неподвижен, а Вселенная в то же время, включая Землю и планету-цель, проскакивает назад на огромной скорости. Вся Вселенная сокращена, как и следует ожидать из сокращения Фитцджеральда (см. гл. 6), и расстояние от Земли до конечной планеты гораздо меньше чем десять световых лет. На самом деле оно меньше одного светового года, так что корабль может преодолеть это расстояние за один год, не превышая скорости света.

Опять же, хотя кораблю потребовался всего год, чтобы добраться до цели, это не значит, что он обогнал свет, даже несмотря на то, что лучу света, вылетевшему с Земли одновременно с кораблем, потребуется десять лет на то, чтобы преодолеть расстояние в десять световых лет. Этот промежуток — десять световых лет — будет истинным только в рамках земной системы отсчета. В собственной же системе отсчета луча, поскольку он движется со скоростью света, затраченное время сократится до нуля, и луч света попадет на альфу Центавра (или любое другое место во Вселенной, сколь угодно удаленное), не тратя на это времени вообще.

Это нельзя использовать как аргумент в пользу того, что в системе отсчета светового луча его скорость в таком случае бесконечна, поскольку в собственной системе отсчета светового луча вся толща Вселенной сокращается до нуля в направлении его движения. Пересечение Вселенной нулевой толщины не займет у света времени, даже если скорость конечна и составляет всего 300 000 километров в секунду.

Общая теория

Одним из базовых допущений специальной теории является невозможность измерить абсолютное движение; допущение о том, что ни один наблюдатель не может присвоить себе привилегию считать себя находящимся в покое и что все системы отсчета равно действительны.

Если же рассмотреть неравномерное движение (вне сферы действия специальной теории), во всем вышеперечисленном могут возникнуть сомнения.

Допустим, два корабля движутся бок о бок на равной скорости. Члены экипажа на каждом корабле могут считать и себя, и другой корабль находящимися в покое. Затем внезапно корабль *У* начинает двигаться вперед по отношению к кораблю *Х*.

Экипаж корабля *Х* может утверждать, что они были все еще в покое, пока корабль *У* начал двигаться вперед с ускорением. Экипаж корабля *У*, однако, может, напротив, утверждать, что они все еще были в покое, когда корабль *Х* начал двигаться назад с ускорением. Так есть ли способ выбрать одно из этих противоречащих друг другу наблюдений?

В случае такого неоднородного движения — может быть. Так, если бы корабль *У* «действительно» ускорялся вперед, то люди в нем чувствовали бы, как инерция вдавливает их назад (как вас вдавливает в спинку кресла, когда вы жмете на педаль газа, сидя в своем автомобиле). С другой стороны, если бы корабль *Х* двигался с ускорением назад, то люди в нем чувствовали бы, как инерция отбрасывает их вперед (как вас толкает в ветровое стекло, когда вы нажимаете на тормоза). Следовательно, экипажи кораблей могли решить, который из кораблей «действительно» двигался, по тому, какую инерцию члены экипажей испытывали.

Наверное, можно определить абсолютное движение по факту и силе эффектов инерции. В своей общей теории относительности Эйнштейн перечислил, какие качества должна проявить Вселенная, чтобы таким образом нельзя было определить абсолютность движения.

Ньютоновский взгляд на массу описывал в общем-то два вида массы. По второму закону Ньютона масса определяется через инерцию, имеющуюся у тела. Это «масса инерции». Также массу можно определить через силу вызываемого им инерционного поля. Это «масса гравитации». Со времен Ньютона считалось, что эти две массы полностью идентичны, но слобода доказать это не предвиделось. Эйнштейн не пытался это доказать; он просто предположил, что масса инерции и масса гравитации идентичны, и дальше уже исходил из этого допущения.

Тогда стало возможным утверждать, что и гравитация, и инерция не принадлежат отдельным телам, а являются следствием взаимодействия масс этих тел с массой всей остальной Вселенной.

Если космический корабль начинает с ускорением двигаться вперед, члены экипажа чувствуют давление инерции, влавливающее их в корму. Но предположим, что члены команды корабля настаивают, что они оставались в покое. Тогда они объяснят, что их наблюдения за Вселенной говорят о том, что звезды и галактики за бортом корабля с ускорением движутся назад. Ускоряющееся движение назад далеких тел Вселенной тянет назад и членов экипажа, оказывая на них инерционное воздействие, в точности как было бы, если бы Вселенная находилась в покое, а корабль с ускорением двигался вперед.

Короче, воздействие инерции не может служить доказательством того, что корабль «действительно» ускоряется. Ведь тот же самый эффект наблюдался бы, если бы ускорение получил не он, а вся остальная Вселенная. Эти инерционные эффекты могут демонстрировать только *относительное* неоднородное движение: или неоднородное движение корабля относительно Вселенной, или неоднородное движение Вселенной относительно корабля. Способа выяснить, какое из этих двух движений «реально», не существует.

Можно также задать вопрос, «действительно» ли Земля вращается. Большую часть человеческой истории Земля считалась неподвижной, поскольку казалась неподвижной. После того как было проделано много интеллектуальной работы, ее вращение было продемонстрировано к удовлетворению всех ученых и тех неученых, кто вял аргументам или готов был прислушаться к мнению авторитетов. Но вращается ли она «на самом деле»?

Один из аргументов в пользу вращения Земли основывается на том, что она растянута по линии экватора. Это объясняется эффектом центрифуги, который имеет в своей основе вращение. Если бы Земля не вращалась, не было бы эффекта центрифуги и Земля не была бы растянута в плоскости экватора. Именно существованием этого растяжения часто доказывают «реальность» вращения Земли.

К этому аргументу стоило бы прислушаться, если бы Земля была во Вселенной одинока, но ведь это не так. Если посчитать Землю неподвижной, то можно было сказать, что это Вселенная со всей своей огромной массой быстро вращается вокруг Земли. Воздействие этой огромной вращающейся массы приводит к растягиванию Земли в плоскости экватора — точно так же, как если бы Земля вращалась, а Вселенная была бы непо-

движна. Все эффекты вращения можно с одинаковой уверенностью объяснить в любой системе отсчета.

Можно также утверждать, что если бы Земля была неподвижна, а вся остальная Вселенная вращалась бы вокруг нее, то далекие звезды, для того чтобы двигаться по своим гигантским орбитам, преодолевая их всего за 24 часа, должны двигаться со скоростью во много раз выше световой. Из этого можно сделать вывод, что вращение Вселенной вокруг Земли невозможно, а следовательно, «действительно» вращается Земля, а не Вселенная. Однако если рассматривать Вселенную как вращающуюся вокруг Земли, а далекие звезды — движущимися на больших скоростях, то сокращение Фитцджеральда уменьшит расстояния, которые им приходится преодолевать до таких, на которых их скорости будут меньше скорости света.

Конечно, может возникнуть вопрос, что вряд ли разумно предполагать, что вся Вселенная вращается вокруг Земли, — гораздо естественнее представить себе, что это вращение Земли приводит к кажущемуся вращению Вселенной. Таким же образом, гораздо разумнее считать, что это космический корабль движется с ускорением вперед, чем что вся Вселенная движется с ускорением назад мимо одного неподвижного корабля.

Это совершенно верно и проще принять за данность, что это именно Земля вращается (или что это именно корабль движется), и астрономы будут продолжать настаивать на этом, несмотря на догматы относительности. Однако теория относительности не утверждает, что одна система отсчета не может быть проще или полезнее, чем другая, а лишь то, что одна система отсчета не более *правомочна*, чем любая другая.

Представим, что иногда Земля считается неподвижной только потому, что так проще. Бросая мяч, бейсболист никогда не думает о вращении Земли. Поскольку и он сам, и мяч, и игрок с битой, ждущий мяча, все вместе движутся вместе с Землей, как бы она ни двигалась, то для подающего проще считать Землю неподвижной и рассчитывать силу и направление броска, исходя из этого. Для него система отсчета с неподвижной Землей полезнее, чем система отсчета с вращающейся Землей, но это не делает систему отсчета с неподвижной Землей более *правомочной*.

Гравитация

В своей общей теории Эйнштейн обновил и концепцию гравитации. Ньютон считал, что раз Земля вращается вокруг Солнца, то между ними должна существовать сила взаимного при-

тяжения. Эйнштейн же показал, что вращение Земли вокруг Солнца можно объяснить через геометрию пространства.

Представим аналогично. Подающий посылает мяч для гольфа катиться по лужайке по направлению к лунке. Мяч ударяется о край лунки и падает в нее. Однако, если он движется слишком быстро, он прокрутится вдоль стенки лунки и выкатится с другой стороны в новом направлении. Он немного покругился вокруг середины лунки, но никто же не предположит на основе этого, что между мячом и серединой лунки есть сила притяжения.

Давайте представим совершенно ровную, лишенную трения поверхность бесконечной протяженности. Мяч, по которому ударяет клюшка, будет вечно катиться по ровной прямой линии.

Но что, если покрытие неровно, если на нем есть кочки и ямки? Траектория мяча, прокатившегося по краю кочки, будет искривлена по направлению от центра ямки. Траектория мяча, прокатившегося по краю ямки, будет искривлена по направлению к центру ямки. Если ямки и кочки по какой-то причине невидимы и обнаружить их невозможно, то нас могут озадачить случайные отклонения шаров от прямолинейного движения. Мы можем предположить, что существуют невидимые силы притяжения или отталкивания, толкающие шар туда и сюда.

Предположим, на такой лужайке есть конусообразная ямка с крутыми стенами. Тогда можно представить, что мяч для гольфа принимает замкнутую орбиту по стенкам этой воронки, как бобслей, бесконечно кружащийся по округлой насыпи. Если бы имелось трение, кружащийся шар терял бы кинетическую энергию и мало-помалу упал бы на дно воронки. В отсутствие трения он будет сохранять свою орбиту.

Эйнштейновское понятие о гравитации представляет очень похожую картину. Пространство-время имело бы здесь четырехмерную аналогию плоской лужайки, если бы оно было свободно от материи. Материя же, однако, производит «ямки»; чем более массивна материя, тем глубже «ямка». Земля движется вокруг Солнца, как будто она кружится по краю углубления. Если бы в космосе было трение, она бы медленно сдвигалась к центру «ямки» (то есть по спирали падала бы на Солнце).

В отсутствие трения она неопределенно долго сохраняет свою орбиту. Эллипс, по которому движется Земля, демонстрирует, что ее орбита по краю «углубления» не является совершенно ровной по плоскости четырехмерной площадки (иначе орбита была бы круговой). Небольшой наклон орбиты приводит к небольшой эллиптичности, а большой наклон — к большей эллиптичности. Именно эти «ямки», производимые присутствием материи, привели к понятию об *искривленном пространстве*.

Выводы из специальной теории относительности, например увеличение массы при движении и эквивалентность массы и энергии, были продемонстрированы без труда. Доказать же действительность общей теории оказалось гораздо труднее. Гравитация, рассматриваемая по Эйнштейну, производит результаты, столь похожие на ту гравитацию, какой ее видел Ньютон, что хочется посчитать обе теории равнозначными, а затем выбрать ту, что проще и больше соответствует «здравому смыслу», а это конечно же ньютоновская.

Однако есть области, где выводы из представлений Эйнштейна действительно несколько отличались от предполагаемых по теории Ньютона. Изучающий эти выводы должен будет выбирать между этими двумя теориями, найдя для этого более удовлетворительную причину, чем простота. Первая из таких областей касается планеты Меркурий.

Различные тела Солнечной системы, по представлениям Ньютона, движутся в соответствии с силами гравитации, которым они подвергаются. Каждое тело подвергается силе притяжения со стороны всех других тел во Вселенной, так что точно и полностью рассчитать движения любого тела вряд ли возможно. Однако в Солнечной системе сильнее всего воздействует гравитационное поле Солнца. Гравитационные поля нескольких других тел, находящихся близко к рассматриваемому телу, тоже имеют значение, но оно невелико.

Если учесть и их, то движение планет Солнечной системы может быть объяснено с достаточной степенью точности. Если, несмотря на это, все же существуют расхождения между рассчитанным и реальным движением, остается допустить, что имеется еще какое-то неучтенное гравитационное воздействие.

Например, присутствие расхождений в орбите Урана привело к поиску упущенного гравитационного воздействия и к открытию в середине XIX века планеты Нептун.

Во время открытия Нептуна изучалось также расхождение в движении Меркурия, ближайшей к Солнцу планеты. Как и другие планеты, Меркурий движется по эллиптической орбите вокруг Солнца, где Солнце находится в одном из фокусов эллипса. Это означает, что планета не всегда находится на одном расстоянии от Солнца. На его орбите есть точка, в которой он наиболее близок к Солнцу, — *перигелий*, и точка на противоположном конце орбиты, на которой он наиболее далек от Солнца, — *афелий*. Соединяющая их линия называется *главной осью*. Меркурий не повторяет своей орбиты в точности, но движется таким образом, что орбита получается как бы в форме розетки, и главная ось эллипса медленно вращается.

Это могло бы быть объяснено влиянием гравитации ближайших к Меркурию планет, но не полностью. После того как были приняты во внимание все известные гравитационные воздействия, угол, на который действительно поворачивалась главная ось (и две ее крайние точки — перигелий и афелий), оставался чуть больше, чем должен был бы быть, — больше на 43,03 секунды за столетие. Это означало, что главная ось орбиты Меркурия делала полный — к необъяснимый — поворот за 3 000 000 лет.

Леверье, один из первооткрывателей Нептуна, предположил, что между Меркурием и Солнцем находится неоткрытая планета и что воздействие гравитации этой планеты на Меркурий могло привести к этому дополнительному движению перигелия. Однако планета так и не была обнаружена, и, даже если бы она существовала (или если бы пояс планетоидов равной массы существовал бы вблизи Солнца), гравитационное воздействие оказывалось бы также на Венере, а этого не было обнаружено.

Ситуация оставалась загадочной еще семьдесят лет, пока Эйнштейн в 1915 году не объявил, что общая теория относительности изменила взгляд на гравитацию ровно настолько, чтобы ввести дополнительный фактор, который мог бы просчитать необъяснимую часть движения перигелия Меркурия. (Должно иметь место такое же, но гораздо более слабое воздействие на планеты, находящиеся дальше от Солнца, — слишком маленькое, чтобы его можно было точно определить.)

Эйнштейн также предсказал, что гравитация должна влиять на лучи света, что отсутствовало в ньютоновских воззрениях. Свет звезд, проходящий очень близко от Солнца, например, подвергался бы влиянию геометрии пространства и изгибался бы по направлению к центру Солнца. Наши глаза следовали бы за лучом света, мысленно продолжая его новое направление, и мы видели бы звезду дальше от центра Солнца, чем она находится на самом деле. Это воздействие очень мало. Даже если свет проходил у самого края Солнца, видимое положение звезды сдвигалось бы всего на 1,75 секунды, а если свет проходил дальше от Солнца, сдвиг положения звезды был бы еще меньше.

Конечно, свет звезд, проходящий около Солнца, нельзя наблюдать обычным путем, разве что на протяжении нескольких минут во время полного затмения. В то время, когда была опубликована общая теория, шла Первая мировая война и ничего нельзя было сделать. Однако в 1919 году война была окончена и можно было наблюдать полное затмение с острова Принцип в Гвинейском заливе у берегов Западной Африки. Под британским

покровительством на остров была выслана исследовательская экспедиция со специальной целью — проверить общую теорию.

Исследователи замерили положение близких к Солнцу звезд и сравнили с их положением полгода спустя, когда Солнце находилось на другом конце неба. Результаты исследований подтвердили общую теорию.

В конце концов теория Эйнштейна предсказала, что свет должен терять энергию, если он движется против гравитации, и приобретать ее, если «падает», так же как и любой обычный предмет; у предмета, например у мяча, эта потеря энергии будет выражаться в потере скорости. Однако свет может двигаться только с одной скоростью; следовательно, потеря энергии будет выражаться у него в уменьшении частоты и увеличении длины волны. Так, исходя из звезды, свет будет подвергаться небольшому «красному смещению» по мере потери энергии. Но это воздействие так мало, что его нельзя измерить.

Однако недавно были обнаружены такие звезды (*белые карлики*), которые обладают невероятной плотностью и гравитационное поле которых в тысячи раз сильнее, чем поле обычных звезд. Покидая такую звезду, свет теряет достаточную энергию, чтобы его спектральные линии демонстрировали отчетливое красное смещение. В 1925 году американский астроном Уолтер Сидни Адамс (1876—1956) смог изучить спектр белого карлика — звезды, парной звезде Синус, и подтвердить это предсказание Эйнштейна.

Общая теория относительности, таким образом, одержала три победы над прежними воззрениями на гравитацию, но все это были астрономические победы. Только в 1960 году общая теория была привнесена в лабораторную работу.

Ключ к этой лабораторной демонстрации обнаружил в 1958 году немецкий физик Рудольф Людвиг Моссбауэр (р. 1929), показавший, что при определенных обстоятельствах можно сделать кристалл, испускающий пучок гамма-лучей¹ одинаковой длины волны. Гамма-лучи такой длины волны могут поглощаться кристаллом, похожим на тот, которым были произведены. Если гамма-лучи имеют хоть немного отличную длину волны, они не будут поглощаться. Это называется *эффектом Моссбауэра*.

Итак, если такой пучок гамма-лучей испускается вниз так, что он «падает» по направлению гравитации, он набирает энергию и длина его волны становится короче — если общая теория относительности верна. Падая всего лишь на сотню футов, он должен набрать достаточно энергии, чтобы длина волны гамма-лучей

¹ Гамма-лучи являются формой светоподобной радиации, которая будет обсуждаться в III части данной книги.

уменьшилась, хотя и очень незначительно, но достаточно для того, чтобы второй кристалл уже не поглощал этот пучок.

Более того, если испускающий гамма-лучи кристалл движется вверх во время испускания, то длина волны гамма-луча возрастает благодаря эффекту Доплера—Физо. Скорость, с которой кристалл движется вверх, может быть настроена ровно таким образом, чтобы нейтрализовать воздействие гравитации на падающий гамма-луч. Тогда гамма-луч опять будет поглощен кристаллом. Проводившиеся в 1960 году эксперименты с большой точностью подтвердили общую теорию относительности, но это была еще не самая впечатляющая демонстрация ее верности.

Неудивительно, что релятивистский взгляд на Вселенную теперь является общепринятым (по крайней мере, до следующего уточнения) среди физиков всего мира.

Глава 8

КВАНТЫ

Излучение черного тела

Теория относительности не отрицает существования эфира. Однако она устраняет необходимость в нем, а если он не нужен, зачем о нем думать?

Так, отпадает необходимость в эфире как в мериле абсолютного движения, поскольку релятивизм начал с утверждения о том, что такого абсолютного мерил не существует, и закончил демонстрацией отсутствия его необходимости. И опять же эфир не является необходимым в качестве среды для передачи силы гравитации и обеспечения «воздействия на расстоянии». Если гравитация — вопрос геометрии пространства-времени, а не передаваемая сила, то вопрос о возможности воздействия на расстоянии не встает.

Остается еще одно возможное использование для эфира — как среды, в которой передаются световые волны через вакуум. Вторая работа Эйнштейна, изданная в 1905 году (в добавление к его статье о специальной относительности), устранила и эту возможность. Работа Эйнштейна по относительности развилась из парадокса, затрагивающего свет, который проявился в ходе эксперимента Михельсона—Морли (см. гл. 6). Вторая статья Эйнштейна развилась из другого парадокса, также имеющего дело со светом, который возник в последних десятилетиях XIX века (именно за свою вторую статью он позже получил Нобелевскую премию).

Этот второй парадокс начался с работы Кирхгофа по спектроскопии (см. гл. 4). Он показал, что вещество, впитывавшее определенные частоты света лучше, чем остальные, будет также и испускать эти же частоты лучше при нагревании до раскаленного состояния.

Тогда предположим, что кто-либо представил вещество, способное поглощать весь свет всех частот, который падает на него. Такое тело не будет отражать света никакой частоты и соответственно будет совершенно черным. Поэтому естественно называть такое вещество *черным телом*. Если черное тело раскалить, то, по правилу Кирхгофа, его испускание должно быть таким же совершенным, как и его поглощение. Оно должно испускать свет всех частот, поскольку оно поглощает все частоты.

Работа Кирхгофа должна была удовлетворить интерес физиков к количественным аспектам излучения и к тому, как такое излучение изменялось в зависимости от температуры. Общеизвестно было, что излучаемая телом энергия возрастает по мере его нагревания, но количественно это было измерено только в 1879 году австрийским физиком Йозефом Стефаном (1835—1893). Он показал, что вся излучаемая телом энергия возрастает пропорционально четвертой степени разницы в абсолютной температуре. (Абсолютная температура, обозначаемая $^{\circ}\text{K}$, равна температуре по Цельсию, $^{\circ}\text{C}$, плюс 273; см. ч. I.)

Представим себе, к примеру, что при комнатной температуре, 300°K , тело излучает определенное количество энергии. Если температура поднимается до 600°K — температуры плавления свинца, — абсолютная температура удваивается и общее количество излучаемой энергии возрастает в 2^4 , то есть в 16 раз. Если то же самое тело нагреть до температуры 6000°K , какова она на поверхности Солнца, это в двадцать раз большая температура, чем комнатная, и излучает оно в 20^4 , или в 160 000 раз больше энергии.

В 1884 году Больцман (один из разработчиков кинетической теории газов) дал этому открытию твердое математическое обоснование и показал, что оно точно относится только к черным телам и что нечерные тела всегда излучают меньше тепла, чем полагается по закону Стефана. Поэтому такое отношение иногда называют *законом Стефана—Больцмана*.

Но с увеличением температуры меняется не только общее количество энергии. Природа испускаемых волн тоже меняется, и это известно человеку. Для предметов с температурой батарей парового отопления, например (менее 400°K), испускаемое излучение лежит в спектре низкочастотного инфракрасного. Ваша кожа поглощает инфракрасное излучение, и вы

ощущаете его как тепло, но вы ничего не видите. Батарея в темной комнате не видна.

По мере повышения температуры предмета он не только излучает больше тепла, но и частота излучения тоже как-то меняется. К тому моменту, когда температура поднимается до 950°K , тело уже достаточно излучает высоких частот, чтобы воздействовать на сетчатку и чтобы приобретать в наших глазах тусклый красный свет. По мере того как температура еще повышается, красный свет делается еще ярче и в конце концов становится оранжевым, потом — желтым, поскольку испускается все больше и больше света все более высоких частот.

При температуре 2000°K предмет, уже ярко светящийся, все еще испускает много излучения в инфракрасном спектре. Только когда температура достигает 6000°K , температуры поверхности Солнца, тогда большая часть испускаемого излучения лежит в видимой части спектра. (На самом деле, скорее всего, именно потому, что поверхность Солнца имеет определенную температуру, наши глаза и сформировались таким образом, чтобы быть чувствительными именно к этой части спектра.)

Вплоть до конца XIX века физики пытались измерить распределение излучения среди света различных частот на различных температурах. Для того чтобы сделать это точно, требовалось черное тело, поскольку только тогда можно было быть уверенным, что на каждой частоте излучается весь возможный при данной температуре свет. Для нечерного тела определенные частоты с большой долей вероятности должны были излучаться недостаточным образом; точное положение этих частот зависело от химической природы излучающего тела.

Поскольку ни одно существующее тело не поглощает всего света, падающего на него, то ни одно реальное тело не является полностью черным телом, что казалось серьезным затруднением на пути этого направления исследований. Однако в 90-х годах XIX века немецкий физик Вильгельм Вин (1864—1928) придумал оригинальный способ обойти это препятствие.

Представим себе поверхность с отверстием. Свет с любой длиной волны, попадая в это отверстие, упадет на грубую внутреннюю стенку и будет большей частью поглощен. То, что не будет поглощено, будет рассеяно во всех направлениях, так что попадет на другие стенки и будет поглощено там. При каждом контакте со стеной будет происходить дополнительное поглощение, и только крошечная часть света сможет отражаться достаточно долго, чтобы в конце концов снова отразиться из отверстия. Соответственно это отверстие будет выполнять роль совершенного поглотителя (в пределах разумного) и, следова-

тельно, будет представлять собой черное тело. Если поверхность нагреть до определенной температуры и оставить таковой, то излучение, испускаемое из отверстия, будет являться *излучением черного тела* и распределение его частоты можно изучать.

В 1895 году Вьен произвел такое исследование и обнаружил, что при заданной температуре энергия излучалась на определенных частотах, увеличиваясь с возрастанием частоты и достигая максимума, а затем начинала уменьшаться, по мере того как частота поднималась еще выше.

Повышая температуру, Вьен обнаруживал, что на каждой частоте излучается больше энергии и что снова достигается максимум. Однако новый максимум был на большей частоте, чем предыдущий. Фактически, по мере того как он продолжал поднимать температуру, максимум частоты излучения продолжал двигаться в направлении все более и более высоких частот. Значение максимума частоты изменялось напрямую вместе с абсолютной температурой (T), так что *закон Вьена* можно выразить следующим образом:

$$\nu_{\max} = kT. \quad (\text{Уравнение 8.1})$$

где k — это константа отношения.

И закон Стефана, и закон Вьена очень важны для астрономии. Из природы спектра звезды можно узнать величину температуры ее поверхности. А из него можно получить представление о степени, в которой она излучает энергию, и, следовательно, о времени ее жизни. Чем горячее звезда, тем более короткой будет ее жизнь.

Из закона Вьена следует, что цвет звезд определяется их температурой (а не приближением или удалением их от нас, как предполагал Допплер, — см. гл. 5). Красноватые звезды сравнительно холодные, температура их поверхности 2000—3000 °К. Оранжевые звезды имеют температуру поверхности 3000—5000 °К, а желтые (такие, как наше Солнце) — 5000—8000 °К. Есть еще белые звезды, температура поверхности которых 8000—12 000 °К, а голубоватые звезды еще горячее.

Постоянная Планка

Тут возникает парадокс, поскольку остается загадкой, почему излучение черного тела должно распространяться именно так, как наблюдал Вьен. В 90-х годах XIX века физики считали, что излучающее тело случайным образом выбирает частоту,

на которой излучает. Высокочастотное излучение предоставляет гораздо больший выбор, чем низкочастотное (так же как гораздо больше больших целых положительных чисел, чем малых), и, если бы излучение выбиралось случайным образом, гораздо чаще выбирались бы высокие частоты, чем низкие.

Лорд Рейлиф разработал уравнение, основанное на допущении, что все частоты могут быть излучаемыми с равной вероятностью. Он обнаружил, что количество энергии, излучаемой на определенном спектре частот, изменяется пропорционально четвертой степени частоты. Свет фиолетовой волны должен излучать в 16 раз больше энергии, чем свет красной волны, а в ультрафиолете должно излучаться еще больше. Фактически, по формуле Рейлифа, почти вся энергия излучающего тела будет излучаться очень быстро в глубоком ультрафиолете. Некоторые называли это «фиолетовой катастрофой».

Однако самым интересным касательно фиолетовой катастрофы стало то, что ее так и не произошло. Если быть точным, на самых низких частотах уравнение Рейлифа соответствовало истине и количество излучения быстро возрастало. Но вскоре количество излучения начало быстро падать по отношению к ожидаемому. Оно достигло максимума на некоей средней частоте, хотя этот максимум и был гораздо ниже ожидаемого по уравнению Рейлифа, а затем на еще более высоких частотах количество излучения начало уменьшаться, в то время как формула Рейлифа прогнозировала постоянное увеличение.

С другой стороны, Вьен разработал уравнение, которое должно было отражать то, что действительно наблюдалось на высоких частотах. К сожалению, оно не совпадало с реальностью на низких частотах.

В 1899 году немецкий физик Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (1858—1947) взялся за решение этой проблемы. Анализ Рейлифа, как показалось Планку, был математически и логически верен при условии принятия его аксиом, а поскольку уравнение Рейлифа не соответствовало фактам, необходимо было проверить аксиомы. Что, если не все частоты излучаемы с одинаковой вероятностью? Поскольку аксиома об одинаковой вероятности требовала, чтобы излучалось все больше и больше света на все более и более высоких частотах, в то время как наблюдения показывали обратное, Планк предположил, что вероятность излучения уменьшалась с увеличением частоты.

Так, на распространение излучения черного тела будут влиять два фактора. Во-первых, непреложный факт того, что высоких частот больше, чем низких, следовательно, должна иметь место тенденция излучать больше высокочастотного, чем низ-

кочастотного света. Во-вторых, поскольку вероятность излучения уменьшается по мере повышения частоты, должна иметься тенденция излучать меньше в высокочастотной части спектра.

На самых низких частотах, где вероятность излучения довольно высока, первый фактор доминирует и излучение увеличивается с повышением частоты, в соответствии с формулой Рейлифа. Однако по мере дальнейшего возрастания частоты большее значение приобретает второй эффект. Все большее число высоких частот более чем уравнивается все меньшей вероятностью излучения на столь высоких частотах. Количество излучения начинает прибавляться все медленнее по мере продолжения увеличения частоты, достигает максимума, а затем начинает уменьшаться.

Предположим, что температура повышается. Это не отменяет первого фактора, поскольку тот факт, что высоких частот больше, чем низких, оспариванию не подлежит. Однако что, если подъем температуры увеличивает вероятность излучения на более высоких частотах? Тогда второй фактор может быть ослабленным. В этом случае излучение (при более высоких температурах) будет продолжать увеличиваться на более высоких частотах еще долгое время до того, как этот фактор будет преодолен и подавлен ослабленным вторым фактором. Максимум излучения, следовательно, сдвинется в более и более высокие частоты по мере повышения температуры. Именно это и наблюдал Вьен.

Но как рассчитать закономерность, по которой вероятность излучения понижается по мере повышения частоты? Планк предположил, что энергия не течет непрерывно (что физики считали само собой разумеющимся), а состоит из отдельных частей. Другими словами, Планк представил, что существуют «атомы энергии» и что излучающее тело может отдать один атом энергии или два атома энергии, но никогда не пол-атома энергии, и в любом случае излучаться должно целое число таких атомов. Более того, Планк пришел к предположению, что содержание энергии в таком атоме энергии должно зависеть напрямую от частоты света, на которой он излучается.

Планк назвал эти атомы энергии *квантами* (от латинского «сколько?»), поскольку под критическим вопросом оставался размер кванта.

Представим себе выводы из этой *квантовой теории*. Фиолетовый свет, частота которого в два раза больше частоты красного, должен будет излучать кванты в два раза большие, чем красный. Ни один квант фиолетового цвета не может быть излучен, пока не наберется достаточно энергии до полного кванта, поскольку

меньше энергии, чем квант, по утверждениям Планка, излучать нельзя. Однако оставалась вероятность, что до того, как наполнить квант фиолетового света, набиралось достаточно энергии, часть ее могла оторваться, чтобы сформировать квант красного света, в два раза меньшего размера.

Чем выше частота света, тем меньше вероятность того, что успеет собраться достаточно энергии, чтобы сформировать полный квант до того, как он оторвется для формирования требующего меньше энергии кванта меньшей частоты. Это объясняет, почему «фиолетовой катастрофы» не случилось и почему свет излучается по большей части на низких частотах и медленнее, чем можно было бы ожидать.

С повышением температуры общее количество энергии, доступной для излучения, возрастает пропорционально четвертой степени абсолютной температуры. В таком возрастающем потоке излучения будет все более и более вероятно, что кванты более высокочастотного света будут успевать сформироваться. Таким образом, как утверждал Планк, будет возрастать вероятность излучения на высоких частотах и максимум излучения будет сдвигаться в направлении более высоких частот. При температурах в 6000 °К максимум будет лежать в видимой части спектра, хотя еще и тогда большие кванты ультрафиолета будут формироваться в небольших количествах.

Если энергетическое содержание (e) кванта излучения пропорционально частоте этого излучения (ν), то можно сказать, что:

$$e = h\nu, \quad (\text{Уравнение 8.2})$$

где h — константа отношения, обычно именуемая *постоянной Планка*. Если мы решим уравнение 8.2 для h , мы увидим, что $h = e/\nu$. Поскольку единицы измерения e в системе СГС — эрги, а ν — обращенные секунды (1/секунды), то единицы измерения h — эрги, деленные на обращенную секунду, то есть эрги, умноженные на секунду, или «эрго-секунды». Энергия, умноженная на время, и есть то, что физики называют *действием*. Соответственно можно сказать, что размерность постоянной Планка — единицы измерения действия.

Планк получил уравнение, содержащее h , такое, что, с его помощью, как он обнаружил, можно описать распространение излучения черного тела, соответствующее наблюдаемому, на широком промежутке частот. В конце концов он сделал это, придав h соответствующее, очень малое значение. Самое точное современное значение $h = 0,0000000000000000000000000000066\ 256$ эрго-секунд, или $6,6256 \times 10^{-27}$ эрго-секунд.

Чтобы понять, что это значит, давайте представим, что оранжевый свет с длиной волны 6000 Å имеет частоту 50 000 000 000 000 000, или 5×10^{16} колебаний в секунду. Если умножить это на постоянную Планка, мы увидим, что энергетическое содержание кванта оранжевого света — $5 \times 10^{16} \times 6,6256 \times 10^{-27}$, или около $3,3 \cdot 10^{-10}$ эрга. Это примерно три миллиардных эрга, а сам эрг — лишь маленькая единица измерения энергии.

Неудивительно, что до Планка отдельные кванты излучаемой энергии не наблюдались.

Квантовая теория Планка, о которой было объявлено в 1900 году, оказалась водоразделом в истории физики. Все физические теории, не рассматривавшие кванты, а считавшие энергию постоянной, иногда объединяют в группу *классической физики*, в то время как физические теории, рассматривающие кванты, считают *современной физикой*, а 1900 год является удобной точкой раздела.

Но в свое время теория Планка особого шума не вызвала. Сам Планк не видел для нее другого применения, кроме описания того, как распределяется излучение черного тела, и физики были не готовы настолько радикально изменить свои воззрения на энергию только для того, чтобы одержать эту конкретную победу. Сам Планк и то колебался и временами пытался обрисовать свою квантовую теорию таким образом, чтобы она была как можно ближе к классическим воззрениям, предполагая, что энергия принимает форму квантов, только будучи излучаемой, и что поглощается она сплошным потоком.

И снова, оглядываясь назад, мы можем увидеть, что кванты могли бы объяснить множество фактов о поглощении света, которые не в силах объяснить классическая физика. Во времена Планка было хорошо известно, что фиолетовый свет гораздо действеннее, чем красный, производит химические реакции и что ультрафиолетовый свет еще действеннее в этом плане. Прекрасным примером была фотография, поскольку фотопленка, которую использовали в XIX веке, была очень чувствительна к фиолетовому краю спектра и довольно нечувствительна к красному.

На самом деле ультрафиолетовый свет был открыт за столетие до Планка по его явному воздействию на нитрат серебра (см. гл. 5). Разве не закономерно было бы предположить, что большие кванты ультрафиолетового света могут производить химические реакции с большей легкостью, чем маленькие кванты красного света? И разве нельзя сказать, что картина только проявится, если посчитать, что энергия поглощается только целыми квантами?

Однако этот аргумент не был использован для того, чтобы квантовая теория стала применяться к поглощению. Вместо этого Эйнштейн использовал похожий аргумент в связи с открытым позже еще более впечатляющим явлением.

Фотоэлектрический эффект

За два последних десятилетия XIX века было обнаружено, что некоторые металлы ведут себя так, как будто отдают электричество под воздействием света. В то время физики начали понимать, что электричество связано с движением субатомных частиц, именуемых *электронами*, и что воздействие света заключается в том, что он приводит к испусканию электронов из металлических поверхностей. Это *фотоэлектрический эффект*.

При дальнейшем изучении фотоэлектрический эффект представал полной загадкой. Казалось очевидным, что в обычных условиях электроны закреплены в структуре металла и что для того, чтобы разорвать это закрепление и высвободить электроны, требуется затратить определенное количество энергии. Еще казалось, что по мере увеличения интенсивности света все больше и больше энергии передавалось металлической поверхности. Тогда электроны не только высвобождаются, но и вылетают с огромной скоростью. Чем интенсивнее свет, тем больше скорость. Представлялось, что частота света не влияет на этот эффект и важна только общая энергия света, каковой бы ни была его интенсивность.

Так казалось, но было не так.

Немецкий физик Филипп Ленард (1862—1947) после тщательного исследования в 1902 году обнаружил, что для каждой поверхности, на которой обнаруживался фотоэлектрический эффект, имелась определенная *пороговая частота*, выше которой, и только выше которой наблюдался эффект.

Предположим, например, что для конкретной поверхности эта пороговая частота — 500 квадриллионов колебаний в секунду (это частота оранжевого света с длиной волны 6000 Å). Если свет меньшей частоты, например красный свет 420 квадриллионов колебаний в секунду, падает на такую поверхность, ничего не происходит. Электроны не выпускаются. Не важно, насколько ярк или интенсивен свет и сколько энергии в нем содержится, — электроны не выпускаются.

Однако, если частоту света поднять до 500 квадриллионов колебаний в секунду, электроны начинают испускаться, но практически лишеными кинетической энергии. Как будто полученной

ими из света энергии только-только хватило, чтобы разорвать силу, удерживающую их на поверхности, но уже не хватило на то, чтобы снабдить их еще и кинетической энергией. Ленард обнаружил, что повышение интенсивности света на этой пороговой частоте никоим образом не добавляло электронам кинетической энергии. В результате возросшей интенсивности больше электронов испускается с поверхности в количестве, пропорциональном энергии оранжевого света, но всем им недостает кинетической энергии.

Если частоту увеличивать еще дальше и взять фиолетовый свет в 1000 квадриллионов колебаний в секунду, электроны будут испускаться с приличным количеством кинетической энергии. Количество испускаемых электронов будет изменяться пропорционально общей энергии света, но опять же они все будут иметь одинаковую кинетическую энергию.

Другими словами, слабый фиолетовый свет приведет к испусканию немногих электронов с высокой энергией; интенсивный оранжевый свет приведет к испусканию большого количества электронов с низкой энергией, а красный свет даже чрезвычайной интенсивности вообще не приведет к испусканию электронов.

В рамках физических теорий XIX века просчитать это было невозможно, но в 1905 году Эйнштейн разработал объяснение, в котором использовалась квантовая теория Планка, которой было уже пять лет, но которая еще не получила признания.

Эйнштейн решил, что свет не только излучается в виде квантов, как установил Планк, но и поглощается в виде квантов. Когда свет падает на поверхность, электроны, закрепленные на поверхности, поглощают энергию по кванту за раз. Если энергии одного кванта оказывалось достаточно для преодоления сил, удерживающих его на поверхности, он высвобождался, иначе — нет.

Конечно, электрон может предположительно набрать достаточно энергии, чтобы оторваться и поглотить второй квант, если не хватило первого. Однако это маловероятно. Чрезмерно велика вероятность, что до того, как он успеет поглотить второй квант, он уже излучит первый. Следовательно, один квант должен проделать работу самостоятельно; если это не так, просто умножается количество квантов (которые сами по себе не могут проделать эту работу) и ничего не получается. То же самое, как если человек недостаточно силен, чтобы поднять камень в одиночку, то даже миллион человек такой же силы не смогут поднять его, подвоя по очереди. Камень останется на месте.

Однако размер кванта возрастает с повышением частоты. На пороговой частоте квант является лишь достаточно большим.

чтобы преодолеть силу, удерживающую электрон на конкретной поверхности. По мере того как возрастает частота (и энергетическое содержание кванта), все больше и больше энергии будет оставаться после высвобождения электрона для перевода в кинетическую энергию.

Для каждого вещества имеется отдельная характеризующая его пороговая частота, зависящая от того, насколько сильно электроны удерживаются своим веществом. Для такого металла, как цезий, в котором электроны привязаны очень слабо, пороговая частота находится в инфракрасном спектре. Даже небольшие кванты инфракрасного света несут достаточно энергии, чтобы разорвать эту слабую связь. Для такого металла, как серебро, в котором электроны держатся сильнее, пороговая частота лежит в ультрафиолетовой части спектра.

Тогда Эйнштейн предложил следующее отношение:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - w, \quad (\text{Уравнение 8.3})$$

где $\frac{1}{2}mv^2$ — кинетическая энергия испускаемого электрона; $h\nu$ (постоянная Планка на частоту) — энергетическое содержание кванта, поглощаемого поверхностью; а w — энергия, требуемая для того, чтобы электрон оторвался от поверхности. На пороговой частоте электроны только-только могут отрываться и обладать кинетической энергией не будут. По этой причине уравнение 8.3 примет вид $0 = h\nu - w$; а это будет означать, что $h\nu = w$. Другими словами, w будет представлять энергию светового кванта на пороговой частоте.

Предложенное Эйнштейном объяснение фотоэлектрического эффекта было таким элегантным и так хорошо соответствовало наблюдениям, что квантовая теория внезапно обрела популярность. Изначально она была разработана для того, чтобы объяснять факты излучения, а теперь внезапно оказалось, что она без изменений может объяснить фотоэлектрический эффект — совершенно иное явление. Это больше всего впечатляло.

Еще большее впечатление это произвело в 1916 году, когда американский физик Роберт Эндрюс Милликен (1868—1953) провел тщательные эксперименты, в ходе которых измерил энергию электронов, испускаемых светом различных частот, и обнаружил, что энергии, которые он измерял, в точности соответствовали уравнениям Эйнштейна. Более того, измеряя энергию электронов ($\frac{1}{2}mv^2$), частоту используемого света (ν) и пороговую частоту для используемой поверхности (w), он смог вывести значение h (постоянной Планка) из уравнения 8.3. Он получил значение, очень

близкое к тому, которое получил Планк в своем уравнении излучения.

С 1916 года квантовая теория получила среди физиков всеобщее признание. Теперь стало принято считать, что энергия может излучаться и поглощаться только целым числом квантов и фактически что вся энергия во всех своих формах «квантизирована», то есть может рассматриваться только как состоящая из неделимых квантов. В дальнейшем из этой концепции был выдвинут самый полезный взгляд на строение атома, как мы увидим в III части этой книги.

Фотоны

Эйнштейн довел понятие квантов до логического завершения. Квант казался аналогичным «атому энергии», или «частице энергии», поэтому почему бы не посчитать такие частицы именно частицами? Тогда свет будет состоять из частиц, которые в конце концов назвали *фотонами* (от греческого слова, означающего «свет»).

Это представление повергло физиков в шок. Волновая теория света установилась всего за 100 лет до этого и на протяжении столетия одерживали победу за победой, пока теория частиц Ньютона не была похоронена и предана полному забвению. Если же свет в конце концов состоял из частиц, то что же делать со всеми свидетельствами, которые неопровержимо говорили о его волновой природе? Что же теперь делать с экспериментами интерференции, поляризации и т. д.?

Ответ не имеет с этим ничего общего. Просто неверно считать, что объект может быть *или* частицей, *или* волной. Совершенно так же можно спорить и о том, что *или* мы находимся вверх головой, а австралийцы вниз головой, *или* мы вниз головой, а австралийцы — вверх. Фотон является и частицей, и волной в зависимости от точки зрения. (Некоторые физики по-прежнему говорят о «волночастицах».) Фактически можно выйти за рамки этого противопоставления (как я объясню в дальнейшем, в III части этой книги) и настаивать на том, что все фундаментальные единицы Вселенной одновременно являются *и* волнами, *и* частицами.

Трудно принять подобное утверждение, потому что почти неизбежно возникает вопрос: «Но как один и тот же объект может быть одновременно и волной и частицей?»

Проблема здесь в том, что мы автоматически рассуждаем о незнакомых объектах как о знакомых; мы описываем новые

явления, говоря «атом похож на бильярдный шар», или «световые волны — это как волны на воде». Но на самом деле это значит только, что некоторые конкретные свойства атомов или световых волн напоминают аналогичные свойства бильярдных шаров или волн на воде. Не все свойства соответствуют: атом не такой большой, как бильярдный шар; световая волна не такая мокрая, как волна на воде.

У бильярдного шара есть свойства и волны, и частицы. Однако свойства частицы в нем так очевидны, а свойства волны так неприметны и неопределимы, что мы думаем о бильярдном шаре только как о частице. Волны на воде тоже имеют свойства и волны, и частицы, но именно свойства волны очевидны, а свойства частицы незаметны. Фактически все обычные предметы чрезвычайно разбалансированы в этом отношении, поэтому мы и пришли к выводу, что предмет может быть либо частицей, либо волной.

Фотон же, из которых состоит свет, лучше уравновешены в этом отношении. В них очевидны и свойства волны, и свойства частицы. В нашем повседневном опыте сравнить их не с чем. Однако только из-за того, что мы не имеем знакомого аналога, мы не должны считать, что волночастица «противоречит здравому смыслу» или является парадоксом или, что хуже того, «ученые не смогли прийти к решению».

Мы увидим это яснее, если выберем не прямую аналогию. Представьте себе конус из твердого вещества, например из стали. Если перевернуть такой конус, выровняв его основание по линии горизонта, он покажется треугольным. Держа его таким образом, его можно пронести сквозь треугольное отверстие в стальном листе, но не сквозь круглое отверстие такой же площади.

Представим, что конус повернули острием к глазу. Теперь его граница кажется круглой. В этой ориентации он пройдет через круглое отверстие в стальном листе, но не сквозь треугольное отверстие такой же площади.

Если два наблюдателя, знакомые с двумерной плоскостной геометрией, но не с трехмерной объемной геометрией, проведут такие эксперименты, один будет с жаром настаивать, что конус треугольный, поскольку проходит сквозь треугольное отверстие, а другой будет утверждать с таким же пылом, что конус круглый, потому что проходит сквозь круглое отверстие. Они будут спорить целую вечность и не придут к выводу.

Если этим двум наблюдателям сказать, что они оба частью правы, а частью не правы и что объект их спора имеет свойства как треугольника, так и круга, их первой реакцией (в ос-

нове которой будет лежать двухмерный опыт) будет ярость — как это предмет может быть одновременно и кругом, и треугольником?

Однако конус не то чтобы являлся и кругом, и треугольником, но он имеет как круглое, так и треугольное сечения, а это означает, что часть его свойств — свойства круга, а часть — свойства треугольника.

Таким же образом фотоны в каких-то аспектах имеют свойства волны, а в каких-то — свойства частицы. Волнообразные свойства их, так красиво продемонстрированные в XIX веке, были результатом экспериментов, нацеленных на то, чтобы обнаружить волновой аспект света (как в случае правильного расположения конуса для того, чтобы показать, что он треугольный).

Частицеобразные свойства оказались не так легко продемонстрировать. Точнее говоря, в 1901 году русский физик Петр Николаевич Лебедев (1866—1911) показал, что свет оказывает очень малое давление. Зеркало, повешенное в вакууме на тонкой нити, реагировало на это давление, поворачиваясь и перекручивая нить. Это давление оказалось возможным измерить по небольшому закручиванию нити, происходившему в тот момент, когда луч света попадал на зеркало.

В некоторых условиях, как показал Лебедев, давление излучения оказывается более сильным, чем гравитация. Замерзшие газы, составляющие поверхность кометы, испаряются, когда комета приближается к Солнцу, и частички пыли, обычно удерживающиеся на месте замерзшим газом, освобождаются. На эти частички действуют как незначительная сила притяжения кометы, так и давление огромного солнечного излучения. Необычно большое давление излучения сильнее, чем необычно малая гравитация, и частички пыли частично сдуваются излучением, которое распространяется по всем направлениям от Солнца.

Именно так и появляется хвост кометы, состоящий из света, отраженного от этих дылинок, и всегда направленный от Солнца. Так, если комета удаляется от Солнца, хвост движется впереди нее. Эта ориентация хвоста кометы заставила немецкого астронома Иоганна Кеплера заявить о давлении излучения за три века до того, как его существование было продемонстрировано в лаборатории.

Существование давления излучения может, как правило, служить примером частицеобразных свойств света, если мы посчитаем это давление результатом бомбардировки частицами, как давление газа (см. ч. I). Однако в 1873 году Максвелл (который тоже работал над кинетической теорией газов) показал, что есть

хорошие теоретические аргументы в пользу того факта, что световые волны могут оказывать давление излучения и как волны, а не как частицы.

Более чистый пример частицеобразных свойств был показан в 1922 году американским физиком Артуром Холли Комптоном (1892—1962). Он обнаружил, что, проникая в вещество, рентгеновский луч (это очень высокочастотная форма света, более подробно она будет обсуждаться в III томе этой книги) иногда ударял электроны и не только оказывал таким образом давление, но и сам преломлялся! При преломлении частота его несколько возрастала, а это означало, что рентгеновский луч терял энергию.

С другой стороны, электрон отскакивал в таком направлении, которое высчитывалось из преломления рентгеновского луча, и приобретал ровно столько энергии, сколько луч терял. Это преломление и переход энергии были полностью аналогичны тому, что случилось бы, если бы электрон столкнулся с электроном или, возвращаясь к сказанному, если бы бильярдный шар столкнулся с бильярдным шаром. Этот эффект Комптона наглядно продемонстрировал, что фотон рентгеновского луча может действовать как частица.

Были хорошие причины полагать, что чем более энергичен фотон, тем более очевидными становятся его частицеобразные свойства по сравнению с волнообразными. Следовательно, эффект Комптона легче было продемонстрировать на фотоне рентгеновского луча, чем на менее энергетичных фотонах видимого света, но результат его относится ко всем фотонам. Частицеобразная природа фотонов с тех пор не подвергалась сомнению.

В то время как некоторые эксперименты освещали волнообразные свойства света, а некоторые — частицеобразные, даже не планировался эксперимент, который показал бы, что свет ведет себя одновременно и как волна, и как частица (таким же образом, конус может быть сориентирован и так, чтобы проходить сквозь треугольник, и так, чтобы проходить сквозь круг, но не так, чтобы проходить через оба отверстия). Датский физик Нильс Бор (1865—1962) установил, что придумать эксперимент, в котором свет вел бы себя одновременно и как волна, и как частица, просто невозможно в принципе. Его назвали *принципом дополнительности*.

Это не так страшно для ученых, как звучит. Мы привыкли определять общую форму трехмерного тела, изучая его сначала с одной стороны, затем с другой, а потом объединяя в воображении собранную таким образом информацию. Мы не стремимся видеть предмет со всех сторон одновременно и не дума-

ем, что, только глядя со всех сторон одновременно, можно понять истинную форму предмета. Фактически, если бы мы могли его видеть со всех сторон, мы получили бы замешательство вместо просветления, как когда мы видим портрет работы Пикассо, на котором женщина нарисована одновременно и в профиль, и анфас.

Если рассматривать свет как имеющий свойства и частицы, и волны, то действительно отпадает нужда в светоносном эфире, так же как не нужен нам эфир ни для объяснения гравитации, ни в качестве меридала абсолютного движения.

Сколько бы свойств волны ни демонстрировал свет, его перемещение в вакууме делает очевидными его частицеобразные свойства. Фотоны летят сквозь бесконечные толщи вакуума точно так же, как, по описанию Ньютона, должны были лететь его менее сложные частицы.

Следовательно, когда релятивизм и квантовая теория стали общепринятыми, скажем к 1920 году, — физики перестали думать об эфире.

Но даже если считать свет состоящим из фотонов, это не отменяет того факта, что фотоны имеют волновой аспект — что-то все же колеблется. Так что же колеблется и является ли это что-то материальным?

Чтобы дать ответ на этот вопрос, давайте вспомним два явления, которые с древних времен были примерами того, что казалось воздействием на расстоянии. На это у нас уйдет несколько глав, но ответ в конце концов будет дан.

Глава 9

МАГНЕТИЗМ

Магнитные полюса

Силы притяжения между телами, несомненно, наблюдались с доисторических времен, но (по крайней мере, так принято считать) первым из древних греков, кто систематически принял за изучение сил притяжения, был Талес (640?—546 до н. э.).

Одна из таких сил притяжения касалась железа и железной руды. Некоторые встречающиеся в природе виды железной руды (магнитный железняк), как обнаружилось, притягивали железо и, как могли заметить древние, больше ничего. Талес жил в городе Милет (на побережье Эгейского моря, ныне в Турции), и те образцы магнитного железняка, которые он изучал, предположительно были из окрестностей соседнего города Магнезии. Талес

назвал его «магнетианским камнем», а притягивающие железо материалы получили соответственно название *магниты*, поскольку само явление получило название *магнетизм*.

Талес обнаружил, что янтарь (окаменевшая смола, которую греки называли «электрон»), если его натереть, тоже излучает силу притягивания. Она отличалась от магнетической силы, поскольку магнетизм действовал только на железо, а натертый янтарь — на любой легкий предмет: пух, перья, куски сухих листьев. В поздние века были найдены и другие, кроме янтаря, предметы, которые, будучи натертыми, проявляли подобные свойства, и в 1600 году английский физик и врач Уильям Гильберт (1540—1603) предположил, что все такие объекты можно называть «электрическими» (от греческого слова, означавшего «янтарь»). Отсюда и стало к этому явлению применяться слово «электричество».

Магнетизм, хотя и более ограниченная сила, казался в тех экспериментальных условиях, которые по большей части имелись в древности и в Средние века, гораздо более сильным. Следовательно, именно магнетизм тщательно изучали две тысячи лет после Талеса.

Например, было обнаружено, что свойства магнетизма могут передаваться. Если стальной сердечник вставить в естественный магнитный железняк, он сам становится магнитом и может притягивать куски железа, хотя раньше этого не делал.

Более того, если такую намагниченную стрелку положить на пробку и пустить плавать по воде или если закрепить ее на оси так, чтобы она могла свободно вращаться, обнаружилось, что иголка не принимала любое положение случайно, а ориентировалась строго определенным образом. Эта ориентация строго приближалась к линии север—юг. И еще — если один конец намагниченной иголки пометить каким-нибудь образом, быстро становилось очевидным, что один ее конец всегда показывал на север, а другой — всегда на юг.

Поскольку концы намагниченной иголки показывали, как казалось, на полюса Земли, то начали говорить о том ее конце, что показывал на север, как о *северном полюсе магнита*, а о втором — как о *южном полюсе магнита*.

Людам не могло не прийти в голову, что если северный полюс свободно движущейся намагниченной стрелки всегда показывает на север, то это же великолепный способ ориентироваться в пространстве! До тех пор днем ориентировались по Солнцу, ночью — по Полярной звезде, но это годилось только в хорошую погоду.

Предполагается, что китайцы использовали намагниченную стрелку в качестве указателя направления, когда пролагали пути

через однообразные пустыни Средней Азии. Однако первое использование такой иголки в морских путешествиях отмечено среди европейцев в XII веке. В конце концов стрелку разместили на карте, по ободку которой были отмечены различные направления. Поскольку эти направления окружали ободок карты, намагниченная игла получила название *компас* (от англ. *compass* — окружать).

Несомненно, компас принадлежит к тем простым изобретениям, которые изменили мир. Люди могли пересекать обширные океаны и без компаса (около двух тысяч лет назад полинезийцам удалось колонизировать разбросанные по Тихому океану острова без всяких компасов), но компас значительно помог им. И не случайно именно после изобретения компаса, когда европейцы стали смело выливаться в Атлантический океан, начался «век Великих географических открытий».

К полюсам магнита железо притягивается с наибольшей силой. Если намагниченную иголку закопать в металлические опилки и потом поднять, опилки гуще всего соберутся на концах. В этом смысле магнит любой формы имеет полюса, которые можно разметить подобным образом. И полюса не образуются поодиночке. Если можно определить северный полюс, то можно определить и южный, и наоборот.

И не сложно отличить северный полюс от южного, даже не располагая магнит на карте. Предположим, что две намагниченные стрелки свободно сориентировались в направлении север—юг и что определен северный полюс каждой. Если северный полюс одного магнита поднести к южному полюсу другого, два полюса будут взаимно притягиваться и, если дать им соприкоснуться, так и будут соприкасаться. Чтобы разделить их, придется приложить силу.

С другой стороны, если северный полюс одного магнита поднести к северному полюсу другого, возникнет взаимное отталкивание магнитов. То же самое произойдет, если южный полюс одного поднести к южному полюсу другого. Если магнитам дать свободно вращаться, они развернутся и спонтанно переориентируются так, чтобы северный полюс одного смотрел на южный полюс другого. Если северный полюс одного притянуть к северному полюсу другого или южный к южному, то они разделятся, как только магниты отпустят. Чтобы оставить их в контакте, потребуется приложить силу.

Итог можно подвести так: одинаковые полюса отталкиваются, разные полюса притягиваются.

Когда северный полюс магнита определен, его можно использовать для определения полюсов любого другого магнита.

Любой полюс, к которому он притягивается, — южный полюс. Любой полюс, от которого он отталкивается, — северный полюс. Впервые это было установлено в 1269 году одним из немногих экспериментаторов Средневековья французом Петером Перегринусом.

(В свете этого, наверное, правильнее было бы называть северный полюс магнита, притягиваемый Северным полюсом Земли, южным полюсом. Однако тут уже поздно что-то менять.)

Легко увидеть, что сила, исходящая из магнитного полюса, изменяется обратно пропорционально расстоянию. Если дать северному полюсу магнита приблизиться к южному полюсу другого, то можно почувствовать, как сила притяжения становится сильнее. Таким же образом, если подтолкнуть северный полюс одного магнита к северному полюсу другого, можно почувствовать, как сила отталкивания становится сильнее. Чем меньше расстояние, тем больше сила.

Конечно же мы не можем говорить отдельно о северном полюсе или южном полюсе. Каждый северный полюс сопровождается южным. Следовательно, если северный полюс магнита А притянут к южному полюсу магнита В, то южный полюс магнита А должен одновременно отталкивать южный полюс магнита В. Это, кажется, осложняет ситуацию.

Однако если использовать длинные тонкие магниты, то источник затруднений сводится к минимуму. Северный полюс магнита А близок к южному полюсу магнита В, в то время как южный полюс магнита А (на другом конце длинного куска металла) находится достаточно далеко. Создающая помехи отталкивающая сила южного полюса ослаблена из-за этого дополнительного расстояния и может быть легко проигнорирована.

В 1785 году французский физик Шарль Огюстен де Кулон (1736—1806) измерил силу между магнитными полюсами на различных расстояниях, используя для этих целей тонкие перекрученные весы. Так, если одна магнитная стрелка подвешена на тонкой нити, притяжение (или отталкивание) другого магнита к одному из полюсов подвешенной стрелки заставит подвешенную стрелку несколько перекрутиться. Сделав это, она перекрутит и нить, на которой подвешена. Нить будет сопротивляться дальнейшему перекручиванию с силой, зависящей от того, насколько она уже перекручена.

Заданная сила всегда будет производить заданное перекручивание, а из этого перекручивания можно будет высчитать и размер неизвестной силы. (Пятнадцать лет спустя Кавендиш использовал подобные весы для измерения слабых гравитаци-

онных сил, см. ч. I; а столетием позже Лебдев определял с их помощью давление света, см. гл. 8.)

Производя свои измерения, Кулон обнаружил, что магнетическая сила изменялась обратно пропорционально квадрату расстояния, как и в случае с гравитационной силой. Так, магнитная сила падала до одной четвертой от своего первоначального значения, когда расстояние возрастало вдвое, и увеличивалась в девять раз, когда расстояние сокращалось до трети своей изначальной величины. Это оставалось верным, независимо от того, рассматривалась ли сила притяжения или отталкивания.

Это может быть выражено математически следующим образом: если магнитную силу между полюсами принять за F , силу двух полюсов за m и m' , а расстояние между ними за d , то:

$$F = \frac{mm'}{d^2}. \quad (\text{Уравнение 9.1})$$

Если расстояние измерять в сантиметрах, то сила будет определяться в динах (где одна дина определяется как 1 грамм на сантиметр в секунду за секунду, см. ч. I). Предположим затем, что два полюса равной интенсивности разделены расстоянием в 1 см и что сила магнитного притяжения — 1 дина. Тогда оказывается, что $m = m'$ и, следовательно, $mm' = m^2$. Тогда, раз и d взяты равными 1, то из уравнения 9.1 следует, что в этих условиях $m^2 = 1$ и, следовательно, $m = 1$.

Значит, можно говорить о *полюсных единицах* как о представляющих полюса такой силы, что, будучи разделенными на 1 сантиметр, они испускают магнитную силу (притяжения или отталкивания — не важно) в 1 дину. В уравнении 9.1, где F измеряется в динах, а d — в сантиметрах, m и m' измеряются в полюсных единицах.

Если магнитное поле в 5 полюсных единиц выдает силу в 10 дин на полюсную единицу в определенной точке, то интенсивность магнитной силы — 2 дин на магнитную единицу. Одна дина на магнитную единицу определяется как 1 эрстед (в честь датского физика Ханса Кристиана Эрстеда, вклад которого в изучение магнетизма будет изложен в гл. 12). Эрстед — единица измерения магнитной силы на полюсную единицу, или *напряженности магнитного поля*, что обычно обозначается как H . Тогда мы можем сказать, что $H = F/m$, или

$$F = mH, \quad (\text{Уравнение 9.2})$$

где F — магнитная сила, измеряемая в динах; m — значение в полюсных единицах; H — магнитная напряженность в эрстедах.

Магнитные области

В существовании и северного, и южного полюсов и в вытекающем из этого существовании магнитного отталкивания и магнитного притяжения заключается ключевое отличие магнетизма от гравитации. Сила гравитации заключается только в притяжении, и никакой соответствующей силы гравитационного отталкивания обнаружено еще не было.

Поэтому гравитационная сила всегда максимальна, какие-либо нейтрализующие эффекты отсутствуют. Тело, имеющее массу Земли, всегда будет иметь одно и то же гравитационное притяжение независимо от своей температуры или химического состава.

С другой стороны, магнитное притяжение всегда может быть в той или иной степени нейтрализовано магнитным отталкиванием, так что магнитные воздействия будут происходить только с определенными видами материи, и то с сильно различающейся силой.

Можно ожидать (и, как мы увидим в III части этой книги, ожидание это окажется верным), что магнетизм имеет широкое распространение в природе и что магнитные силы существуют во всех видах материи. Тогда материю можно рассматривать как состоящую из микроскопических магнитов. В пользу этого воззрения (по крайней мере, в случае железа и стали) можно отнести тот давно обнаруженный факт, что если длинную намагниченную иголку поломать пополам, то обе половинки будут магнитами. Край перелома напротив первоначального северного полюса становится южным полюсом; край перелома напротив изначального южного полюса становится северным полюсом. Это будет повторяться столько раз, сколько раз сломают иголку. Легко представить, что, если первоначальную иголку разломать на микроскопические кусочки, каждый из них будет крошечным магнитом и будет иметь свой северный и южный полюса.

Эти микроскопические магниты в большинстве веществ и в большинстве условий будут сориентированы случайным образом, так что не будет (или почти не будет) концентрации на северных полюсах (или южных полюсах) в каком-либо направлении и, следовательно, магнитная сила будет обнаруживаться незначительная либо не будет обнаруживаться вовсе. Однако в некоторых встречающихся в природе веществах имеется тенденция к выстраиванию этих микроскопических магнитов, по крайней мере в какой-то мере, по линии север—юг. Тогда будет существовать концентрация северных полюсов в одном

направлении и южных — в другом, концентрация достаточная, чтобы породить обнаруживаемое магнитное поле.

Если, скажем, северный полюс такого магнита поднести к железу, микроскопические магниты в железе сориентируются таким образом, что южные полюсы будут обращены к магниту, а северные — от него. Тогда железо и магнит будут притягиваться. Если к железу поднесут южный полюс магнита, то микроскопические магниты в железе сориентируются противоположным образом и снова появится притяжение. Поэтому каждый полюс магнита будет притягивать железо.

Когда железо находится рядом с магнитом или соприкасается с ним таким образом, что его собственные магнитные составляющие сориентированы, оно само становится магнитом. Процесс превращения железа в магнит под воздействием другого магнита называется *магнитной индукцией*. Так, настриженная бумага, подвешившаяся к магниту, сама притянет другую бумажку, та — следующую и т. д. Если магнит убрать, все бумажки распадутся.

Обычно микроскопические магниты в железе сравнительно легко ориентируются под воздействием магнита и так же легко дезориентируются, когда магнит убирают. Железо обычно формирует *временный магнит*. А вот если стальной брусок подвергнуть действию магнита, микроскопические магниты в стали ориентируются с большим трудом.

Однако когда магнит удаляют от стали, дезориентация происходит с таким же трудом — она достаточно затруднена, чтобы фактически вообще не происходить в обычных условиях, следовательно, сталь обычно остается *постоянным магнитом*.

Не только железо состоит из микроскопических магнитов, и не только железо притягивается к магниту. Другие металлы, такие как кобальт и никель (которые химически близки к железу) и гадолиний (который к нему не близок), притягиваются магнитом. Также и ряд металлических сплавов, одни из которых содержат железо, а другие — нет. Например, альнико, который, как явствует из названия, состоит из алюминия, никеля и кобальта (плюс немного меди), можно использовать, чтобы делать магниты сильнее стальных. С другой стороны, нержавеющая сталь, которая больше чем на три четверти состоит из железа, воздействию магнита не поддается.

Магнетическое вещество не обязательно должно быть металлом. Сам по себе магнитный железняк является разновидностью оксида железа, скорее почвенным, чем металлическим веществом. После Второй мировой войны был изучен целый новый класс магнитных веществ. Это ферриты, являющиеся

смешанными оксидами железа и других металлов, таких как кобальт или марганец.

Материал, который демонстрирует или который можно заставить продемонстрировать сильную магнитную силу того рода, что мы привыкли видеть в обычном магните, считается ферромагнитным (от латинского слова *ferrum*, что означает «железо», поскольку наиболее известным примером такого вещества является железо). Никель, кобальт, альнико, конечно, железо и сталь являются примерами ферромагнитных веществ.

Возникает вопрос, почему одни материалы ферромагнитны, а другие — нет. Если магнитные силы — свойства всей материи (а так оно и есть), почему микроскопические магниты чистой меди или чистого алюминия, например, не могут выстраиваться под воздействием имеющегося магнита? Очевидно, это выравнивание не может быть введено извне, без помощи, так сказать, самого вещества.

В ферромагнитных веществах (но даже в них только при определенных условиях) уже присутствует большая часть выравнивания в естественном состоянии. Микроскопические магниты стремятся сориентироваться параллельно миллиардами миллиардов, приводя к появлению концентраций на северном и южном полюсах то тут, то там внутри железа. Области, где таким образом сконцентрированы магнитные силы, называются *магнитными областями*.

Железо и другие ферромагнитные вещества состоят из таких магнитных областей, каждая из которых почти заметна. Хорошо размельченный порошок магнитного оксида железа, если его рассыпать по железу, будет проявлять тенденцию к тому, чтобы собираться на границах между смежными областями и делать их видимыми глазу.

Несмотря на присутствие этих областей, железо обычно не является магнитом. Это потому, что сами области сориентированы случайным образом, так что магнитная сила одних нейтрализуется магнитной силой соседних. Следовательно, контакт с обычным магнитом не ориентирует сами микроскопические магниты (это превышает его сил) — он просто ориентирует эти области. Так, ферромагнитный материал уже предал почти всю работу по выравниванию и остается сделать только последний шаг для выравнивания, незначительный по сравнению с тем, что уже сделано для того, чтобы получить магнит.

Если ферромагнитное вещество разбить на части меньше отдельных составляющих его областей, то каждая такая часть будет представлять собой отдельную область или часть области. Микроскопические магниты в каждой из них будут полно-

стью выровнены. Если такой порошок растворить в жидком пластике, области эти легко и с большой точностью могут быть выровнены под воздействием магнита в то время, когда эти частицы будут вращаться, преодолевая малое сопротивление жидкости (в отличие от гораздо большего сопротивления са-мого железа в твердом состоянии).

Если дать пластику затвердеть в то время, когда система все еще находится под действием магнита, области будут выровнены навсегда, и сформируется особо сильный магнит. Более того, таким магнитам можно придать любую форму и можно легко переделать в другую форму.

Все, что может нарушить выравнивание областей, ослабит или разрушит магнитную силу даже «постоянного» магнита. Если два магнита положить рядом, севером к северу и югом к югу, то магнитное отталкивание приведет к тому, что области постепенно будут отодвигаться друг от друга, — это разрушит выравнивание и ослабит магнитную силу (именно поэтому магниты всегда следует складывать севером к югу). С механической точки зрения, если магнит ударить молотком, то вибрация разрушит выравнивание и ослабит магнитную силу.

В особенности магнитные области разрушает возрастающая вибрация атомов, вызванная повышением температуры (см. ч. I). Фактически для каждого ферромагнитного вещества есть характеризующая его температура, выше которой выравнивание областей разрушается и при нагревании выше которой вещество соответственно теряет свои ферромагнитные свойства.

Впервые это было продемонстрировано французским физиком Пьером Кюри (1859—1906) в 1895 году, и поэтому пороговое значение температуры называется *точкой Кюри*. Точка Кюри обычно находится ниже точки таяния жидкости, поэтому жидкости, как правило, не ферромагнитны. Например, точка Кюри для железа — 760 °С, в то время как его точка плавления — 1539 °С. Для кобальта точка Кюри сравнительно высока — 1130 °С, в то время как для гадолиния сравнительно низка — 16 °С. Гадолиний ферромагнитен только при температурах ниже комнатной. Точка Кюри может располагаться на действительно низких температурах. Для металла диспрозия ее значение около -188 °С (85 °К), так что в диспрозии области формируются только при температурах жидкого воздуха и только тогда он становится ферромагнитным.

В некоторых веществах микроскопические магниты сами собой выравниваются, но не таким образом, что северные полюса указывают все в одном направлении. Вместо этого магниты действительно выравниваются параллельным образом, но так, что в

половине случаев северные полюса указывают в одном направлении, а в половине — в другом. Такие вещества называют антиферромагнитными, и из-за того, что магнитные силы одного выравнивания аннулируются магнитными силами другого, общее магнитное поле равняется нулю. Однако может оказаться, что структура вещества будет такой, что магниты с северными полюсами в одном направлении окажутся сильнее, чем магниты с северными полюсами в другом. В этом случае будет сравнительно устойчивое магнитное поле, и такие вещества называют *ферримагнитными* (обратите внимание на разницу в гласной!).

Примерами ферримагнитных материалов являются ферриты. Естественно, ферримагнитный материал не может быть таким сильным магнитом, как ферромагнитный, поскольку в последнем в идеальном случае все области сорентированы в одном направлении, в то время как в первом имеет место значительная нейтрализация. Так, ферриты представляют магниты в лучшем случае в три раза слабее стального.

Земля как магнит

Ранних физиков сводил с ума поиск причины, по которой стрелка компаса показывает на север и юг. Некоторые выдумывали, что якобы на Крайнем Севере существует огромная железная гора, к которой притягивается намагниченная стрелка. В 1600 году английский физик Уильям Гильберт (1544—1603) поведал о целенаправленном эксперименте, который привел к более правдоподобию решению.

Стрелка компаса, вращаясь обычным образом, может вращаться только вокруг вертикальной оси и вынуждена оставаться совершенно горизонтальной. А если ее насадить на горизонтальную ось так, что условия позволили бы ей указывать вверх или вниз? Таким образом закрепленная стрелка (в Северном полушарии) действительно показывала север на несколько градусов ниже горизонта, в земле. Это назвали *магнитным погружением*.

Гильберт сделал шар из магнитного железняка и принял его за модель Земли. Он разметил полюса и принял его южный полюс, притягивавший северный полюс стрелки компаса, за арктическую область Земли, а другой — за антарктическую.

Северный полюс стрелки компаса, помещенной рядом с этим шаром из магнитного железняка, как и ожидалось, показывал «север». Однако в «северном полушарии» этого шара северный конец стрелки компаса, закрепленной соответствующим

образом, тоже показывал магнитное погружение, поворачиваясь к телу сферы. Над южным полюсом «арктической области» сферы северный полюс стрелки компаса показывал прямо вниз. В «южном полушарии» сферы южный полюс стрелки компаса указывал вверх, удаляясь от тела сферы, и над «антарктической областью» указывал прямо вверх.

Гильберт решил, что поведение стрелки компаса по отношению к Земле (и ориентация на север—юг, и магнитическое погружение) полностью аналогично ее поведению по отношению к сфере из железняка. Он сделал вывод, что сама по себе Земля является сферическим магнитом с полюсами в Арктике и Антарктиде. Стрелка компаса указывает на север под воздействием той же самой силы, что и притягивает ее к полюсу любого другого магнита. (Именно этот естественный магнетизм Земли выстраивает постепенно области оксида железа и создает магнитный железняк, с которого и началось все изучение магнетизма, бывшее до XIX века.)

Можно легко решить, что магнитные полюса Земли расположены на ее географических полюсах, но это не так. Если бы это было так, стрелка компаса показывала бы более или менее точно на север, а это не так. Во времена Гильберта (1580), например, стрелка компаса в Лондоне показывала на 11° восточнее северного полюса. Угол, на который стрелка отклоняется от истинного Северного полюса, именуется *магнитным склонением*. Оно изменяется от места к месту на Земле и в каждом конкретном месте изменяется от года к году.

Сейчас в Лондоне магнитное склонение — 8° к западу от севера, а со времен Гильберта отмечалось склонение даже в 25° к западу от севера. На пути от восточного склонения, имевшего место в XVI веке, к западному склонению, имеющемуся сейчас, одно время склонение было временно нулевым, и тогда стрелка компаса указывала в Лондоне на истинный север. Это было в 1657 году.

Изменения в склонении в зависимости от географического положения были впервые замечены Христофором Колумбом (1451—1506) в его полном открытий путешествии 1492 года. Стрелка компаса, которая показывала явно восточнее севера в Испании, указывала четко на север, когда он достиг середины океана, и четко на запад от севера после того. Он держал это в секрете от экипажа, потому что только этого явного свидетельства нарушения законов природы матросам и не хватало для того, чтобы поднять панику к бунт.

Существование магнитного склонения и его изменения от точки к точке на поверхности Земли можно было бы объяснить тем,

что магнитные полюса находятся на некотором расстоянии от полюсов географических. Так оно и есть. Южный полюс Земли как магнита (который притягивает северные полюса стрелок компаса) расположен далеко на севере и потому называется *северным магнитным полюсом*. Сейчас он расположен возле арктического побережья Канады, на расстоянии около 1200 миль от географического Северного полюса. Южный магнитный полюс (северный полюс Земли как магнита) расположен на берегах Антарктиды, западнее моря Росса, на расстоянии около 1200 миль от географического Южного полюса.

Эти два магнитных полюса находятся не совсем на противоположных концах Земли, так что соединяющая их линия (магнитная ось) не только составляет угол в 18° с осью географической, но также и не проходит через центр Земли.



Магнитные полюса Земли

Тот факт, что магнитное склонение изменяется со временем, кажется, показывает, что магнитные полюса меняют свое положение, и действительно, положение северного магнитного полюса на несколько градусов сдвинулось с того момента, когда он был впервые найден 100 лет назад.

Несмотря на свой размер, Земля — слабый магнит. Так, даже у небольшого подковообразного магнита магнитная напряженность может достигать 1000 эрстед, а магнитная напряженность

поля Земли — только около $\frac{1}{4}$ эрстеда даже возле магнитных полюсов, где она является наивысшей. На точках равноудаленных от магнитных полюсов (на *магнитном экваторе*) она падает до $\frac{1}{4}$ эрстеда.

Через точки, на которых наблюдается одно и то же склонение, на Земле можно провести линии. Они называются изогоническими линиями (от греческого слова, означавшего «равные углы»). В идеале их можно считать линиями «магнитной долготы». Однако, в отличие от географической долготы, они не являются участками окружности, а нерегулярно изгибаются в соответствии с местными магнитными свойствами структуры Земли. И конечно же они меняются со временем и их постоянно надо перерисовывать.

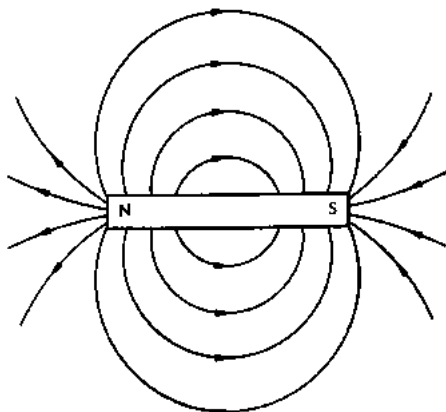
Если согласиться с тем, что Земля — это магнит, остается еще определить, почему она магнит. Во второй половине XIX века стало появляться все больше и больше свидетельств из разных источников о том, что ядро Земли на две трети состоит из никеля и железа. Ничего не было проще, чем предположить, что ядро это по какой-то причине намагничено. Однако появлялось также все больше и больше свидетельств, что температура земного ядра достаточно высока, чтобы железо-никелевая масса оставалась жидкой, и явно находится выше точки Кюри. Следовательно, ядро не может быть обычным магнитом, и магнитное поле Земли должно иметь более тонкое происхождение. Я еще вернусь к этому вопросу.

Магнитное поле

Магнитная сила ослабевает пропорционально квадрату расстояния (см. уравнение 9.1), как и гравитационная сила, но между ними есть важные различия. Насколько нам известно, гравитационная сила между двумя телами ни в коей мере не зависит от природы находящейся между ними среды. Другими словами, ваш вес одинаков, не важно, стоите вы прямо на земле, или подставите под ноги лист железа, или деревянную доску, или намыленную резиновую подстилку, или поместите любое другое вещество между собой и землей. Поэтому не изменяется и притяжение Земли Солнцем, когда между ними встает 2000-мильная толща Луны.

Сила же между магнитными полюсами изменяется в зависимости от природы находящейся между ними среды, и уравнение 9.1 точно соблюдается только тогда, когда между полюсами вакуум. Чтобы объяснить это, надо узнать об исследованиях английского ученого Майкла Фарадея (1791—1867).

В 1831 году он заметил нечто, что было замечено на пять веков раньше Петером Перегринусом и, несомненно, еще множеством людей, игравших с магнитами на протяжении веков... Начнем с того, что поместим лист бумаги на магнитную полоску. Если на бумагу насыпать железные опилки и потрясти ее, опилки начнут двигаться и располагаться по линиям, изгибающимся от одного полюса магнита до другого. Каждая линия начинается на одном полюсе и заканчивается на другом, пересекающихся среди них не будет. (Конечно, некоторые линии окажутся незамкнутыми, потому что они выходят за лист бумаги или потому что на больших расстояниях от полюсов их влияние слишком слабо, чтоб заставить железные опилки строго следовать линиям. Все равно можно предположить, что все линии, как бы далеко они ни уходили и какими бы слабыми ни становились, являются непрерывными от полюса к полюсу.)



Магнитные силовые линии

Форма этих линий зависит от формы магнита и взаиморасположений полюсов. В случае подковообразного магнита линии, собирающиеся около двух полюсов и в пространстве между ними, прямые. То же самое, если северный полюс одного магнитного

бруска поднести к южному полюсу другого. С другой стороны, если северный полюс одного бруска поднести к северному полюсу другого, то силовые линии изогнутся наружу в стремлении линий одного магнита избежать линий другого.

Фарадей назвал их *силовыми магнитными линиями* и полагал, что они реально существуют. Он считал, что они сделаны из некоего гибкого материала, который растягивается, когда распространяется между двумя различными полюсами, что высвобождает силу, необходимую для его сокращения обратно, как это произошло бы с растянутым резиновым жгутом. И именно это стремление к сокращению и порождает магнитное притяжение, решил Фарадей.

Силовые линии вокруг магнита любой формы или вокруг любой системы магнитов можно визуализировать и без железных опилок. Стрелка компаса всегда располагается так, чтобы лежать вдоль одной из этих линий. Следовательно, выясняя направление стрелки компаса в различных точках пространства, можно выяснить расположение этих линий. Таким образом можно определить и силовые линии Земли как магнита.

Представление Фарадея о материальном присутствии силовых линий просуществовало недолго. К середине XIX века в связи с вопросом о природе света сильные позиции приобрела концепция эфира (см. гл. 6), и силовые магнитные линии стали считать искажением эфира.

С исчезновением в начале XX века концепции эфира нужно было предпринимать дальнейшие шаги. Снова это стало вопросом геометрии самого пространства. Предположим, например, что вы уронили карандаш в цилиндрическое отверстие. Он автоматически ориентируется параллельно оси цилиндра. Если бы цилиндр оказался растянувшейся на многие мили трубой, слегка изгибающейся туда-сюда, упавший карандаш продолжал бы в любой точке ориентироваться параллельно оси трубы, каким бы ни было в данном месте ее направление.

Фактически, если вы не можете увидеть саму трубу, а только карандаш, вы легко можете разметить ее искривления по положениям, которые принимает в различных точках карандаш. То же верно и для стрелки компаса, и для магнитных силовых линий.

Каждый магнитный полюс воздействует на геометрию всего пространства, и эта измененная геометрия (по сравнению с геометрией, какой она была бы в отсутствие магнитного полюса) называется *магнитным полем*. Интенсивность этого магнитного поля (насколько его геометрия отличается от обычной немагнитной геометрии пространства) падает пропорционально квадрату

расстояния до полюса и вскоре становится слишком маленькой, чтобы ее можно было различить.

Тем не менее магнитное поле каждого существующего магнитного полюса наполняет все пространство, и ситуация становится терпимой только потому, что воздействие любого полюса, находящегося рядом, перевешивает все остальные настолько, что его действие можно считать изолированным (к гравитационным полям это тоже относится).

Представление о магнитном поле устраняет необходимость предполагать, что магнитная сила — это воздействие на расстоянии. Магнит не притягивает железо на расстоянии, а создает поле, которое влияет на кусок железа внутри себя. Поле (представляющее собой геометрию пространства) касается и магнита, и железа, и никакого воздействия на расстоянии предполагать не требуется.

Несмотря на то что магнитные силовые линии не существуют материально, часто бывает удобно нарисовать их в буквальном смысле и использовать для объяснения поведения предметов в магнитном поле. (Делая так, мы используем «модель», то есть представление о Вселенной, не являющееся реальным, но помогающее рассуждать. Ученые используют множество моделей, и они чрезвычайно полезны. Опасность заключается в том, что всегда появляются попытки утверждать реальность моделей, чтобы их можно было использовать за пределами их действия. Может возникнуть и неосознанное сопротивление любым изменениям, которые приносит новое знание, если их нельзя уложить в эту модель.)

Мы можем определить силовые линии между двумя магнитными полюсами в системе СГС (используя сантиметры и дин) таким образом, что одна линия силы будет установлена в 1 максвелл (в честь Максвелла, который так много сделал в связи как с газами, так и со светом). В системе МКС, где те же измерения производятся в метрах и ньютонах, линия силы устанавливается в 1 вебер (в честь немецкого физика Вильгельма Эдуарда Вебера (1804—1891). Вебер — гораздо большая единица, 1 вебер равен 100 000 000 максвеллов. Максвеллы и веберы — единицы измерения магнитного потока, которое можно представить как количество силовых линий, проходящих через данную область, перпендикулярную этим линиям.

Измеряя силу магнитного поля, нужно сосчитать количество силовых линий, проходящих через область определенного размера. Это *плотность магнитного потока*.

Плотность потока показывает, насколько близко друг к другу проходят силовые линии; чем они более кучны, тем выше плот-

ность потока и тем сильнее магнитное поле в этой точке. В системе СГС единица площади — квадратный сантиметр, так что единица измерения плотности потока — 1 максвелл на квадратный сантиметр. Она получила название 1 гаусс в честь немецкого математика Карла Фридриха Гаусса (1777—1855)¹. В системе МКС единица измерения площади — квадратный метр, следовательно, единица измерения магнитного потока — 1 вебер на квадратный метр, у этой единицы нет специального названия. Поскольку в квадратном метре 10 000 квадратных сантиметров, а в вебере 100 000 000 максвеллов, то 1 вебер на квадратный сантиметр равен 10 000 гауссов.

Представьте себе магнитный северный полюс и южный полюс, разделенные вакуумом. Силовые линии идут от полюса к полюсу, и плотность потока в любой точке между ними будет иметь определенное значение в зависимости от силы магнита. Если теперь между полюсами поместить какое-либо материальное вещество, даже если сила магнита остается неизменной, плотность потока изменится. Отношение плотности потока в веществе к плотности потока в вакууме называется относительной магнетической проницаемостью. Поскольку это — отношение, то оно выражается просто в цифрах, без единиц измерения.

Проницаемость вакуума принята за 1, и для большинства материальных веществ проницаемость очень близка к 1. Тем не менее уточненные измерения показывают, что точно равной 1 она никогда не является, а бывает иногда чуть больше, а иногда чуть меньше 1. Вещества с проницаемостью чуть большей чем 1 называют парамагнитными, а с проницаемостью меньшей 1 — диамагнитными.

В парамагнитном веществе, проницаемость которого больше 1, плотность потока выше, чем в вакууме. Силовые линии ступают в парамагнитном веществе, так сказать предпочитая его окружающему вакууму (или воздуху). Парамагнитное вещество, следовательно, стремится сориентироваться по самой длинной оси параллельно силовым линиям так, чтобы эти силовые линии могли двигаться в избранном веществе по наибольшему расстоянию. И опять же, поскольку плотность потока возрастает по мере приближения к полюсу, имеется тенденция у парамагнитных веществ приближать полюс (то есть притягиваться к нему) таким образом, чтобы сквозь вещество могло проходить как можно больше силовых линий.

¹ Большинство единиц измерения в электричестве и магнетизме названы в честь ученых, известных своей работой в этой области. Гаусс и Вебер установили первую логическую систему единиц измерения электричества и магнетизма. Вклад Максвелла будет изложен в гл. 14.

С другой стороны, диамагнитные вещества, проницаемость которых меньше 1, имеют плотность потока меньшую, чем вакуум (или воздух). Силовые линии, кажется, избегают его и скапливаются в окружающем вакууме. Следовательно, диамагнитное вещество стремится сорентироваться таким образом, чтобы его наиболее длинная ось была перпендикулярна силовым линиям так, чтобы эти силовым линиям приходилось проходить сквозь вещество минимальное расстояние. Более того, диамагнитные вещества стремятся отодвинуться от полюса (то есть отталкиваются им) в область меньшей плотности потока так, чтобы сквозь него приходилось проходить как можно меньшему количеству линий.

Оба эффекта крайне незначительны и становятся заметными только при использовании очень сильных магнитных полей. Первым, кто описал эти эффекты, был Фарадей, обнаруживший в 1845 году, что стекло, сера и резина слегка отталкиваются магнитными полюсами и, следовательно, являются диамагнитными. Наиболее диамагнитным веществом из известных является при обычных температурах элемент висмут. (При чрезвычайно низких температурах, близких к абсолютному нулю, проницаемость некоторых веществ падает до нуля, и диамагнетизм их тогда достигает максимума.)

Парамагнетизм известен сравнительно более широко, и для некоторых веществ проницаемость может быть очень высокой, исчисляясь тысячами. Эти высокопроницаемые вещества и есть те, что мы ранее назвали ферромагнитными. Здесь притяжение магнита и ориентация железных опилок параллельно силовым линиям настолько очевидны, что не заметить их сложно.

Проницаемость (обозначаемая греческой буквой μ — «мю»), тоже следует учитывать в формуле Кулона (уравнение 9.2), чтобы верно рассчитывать и те случаи, когда полюса разделяет не вакуум:

$$F = \frac{mm'}{\mu d^2}. \quad (\text{Уравнение 9.3})$$

Поскольку μ — знаменатель, то показывается обратное отношение. Диамагнитное вещество с проницаемостью менее 1 увеличивает магнитную силу между полюсами, в то время как парамагнитное вещество силу уменьшает. Последний эффект особенно заметен, когда между полюсами находятся железо или сталь, проницаемость которых исчисляется сотнями или даже тысячами. Брусок железа, касающийся обоих полюсов подковообразного магнита, урезает магнитную силу вне себя настолько, что почти играет роль магнитного изолятора.

Глава 10 ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электрический заряд

Гильберт, который ввел понятие о Земле как о магните, также изучал силу притяжения натертого янтаря. Он надел на стержень подвижную металлическую стрелку так, чтобы она поворачивалась под давлением совсем незначительной силы. С его помощью Гильберт смог обнаруживать очень слабые силы притяжения и взялся за поиск других веществ, которые, будучи натертыми, обрели бы подобные свойства. Начав свои исследования в 1570 году, он обнаружил, что некоторые драгоценные камни, такие, как алмаз, сапфир, аметист, опал, карбункул, гагат (черный янтарь) и даже обыкновенный горный хрусталь, будучи натертыми, проявляют силу притяжения. Он назвал такие вещества «электриками». Вещества, проявляющие такую силу притяжения, стали называть *наэлектризованными* или получившими *электрический заряд*.

Ряд же других веществ, в частности металлы, оказалось невозможно наэлектризовать, следовательно, они получили характеристику «неэлектриков». В конце концов электричество стали считать чем-то вроде жидкости. Когда вещество, например янтарь, становилось наэлектризованным, считалось, что оно приобрело электрический заряд, остающийся в нем постоянно. Такой заряд был назван *статическим электричеством* (от латинского слова, означающего «быть неизменным»), а учение о свойствах электричества в таких условиях получило название *электростатика*.

Для того чтобы полноценно изучать электрические силы, нужно было собрать достаточное количество этой жидкости — больше, чем могут содержать в себе маленькие кусочки драгоценных и полудрагоценных материалов. Необходимо было найти какое-то дешевое и доступное в больших количествах вещество, подверженное электризации.

В 60-х годах XVII века немецкий физик Отто фон Герике (1602—1686) нашел такой материал — им оказалась сера. Он изготовил из серы сферу размером больше человеческой головы и сделал так, чтобы ее можно было вращать рукояткой. Рука, помещенная на нее, по мере того как сфера поворачивалась под рукой, постепенно наэлектризовывала сферу до беспрецедентной для того времени величины. Герике сконструировал первую *механическую электростанцию*, работавшую от трения.

Герике обнаружил много общего между электростатическими и магнитными силами. Например, он выяснил, что имело место электростатическое отталкивание, так же как и электростатическое притяжение, в то время как магнитам тоже были присущи и отталкивание, и притяжение. Опять же вещество, поднесенное к наэлектризованной сере, само временно становилось наэлектризованным, подобно тому как кусочек железа, поднесенный к магниту, сам временно намагничивается. Таким образом, получалось, что наравне с магнитной индукцией существует и *электростатическая индукция*.

В 1729 году английский исследователь электричества Стефан Грей (1696—1736) наэлектризовал длинные стеклянные трубки и обнаружил, что пробки, помещенные в концы трубок, так же как и шарики из слоновой кости, прикрепленные к этим пробкам длинными палочками, электризуются при натирании стекла. Электрический ток, который образовался во время трения, по-видимому, распространился по веществу через пробку и палки на слоновую кость. Это было первое четкое свидетельство того, что электричеству не обязательно быть полностью статическим, что оно может перемещаться.

В то время как электрический заряд, однажды созданный путем натирания «электрика», распространяется по всему веществу, он не пройдет полностью через него, войдя в одной точке и выйдя в другой. С «неэлектриками» же именно так и происходит — через них ток проходит насквозь. Действительно, через металлы электрический ток проходит чрезвычайно быстро, так быстро, что заряженное вещество теряло свой заряд, становясь *разряженным*, если получало контакт с металлом, соприкасающимся, в свою очередь, с землей. Заряд уходил из вещества через металл в огромное тело земли, распространяясь по которому он становился таким слабым, что его уже нельзя было обнаружить.

Это объясняло тот факт, что металлы не электризовались путем натирания. Электрический заряд, как только появлялся, переходил из металла практически в любое тело, соприкасающееся с ним. Грей поместил металлы на блоки канифоли (которые не допускали прохода электрического заряда). В таких условиях куски металла, если их тщательно потереть, действительно наэлектризовывались, так как формировавшийся в металле заряд не мог сразу пройти через канифоль и был, так сказать, пойман в металле. Короче, в конце концов выяснилось, что электрические силы, как и магнитные, присутствуют в материи повсеместно.

По результатам работы Грея вещества были поделены на два класса. Первый класс включает в себя металлы — наилучшие

примеры, в частности, золото, серебро, медь и алюминий — материалы, через которые электрический заряд проходит с огромной скоростью. Это *электропроводники*. Вещества другой группы, представителями когорой являются янтарь, стекло, сера и резина (каучук), — материалы, которые с легкостью электризуются при трении, — оказывают огромное сопротивление электрическому потоку. Это *электроизоляторы* (от латинского слова, означающего «остров», так как такой материал может быть использован для изоляции электрических объектов, не давая электричеству покидать их и, таким образом, делая предметы, так сказать, островами электричества).

Представления об электростатическом притяжении и отталкивании развил в 1733 году французский химик Шарль Франсуа Дюфе (1698—1739). Он наэлектризовал маленькие кусочки пробки, прикасаясь к ним уже наэлектризованным стеклянным стержнем, так что электрический заряд частично переходил со стекла на пробку. Несмотря на то что стеклянный стержень притягивал пробку, пока последняя не была заряжена, стержень и пробка отталкивали друг друга, когда пробка заряжалась. Более того, два кусочка пробки, заряженные от стекла, также отталкивали друг друга.

То же самое происходило, когда два кусочка пробки были заряжены прикосновением уже наэлектризованного стержня из канифоли. Однако пробка, наэлектризованная стеклом, притягивала пробку, наэлектризованную резиной.

Тогда Дюфе решил, что существуют два вида электрического заряда, и он назвал их «стеклянным электричеством» и «канифольным электричеством». Здесь, как и в случае с северным и южным магнитными полюсами, аналоги отталкивают друг друга, а противоположности притягиваются.

Против этой теории выступил Бенджамин Франклин. В 1740-х годах он провел эксперименты, которые довольно ясно показали, что заряд «стеклянного электричества» мог нейтрализовать заряд «канифольного электричества», так что не оставалось вообще никакого заряда. Эти два вида электричества не были просто разными, они были противоположными.

В качестве объяснения Франклин предположил, что существует только один электрический заряд и в норме все тела обладают им в определенной степени. Когда этот заряд имеется в нормальном количестве, тело не заряжено и не проявляет электрических свойств. В некоторых случаях в результате трения часть электрического заряда покидала натиремое тело, в других случаях, наоборот, заряд тела возрастал. Когда тело получало избыточный заряд, Франклин предложил считать его

положительно заряженным, а когда заряд уменьшался — отрицательно заряженным.

Положительно заряженное тело притянет отрицательно заряженное, так как электрический заряд стремится (так сказать) распределиться равномерно, и при контакте электрический заряд перейдет из места, где он в избытке, в место, где он в недостатке. В обоих телах концентрация заряда станет нормальной, и, таким образом, оба тела станут разряженными.

С другой стороны, два положительно заряженных тела будут отталкивать друг друга, так как избыток заряда в одном теле не будет стремиться к прибавлению такого же заряда из другого тела, скорее наоборот. Так же будут отталкиваться и два отрицательно заряженных тела.

Эти понятия помогают объяснить явление электростатической индукции. Если положительно заряженный объект подносится к незаряженному, то избыток заряда в первом будет отталкивать заряд второго и отводить его в дальнюю часть незаряженного тела, делая ближний край второго тела отрицательно заряженным, а дальний край положительно заряженным. (Незаряженное тело останется незаряженным в целом, так как отрицательный заряд одного края будет уравнивать положительный заряд другого.)

Теперь будет иметь место притяжение между положительно заряженным телом и отрицательно заряженной частью незаряженного тела. Также будет наличествовать и отталкивание между положительно заряженным телом и положительно заряженной частью незаряженного тела. Однако поскольку положительно заряженный край незаряженного тела находится дальше от положительно заряженного тела, чем отрицательно заряженный край, то сила отталкивания будет слабее, чем сила притяжения, и в результате действовать будет сила притяжения.

То же самое происходит, когда к незаряженному телу подносится отрицательно заряженное. В этом случае электрический заряд незаряженного тела приближается к отрицательно заряженному телу. В незаряженном теле формируется положительно заряженная часть, находящаяся около отрицательно заряженного тела (в результате чего имеется сильное притяжение), и отрицательно заряженная часть, находящаяся дальше от отрицательно заряженного тела (в результате чего имеется слабое отталкивание). Общим действием этих двух сил опять же будет притяжение. Таким образом можно объяснить, почему электрически заряженные тела обеих разновидностей одинаково легко притягивают незаряженные тела.

В вопросах притяжения и отталкивания Франклин представлял себе положительные и отрицательные заряды подобно северному и южному полюсам магнита. Однако оставалось одно важное различие. Магнетизм Земли позволял стандартно различать между собой полюса магнита в зависимости от того, на север или на юг указывает определенный полюс. Но способа так же легко отличить отрицательный электрический заряд от положительного не обнаружилось.

По Франклину, положительный заряд получался в результате избытка электричества, но раз уж нет абсолютной разницы в поведении между «стеклянным электричеством» и «канифольным», то как можно определить, какой электрический заряд происходит от избытка заряда, а какой — от недостатка? Обе разновидности различаются только отношением друг к другу.

Франклину пришлось угадывать, четко понимая, что у него один шанс из двух, то есть шансы равны. Он решил, что натертое стекло приобретает электрический заряд и является положительно заряженным, а натертая канифоль терет электрический заряд и становится отрицательно заряженной. После принятия этого решения все электрические заряды могли быть определены как положительные или отрицательные в зависимости от того, притягивались они или отталкивались зарядом, который уже был определен как положительный или отрицательный.

Со времен Франклина исследователи электричества считают, что поток электричества идет из точки наибольшей положительной концентрации энергии в точку наибольшей отрицательной концентрации, и этот процесс можно считать подобным тому, как поток воды бежит вниз с горы. Всегда существует стремление к ликвидации неравномерности распределения заряда, т. е. к уменьшению заряда в местах избытка и увеличению его в местах нехватки.

С точки зрения Франклина, подразумевалось, что электрический заряд не может ни появляться ниоткуда, ни исчезать в никуда. Если положительный заряд получается из-за притока электрического заряда, этот заряд должен быть получен откуда-то еще, и там, откуда он взялся, должна возникнуть его нехватка. И размер этой нехватки должен быть в точности равен размеру избытка заряда в точке его окончательного местонахождения. Так, если по стеклу терли шелком и оно приобретало положительный заряд, то шелк приобретал равный отрицательный заряд. Суммарный электрический заряд в стекле и шелке был равен нулю перед натиранием и оставался равным нулю после.

Это представление получило достаточно подтверждений со времен Франклина, и мы можем говорить о *законе сохранения электрического заряда*.

Мы знаем, что электрический заряд не может быть ни создан, ни уничтожен. Суммарный электрический заряд Вселенной постоянен. Нельзя забывать, что мы говорим о суммарном электрическом заряде. Нейтрализация положительного электрического заряда некоторой величины равным по величине отрицательным электрическим зарядом не является уничтожением электрического заряда. Сумма $+x$ и $-x$ равна 0; при такой нейтрализации меняется не сам электрический заряд, а лишь его распределение. Это верно и тогда, когда незаряженная система становится такой, что часть ее получает положительный заряд, а другая — равный по величине отрицательный заряд. Ситуация в точности аналогична той, что описывает закон сохранения импульса (см. ч. I).

Электрон

Фактически и в двухзарядной теории Дюфе, и в однозарядной теории Франклина была доля истины. После того как начало приходить понимание внутреннего строения атома в 90-х годах XIX века (эта тема будет подробно рассмотрена в III части нашей книги), было открыто существование субатомарных частиц и то, что одни из них несут электрический заряд, а другие — нет!

Из субатомарных частиц, имеющих заряд, самые распространенные — *электрон* и *протон*, которые противоположно заряжены. Тогда в известном смысле протон и электрон представляют собой два дюфеевских вида зарядов. С другой стороны, протон в условиях электростатических экспериментов проявил себя как абсолютно неподвижная частица, в то время как электрон, самый легкий из них, легко перемещался из одного тела в другое. В этом плане электрон и представляет собой единственный электрический заряд Франклина.

В незаряженном теле число электронов равно числу протонов и заряд отсутствует. Тело наполнено электрическими зарядами обоих видов, но они находятся в равновесии. В результате

¹ Точно мы так и не знаем, что такое электрический заряд. Однако мы можем описать, как действует электрически заряженное вещество, и можем измерить величину этого действия и, таким образом, величину электрического заряда. Это *опытное определение* электрического заряда, и его достаточно, чтобы удовлетворить ученых, по крайней мере на время.

трения электроны перемещаются. Одно тело приобретает избыток электронов, а в другом получается их нехватка.

Однако обнаружилась одна печальная вещь. Электроны движутся в направлении, противоположном предположенному Франклином. Франклин не угадал. Там, где, по его мнению, должен был быть избыток электрического заряда, на самом деле была нехватка электронов, и наоборот. По этой причине пришлось считать электрический заряд электрона отрицательным; избыток электронов приведет к отрицательному заряду, чтобы получалась нехватка заряда, по Франклину, в то время как недостаточное количество электронов приведет к положительному заряду, по Франклину. Поскольку электрон получил отрицательное значение заряда, протон получил положительное.

(Инженеры-электрики до сих пор считают, что электрический ток движется от положительного к отрицательному, несмотря на то что физики определили, что электроны движутся от отрицательного к положительному. Для практических целей не имеет значения, каким считать направление тока, ведь направление всегда одно и то же и никаких изменений в процессе тока не происходит.)

Кулон, измерив отношение силы между магнитными полюсами и расстояниями, сделал то же самое для силы между электрически заряженными телами. Здесь стоящая перед ним задача была несколько легче выполняема ввиду важной разницы между магнетизмом и электричеством. Магнитные полюса не существуют сами по себе. Каждое тело, имеющее северный полюс, должно также иметь и южный магнитный полюс. Соответственно на измерение магнитных сил между полюсами влияют и сила притяжения, и сила отталкивания, и это усложняет измерение. Электрические же заряды можно изолировать. Тело может нести только отрицательный или только положительный заряд. По этой причине притяжение может быть измерено без вмешательства усложняющего ситуацию отталкивания, и наоборот.

Кулон обнаружил, что электрическая сила, как и магнитная, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. В сущности, уравнение, которое он использовал для выражения изменения электрической силы по мере изменения расстояния, было аналогично тому, которое он вывел для магнитных сил (см. уравнение 9.1).

Если электрический заряд двух тел соответственно q и q' , а расстояние между ними — d , тогда F — сила, действующая между ними (это может быть как сила притяжения, если заряды противоположные, так и сила отталкивания, если заряды однонаковы), может быть выражена так:

$$F = \frac{q_1 q_2}{d^2}, \quad (\text{Уравнение 10.1})$$

при условии, что между зарядами находится вакуум.

В системе СГС расстояния измеряются в сантиметрах, а силы в динах. Если мы представим, что два равных заряда разделены расстоянием в 1 см и воздействуют друг на друга с силой в 1 дину, то величина электрического заряда — 1 электростатическая единица.

Самый маленький возможный заряд тела — заряд одного электрона¹. Измерения показали, что он равен $-4,8 \times 10^{-10}$ электростатических единиц, где минус означает отрицательный заряд. Это значит, что тело, несущее заряд в 1 электростатическую единицу, содержит около 2 миллиардов лишних электронов.

Другая широко используемая единица заряда в системе МКС — кулон, названа она в честь физика. Кулон равен 3 миллиардам электростатических единиц. Тело, несущее отрицательный заряд в 1 кулон, содержит примерно 6 миллиардов избыточных электронов, а тело, несущее положительный заряд в 1 кулон, имеет такую же их нехватку.

Представьте себе два электрона на расстоянии 1 см. Так как заряд каждого $-4,8 \times 10^{-10}$ электростатических единиц, то общая сила (в данном случае отталкивания) между ними вычисляется с помощью уравнения 10.1, как равная $(-4,8 \times 10^{-10})^2$, или $2,25 \times 10^{-19}$ дин.

Два электрона также воздействуют друг на друга гравитационной силой притяжения. Теперь известно, что масса электрона равна $9,1 \times 10^{-28}$ граммов. Сила гравитационного притяжения равна $Gm_1 m_2 / d^2$, где G — гравитационная постоянная, которая равна $6,67 \times 10^{-8}$ дина-см²/г² (см. ч. 1). Гравитационная сила притяжения между электронами равна $(9,1 \times 10^{-28})^2$, умноженная на $6,67 \times 10^{-8}$ или $5,5 \times 10^{-62}$ дин. Теперь мы можем сравнить гравитационную и электрическую силы, разделив $2,25 \times 10^{-19}$ на $5,5 \times 10^{-62}$. Частное равно 4×10^{42} . Это означает, что электрическая сила (или соответствующая магнитная сила в случае магнитов) где-то в 4 миллиона триллионов триллионов раз больше силы гравитации. Справедливо сказать, что сила гравитации — слабейшая сила, известная в природе.

¹ Протон имеет такой же по величине, но положительный заряд. Обнаружено, что все внутриатомные частицы имеют заряд, в точности равный заряду электрона, или заряд, в точности равный заряду протона, или не имеют вообще никакого заряда. И отрицательный и положительный заряды, кажется, передаются в определенном размере и ни в каком другом. Почему это так, до сих пор не ясно.

Тот факт, что гравитация — подавляющая сила в мировом масштабе, происходит полностью из-за того, что мы имеем дело с огромными массами звезд и планет. Хотя все равно, если подумывать только о том, что мы, с нашими слабыми мышцами, можем с легкостью поднимать предметы, несмотря на гравитационное притяжение всей Земли, и что то же самое может сделать маленький игрушечный магнит, становится ясно, как гравитационные силы немислимо малы. И фактически, когда мы имеем дело с телами нормального размера, мы полностью пренебрегаем гравитационными силами между ними.

Электрически заряженные предметы служат источниками *энергетических полей*, которые аналогичны магнитным полям. Наравне с магнитными существуют и *электрические силовые линии*.

Как и магнитные, электрические силовые линии могут проходить сквозь то или иное вещество быстрее или медленнее, чем они прошли бы через равную толщу пустого пространства. Соотношение плотности потока электрических силовых линий, проходящих через среду, к плотности потока, проходящего через пустое пространство, — *относительная диэлектрическая проницаемость*. (Этот термин аналогичен относительной проницаемости в случае магнитных полей.)

В общем относительная диэлектрическая проницаемость изоляторов (непроводников) больше 1, в некоторых случаях — гораздо больше. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха 1,00054, в то время как резины — около 3, а слюды — около 7. Для воды это 78. Там, где относительная диэлектрическая проницаемость больше 1, электрические силовые линии собираются в веществе и более тесно проходят через него, чем они прошли бы через равный объем пустого пространства. По этой причине непроводники часто называют *диэлектриками* (греческий префикс обозначает «через», силовые линии проходят через них). Об относительной диэлектрической проницаемости чаще говорят как о *диэлектрической постоянной*.

Соответственно формулу Кулона для силы между двумя заряженными частицами можно переписать в более общем виде:

$$F = \frac{qq'}{\kappa d^2}, \quad (\text{Уравнение 10.2})$$

где κ — диэлектрическая постоянная среды, разделяющей частицы (κ — греческая буква «каппа»).

Электрические силы между заряженными частицами уменьшаются, если между ними помещен диэлектрик; они уменьша-

ются больше по мере возрастания его диэлектрической постоянной. Составляющие частицы такого вещества, как обычная поваренная соль, например, удерживаются электрическим притяжением. В воде, с ее необычайно высокой диэлектрической постоянной, эти силы соответственно уменьшаются, и, в частности, по этой причине соль быстро растворяется в воде (ее частицы, так сказать, быстро рассыпаются), и вообще вода является хорошим растворителем.

Электродвижущая сила

Если мы потрем стеклянный стержень кусочком шелка, электроны перейдут из стекла в шелк, таким образом, стекло станет положительно заряженным, а шелк — отрицательно. С каждым движущимся электроном положительный заряд стекла и отрицательный заряд шелка будут возрастать, и новым электронам станет все труднее и труднее перемещаться. Для того чтобы выпустить больше отрицательно заряженных электронов из уже положительно заряженного стекла, надо вытягивать электроны наперекор притяжению противоположно заряженного стекла. Чтобы добавить эти электроны к уже заряженному отрицательно шелку, надо перемещать их вопреки отталкиванию одинаково заряженных тел. Так как продолжается увеличение положительного заряда стекла и отрицательного заряда шелка, притяжение и отталкивание становятся все сильнее и сильнее до тех пор, пока простое ручное натирание не потеряет способность перемещать электроны в дальнейшем.

Эта ситуация полностью аналогична той, которая получается при взаимодействии с гравитационными силами у человека, копающего яму. По мере того как он выбрасывает землю на край ямы, уровень земли вокруг вырастает, в то время как уровень земли внутри ямы понижается. Расстояние от дна ямы до верхнего края увеличивается, и становится все труднее и труднее добросить землю наверх. В конце концов копающий не может так высоко добросить землю, чтобы она достигла края, и выкопать яму глубже он не может.

Это указывает на ценность использования знакомых ситуаций, включающих гравитацию как аналогию менее известной ситуации, включающей электрические силы. Давайте же еще немного продолжим рассуждения о гравитационном поле Земли.

Мы можем полагать, что некое тело имеет определенную потенциальную энергию, зависящую от его положения относительно гравитационного поля Земли (см. ч. I). Чем выше

тело (т. е. чем больше расстояние от него до центра Земли), тем больше его потенциальная энергия. Чтобы поднять тело против земной гравитации, мы должны увеличить его потенциальную энергию, а для этого должны взять эту энергию откуда-то еще (видимо, из наших мышц).

Количество энергии, которая должна быть добавлена, не зависит от абсолютной величины изначальной потенциальной энергии тела или его конечной энергии, а от разницы потенциальных энергий в двух состояниях. Мы можем назвать эту разницу потенциальных энергий *разностью гравитационных потенциалов*.

Таким образом, предмет на 80-м этаже небоскреба имеет большую потенциальную энергию, чем предмет, находящийся на 10-м этаже того же самого небоскреба. Все точки на 80-м этаже имеют одну и ту же потенциальную энергию, и все точки 10-го этажа тоже имеют одинаковую потенциальную энергию. Оба этажа представляют собой *равнопотенциальные поверхности*.

Чтобы сдвинуть предмет с одной точки 10-го этажа на другую (игнорируя силу трения), не понадобится затратить никакой энергии, так как гравитационная разность равна нулю. То же самое будет верно при сдвиге предмета с одного места на другое на 80-м этаже. Несмотря на то что абсолютная потенциальная энергия на 80-м этаже больше, постоянная гравитационная разность также равна нулю.

Таким же образом, не сложнее поднять тело с 80-го этажа на 82-й, чем с 10-го на 12-й. (Если быть совсем точным, на 80-м этаже гравитационная сила чуть слабее, чем на 10-м, но разность столь незначительна, что ею можно пренебречь.) Значение имеет лишь разность в 2 этажа, которая одинакова в обоих случаях. Мы можем измерить разность в высоте (единственно важную для нас) по количеству энергии, которое мы должны внести, чтобы поднять тело определенной массы на эту разность в высоте.

В системе МКС единица энергии — джоуль (см. ч. I), а килограмм — единица массы. Таким образом, единица постоянной гравитационной разности — Дж/кг.

Эта ситуация аналогична наблюдаемой в электрическом поле. Как требуется энергия, чтобы отодвинуть одну массу от другой, точно так же требуется энергия, чтобы отодвинуть положительно заряженное тело от отрицательно заряженного, и наоборот. (Налю затратить энергию, чтобы придвинуть отрицательно заряженное тело к другому отрицательно заряженному телу или положительно заряженное тело к другому положительно заряжен-

ному. Для описанной ситуации нет подходящей аналогии в гравитационной системе, так как не существует такого явления, как гравитационное отталкивание.) При отдалении противоположно заряженных тел и приближении одинаково заряженных возрастет электрическая потенциальная энергия; однажды заряженные тела поменяли положение по отношению друг к другу, и разница в их потенциальной электрической энергии — *разность электрических потенциалов*.

(Понятие об изменении потенциальной энергии гораздо более широко используется в электрофизике, чем в других областях физики, поэтому, когда термин *разность потенциалов* используется без определения, он будет с большей вероятностью относиться к разности электрических потенциалов, чем, скажем, гравитационных.)

Опять же, разность электрических потенциалов может быть измерена в количестве единиц энергии, которые нужно приложить к определенному заряду, чтобы переместить его на определенное расстояние.

В системе МКС единица заряда — кулон, следовательно, единица энергетической потенциальной разницы — джоуль на кулон. Эта единица используется так часто, что ей было дано специальное название — вольт — в честь итальянского физика Алессандро Вольты (1745—1827), чья работа будет описана ниже. Из-за этого разность электрических потенциалов (или электрическое напряжение) могут иногда называть «вольтаж».

Вернемся опять к гравитационной аналогии и представим предмет, покоящийся на ровной поверхности. Он не имеет стремления к спонтанному перемещению на другой участок этой ровной поверхности, так как разность гравитационных потенциалов между разными точками ровной поверхности равна нулю. С другой стороны, если предмет поднять над поверхностью на расстояние метра и отпустить, то он самопроизвольно упадет, двигаясь из точки с большей потенциальной энергией в точку с меньшей потенциальной энергией. Это спонтанное движение производит разность гравитационных потенциалов.

Таким же образом, и электрический заряд не имеет стремления к спонтанному движению из одной точки электрического поля в другую с таким же уровнем потенциальной энергии. Однако если разность электрических потенциалов имеет место, то у электрического заряда будет тенденция к самопроизвольному движению из точки с большей энергией в точку с меньшей. Поскольку именно разность электрических потенциалов является причиной спонтанного движения энергетического заряда, то мы можем говорить об этой разности как об *электро-*

движущей силе (силе, которая «двигает электричество»), сокращенно ЭДС. Поэтому часто вместо того, чтобы говорить о потенциальной разнице во столько-то вольт, часто говорят «ЭДС во столько-то вольт».

Чтобы создать разность потенциалов, или ЭДС, сначала надо так или иначе произвести отдаление противоположных зарядов или сближение одинаковых зарядов. Таким образом, с помощью трения стеклянного стержня шелком убирают отрицательно заряженные электроны из стержня (положительный заряд которого возрастает) и добавляют отрицательно заряженные электроны к кусочку шелка (который становится все больше и больше отрицательно заряженным).

Иногда можно создать ЭДС путем сдавливания некоторых кристаллов. Кристалл часто состоит из положительно и отрицательно заряженных частиц, расположенных таким образом, что все положительно заряженные частицы и все отрицательно заряженные частицы сгруппированы около одной центральной точки. Если кристалл сдавить с двух сторон, он подвергнется уплощению и разрушению, и заряженные частицы, составляющие кристалл, будут сдвинуты вместе и будут расплющиваться в стороны. В большинстве случаев оба типа частиц поменяют позицию одинаковым образом и останутся распределены вокруг той же центральной точки.

Однако в некоторых случаях изменения будут такими, что среднее положение отрицательно заряженных частиц немного сместится по отношению к среднему положению положительно заряженных частиц. Это означает, что произведено отделение положительных зарядов от отрицательных, а следовательно, произведена и разность потенциалов между двумя сторонами кристалла.

Этот феномен был открыт Пьером Кюри (который открыл точку Кюри, см. гл. 9) и его братом Жаком в 1880 году. Они назвали феномен *пьезоэлектричество* («электричество через давление»).

Ситуация также может быть и обратной. Если кристалл, способный проявлять пьезоэлектричество, поместить в электрическое поле так, чтобы разность потенциалов проходила сквозь кристалл, то он изменит свою форму соответствующим образом. Если потенциальная разность применяется и устраняется много раз подряд, то можно заставить кристалл вибрировать и производить звуковые волны. Если кристалл имеет подходящие размер и форму, то он будет производить звуковые волны такой высокой частоты, что они будут лежать в ультразвуковом диапазоне (см. ч. I). Такого рода взаимные переходы звука и электрического напряжения используются в современных проигрывателях.

Конденсаторы

В работе с электричеством порой бывает необходимо сообщить телу наибольший заряд, затратив при этом как можно меньше усилий. Предположим, у вас есть изолированная металлическая пластина, которая сохраняет любой сообщенный ей заряд. Если вы дотронетесь до такой пластины отрицательно заряженным стержнем, поток электронов хлынет в нее и зарядит пластину отрицательно.

Вы можете продолжать этот процесс до тех пор, пока сохраняется разность потенциалов между стержнем и пластиной, то есть до тех пор, пока вы можете сообщать стержню, натирая его (например, лоскутом шерсти), больший электрический заряд, чем имеется в пластине. Но в конце концов заряд пластины увеличится до такого уровня, что никакие действия уже не придадут стержню заряд больший, чем у пластины. Тогда разность потенциалов станет равной нулю, и заряд уже не будет произвольно перемещаться.

Далее, возьмем вторую металлическую пластину, заряженную положительно, и параллельно расположим ее под первой, но так, чтобы пластины не касались друг друга. Тогда электроны первой пластины под воздействием положительного заряда сгруппируются с той стороны, которая ближе ко второй пластине. (Электроны, скапливаясь с этой стороны, будут находиться ближе друг к другу, «сконденсируются», и такой прибор, состоящий из двух плоских параллельных пластин, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, будет называться *конденсатором*.)

Другая сторона первой пластины потеряет часть отрицательно заряда, и ее потенциал уменьшится. Таким образом, снова возникнет разность потенциалов между отрицательно заряженным стержнем и этой стороной. Электроны снова перейдут от стержня к пластине, и ее общий заряд станет значительно больше, чем тот, который мог возникнуть в отсутствие второй пластины.

Подобным же образом положительный заряд второй пластины может увеличиться благодаря первой отрицательно заряженной пластине. Так пластины обеспечивают друг другу большую зарядную емкость. (Подобное устройство может также называться *конденсатором емкости*.)

Чем больше заряд пластин, тем больше разность потенциалов между ними.

Это подобно утверждению: чем выше пик горы и чем ниже долина, тем дольше падать. Между количеством заряда и разностью потенциалов существует такая же прямая зависимость.

Представим, что между пластинами — вакуум, тогда отношение между величиной заряда и разностью потенциалов примет постоянную величину. Выразим это формулой:

$$\frac{q}{v} = c, \quad (\text{Уравнение 10.3})$$

где q — заряд в кулонах (Кл); v — разность потенциалов в вольтах (В); c — *электрическая емкость*, которая измеряется в кулонах на вольт.

Единица в один кулон на вольт получила название 1 *фарад* (в честь Майкла Фарадея)

Таким образом, конденсатор с электрической емкостью в один фарад накапливает заряд, равный одному кулону, на каждой из пластин: на одной — положительный заряд, на другой — отрицательный на один вольт потенциальной разницы между пластинами. Но на самом деле конденсаторы с такой большой электрической емкостью обычно не встречаются. Как правило, за единицу измерения принимают *микрофарад* (одна миллионная фарада) или *микромикрофарад* (одна миллионная миллионной фарада).

Теперь предположим, что между пластинами поместили диэлектрик (непроводник). Диэлектрик уменьшает силу притяжения между противоположными зарядами и, таким образом, сокращает количество работы, которая необходима для разделения этих зарядов. Но, как объяснялось выше, разность потенциалов есть количество работы, затраченной на разделение противоположных зарядов. Это значит, что разность потенциалов между пластинами конденсатора при наличии диэлектрика равняется отношению v/κ , где κ — диэлектрическая постоянная.

Если мы обозначим электрическую емкость конденсатора с диэлектриком как c' , то тогда получим следующее:

$$c' = \frac{q}{v/\kappa} = \frac{\kappa q}{v} = \kappa \left(\frac{q}{v} \right). \quad (\text{Уравнение 10.4})$$

А сопоставив уравнения 10.3 и 10.4, получим

$$c' = \kappa c. \quad (\text{Уравнение 10.5})$$

Очевидно, что наличие диэлектрика между пластинами увеличивает электрическую емкость конденсатора прямо пропорционально его диэлектрической постоянной. Диэлектрическая постоянная воздуха равняется всего лишь 1,0006 (за 1 принимается проницаемость вакуума), поэтому воздух между пласти-

нами можно считать средой, равнозначной вакууму. Диэлектрическая постоянная стекла равна примерно 5, следовательно, электрическая емкость пластин, разделенных стеклом, увеличивается в пять раз. Соответственно, конденсатор, разделенный стеклом, накопит заряда в пять раз больше, чем тот, который имеет в качестве диэлектрика воздух.

Электрическую емкость можно увеличивать посредством уменьшения расстояния между пластинами, или посредством увеличения площади поверхности пластин, или применяя тот и другой способ одновременно. Если расстояние между пластинами сокращается, то уменьшается разность потенциалов (так же как и разность гравитационных потенциалов уменьшается, если объекты разделяют не два этажа, а один). Если это так, то U из уравнения 10.3 уменьшается, в то время как q остается неизменным, а C непременно возрастает. Опять же при увеличении площади поверхности пластин появляется больше места для скопления зарядов. Следовательно, q увеличивается в уравнении 10.3, а значит, и C тоже.

Конденсатор с большими пластинами может быть громоздким, но такого же результата можно добиться, объединив несколько конденсаторов между собой, соединив положительно заряженные пластины друг с другом при помощи проводникового материала, например металлического стержня, и так же поступив с отрицательно заряженными. Таким образом, любой заряд, добавленный к одной из пластин, распределится по всем пластинам того же типа, и множество маленьких пар пластин приобретут свойства одной большой пары. Таким образом сгруппированные конденсаторы называют *последовательно соединенными*.

В такой группе конденсаторов один набор пластин может быть неподвижным, а другой — поворотным. Вращая рукоятку, соединенную со стержнем, на который насаживаются пластины, можно передвигать отрицательно заряженные пластины вдоль линии положительно заряженных, и только те группы пластин, которые находятся прямо напротив друг друга, будут наиболее активными частями конденсатора. Следовательно, когда подвижная часть конденсатора движется вдоль линии, электрическая емкость постоянно возрастает, если же она смещается, электрическая емкость уменьшается. Такой конденсатор называется *регулируемым конденсатором*.

Наэлектризованное тело можно разрядить, потронувшись до него пальцем, если человек, касающийся этого предмета, стоит на поверхности без изоляции, особенно на земле, то есть если человек *заземлен*. Если предмет отрицательно заряжен, то

поток электронов, устремившись из него, будет проходить через человека в землю, пока отрицательный заряд не рассеется. Если предмет положительно заряжен, то поток электронов, наоборот, устремится из земли через человека в этот предмет, пока положительный заряд не будет нейтрализован. В любом случае поток электронов проходит через тело человека.

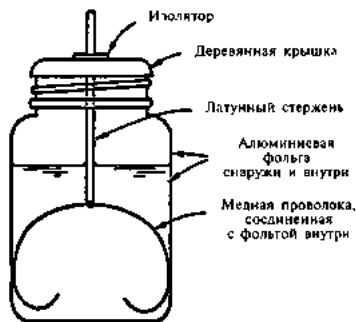
Поскольку ощущения живого организма передаются посредством потока слабейших зарядов, движущихся по нервам, неудивительно, что можно ощутить поток электронов, появляющийся в результате разрядки заряженного предмета. Слабый заряд воспринимается как покалывание. Сильный — как внезапный тяжелый удар, который причиняет резкую боль. Такое явление называют *электрическим шоком*. (Подобно физическому удару, поток электронов тоже может убить.) Так как конденсаторы накапливают большое количество электрических зарядов, то шок, полученный от них, гораздо сильнее того, который можно получить от обычного наэлектризованного стержня тех же размеров.

Это неприятное свойство конденсаторов было обнаружено случайно в 1745 году, когда они только начали появляться. Самый первый конденсатор представлял собой стеклянный сосуд, покрытый изнутри и снаружи металлической фольгой. Сосуд закупоривали, а пробку протыкали металлическим стержнем. Металлическая цепь, подвешенная к стержню, касалась фольги внутри сосуда.

Предположим, что фольга снаружи сосуда заземлена. Если коснуться металлического стержня, торчащего из пробки, отрицательно заряженным стержнем, то электроны, пройдя через него, распределятся на внутреннем покрытии из фольги. Электроны на внутреннем покрытии оттолкнут электроны на внешнем покрытии и отправят их в землю. Если повторить это несколько раз, то на внутреннем покрытии накопится большой отрицательный заряд, а на внешнем — большой положительный. Благодаря тому что листы фольги оказались конденсатором, разделенным стеклом, величина получившегося заряда превзошла все ожидания первых экспериментаторов.

Первые ученые, которые создали конденсаторы подобного типа, — немецкий экспериментатор Эвальд Юрген фон Клейст в 1745 году и голландский физик Питер ван Мушенбрук (1692—1761) в 1746 году — испытали удивление и даже ужас, когда разрядили устройство и подверглись электрическому шоку. Фон Клейст сразу же прекратил всякие эксперименты, а ван Мушенбрук продолжил исследования, но с крайней осторожностью. Поскольку ван Мушенбрук работал в университете Лейден в Нидерландах, его конденсатор называется *лейденской банкой*.

Во второй половине XVIII века лейденская банка использовалась в различных важных экспериментах, связанных с электричеством. Можно было собрать и высвободить заряд столь огромной величины, что он мог вызвать шок у сотни взвешенных за руки людей, убивать маленьких животных и т. д. Сами по себе эти эксперименты не представляли особой важности, но они были необходимы для демонстрации электрического феномена и для привлечения внимания научных кругов (и широкой общественности тоже).



Лейденская банка

В частности, лейденская банка демонстрировала вопрос, связанный с разрядом через воздух. Сухой воздух является изолятором, но никакая изоляция не совершенна, и, если заряд какого-то предмета достаточно велик, он сможет пройти сквозь заданный изолятор. (Представьте груз, покоящийся на деревянной доске, которая подвешена в нескольких футах от земли. Доска в данном случае является своего рода изолятором в том смысле, что она не позволяет грузу упасть, несмотря на разность гравитационных потенциалов между землей и грузом. Если массу груза постоянно увеличивать, то настанет момент, когда доска сломается и груз упадет на землю. В терминах электрофизики, «изолятор» будет пробит, а груз «разряжен».)

Когда электрический заряд проходит через обычно являющуюся изоляционной прокладку из воздуха, под воздействием

электрической энергии воздух нагревается до такой степени, что начинает светиться. Разряд сопровождается искрой. Горячий воздух увеличивается в объеме, а затем, отдавая свое тепло в окружающую атмосферу, снова сжимается. Этот процесс вызывает вибрации звуковых волн, поэтому разряд сопровождается не только сверканием, но еще и треском. Такие явления были замечены даже Герике в его опыте с заряженным шариком из серы. Лейденская банка с ее огромным накопленным зарядом производит больший эффект в создании искр и треска.

Франклин, который много работал с лейденской банкой, не мог не заметить сходства между разряжением и такими природными явлениями, как гром и молния. Лейденская банка порождает миниатюрные вспышки молнии и раскаты грома. И наоборот, земля и небо — это гигантские пластины лейденской банки. Франклин пытался доказать, что это больше чем просто поэтический образ.

В июне 1752 года он запустил воздушного змея во время грозы. Он привязал заостренный металлический стержень к деревянному каркасу змея и прикрепил к нему кусок шнурка. Все это он соединил с веревкой, на которой держится змей. Еще он привязал металлический ключ к веревке. Во избежание электрического удара Франклин спрятался под навес и держал веревку со змеем при помощи изолирующего шелкового шнурка.

Змей исчез в облаках, и Франклин заметил, что волокна веревки торчат в разные стороны, отклоняясь друг от друга, как будто они получили электрический заряд и отталкивали друг друга. По-видимому, ключ тоже получил заряд. Франклин осторожно приблизил костяшки пальцев к ключу, появилась искра — точно такая же искра, сопровождаемая точно таким же треском, которые ожидают от лейденской банки. Затем Франклин достал лейденскую банку, которую принес с собой, и зарядил ее небесным электричеством. Результат получился абсолютно таким же, как от заряда электрической фрикционной машины. Таким образом, он доказал, что и в небесах существует электричество и что молния — это гигантский электрический разряд, а гром — это мощный треск, сопровождающий такой разряд.

Он не остановился на этом. Франклин исследовал различные способы разряжения. В своих опытах он использовал предметы разной формы. Так, если поднести к предмету металлическую сферу, предмет разрядится через воздух на расстоянии в один дюйм. Если к тому же телу с тем же самым размером заряда поднести металлическую спицу, разряд возникнет на рас-

стоянии в 6—8 дюймов. Вывод можно было сделать такой: заряженное тело легче разрядить острым предметом, чем тупым. Кроме того, при разрядении тела острой спицей искры и треск не наблюдались. (Тем не менее сам факт разрядения тела определялся очень просто: заряженное тело внезапно перестало отталкивать подвешенный вблизи пробковый шарик с таким же зарядом.)

Франклин догадался, что такое явление может быть полезным для решения проблемы, связанной с грозой. Если на крышу здания поместить высокий заостренный металлический стержень, то он сможет довольно эффективно разряжать заряженные облака, прежде чем они заполнят вспышкой молнии пробел между собой и крышей. А если присоединить к такому *громоотводу* проводники, разряд будет отводиться в землю, не причиняя вреда зданию. Таким образом дома можно защищать от грозы.

И действительно, это приспособление работало очень хорошо. В следующие 20 лет здания всей Европы и Америки находились под защитным покровом изобретения Франклина. Франклин стал первым великим ученым Нового Света, и благодаря этому открытию о нем узнали в Европе (факт, который имел важные политические последствия в дальнейшем, когда Франклин отправился во Францию во время американской революции, четверть века спустя после легендарного запуска змеи). С изобретением громоотвода изучение электростатики достигло апогея. К концу XVIII века появился новый аспект в изучении электричества, и электростатика отошла на задний план.

Глава II

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ

Непрерывный поток электронов

Заряд может передаваться от одной точки к другой (иногда это описывается как движение электрического тока), как это представлялось во времена Грей в начале XVIII века (см. гл. 10). Однако до 1800 года обнаруживались только мгновенные электрические потоки такого рода. Заряд может переместиться из лейденской банки, например, в тело человека, но после одной мгновенной искры передвижение уже совершенно. Перемещение такого гигантского заряда, как молния, тоже происходит мгновенно. Говорят же «быстрый как молния».

Для того чтобы получить непрерывное перемещение заряда, или постоянный ток, из точки А в точку Б, необходимо со-

здавать новый заряд в точке А, как только поток электронов покинет ее, и поглощать этот поток, как только он достигнет точки Б.

Первые способы проделать это были разработаны на основе наблюдений, проводившихся в 1791 году итальянским медиком и физиком Луиджи Гальвани (1737—1798). Гальвани интересовался как работой мышц, так и экспериментами с электричеством. Работая с лейденской банкой, он обнаружил, что искры из нее заставляют сокращаться мышцы в бедре рассеченной лягушки, несмотря на то что в них уже нет жизни. Другие тоже наблюдали подобное явление, но Гальвани открыл нечто новое: когда металлический скальпель касался мышцы в момент появления искры из находящейся рядом лейденской банки, мышца сокращалась, хотя непосредственного контакта с искрой она не имела¹.

Полагая, что причиной этому является наведенный (индуцированный) электрический заряд в скальпеле, Гальвани поместил мышцы бедра лягушки в наэлектризованную атмосферу грозы, подвесив их на медных крючках на железной опраде. Он добился сокращения мышц, а к тому же понял, что можно было обойтись и без грозы.

Необходимо было всего лишь дотронуться до мышц двумя разными металлами одновременно, причем не важно, есть ли поблизости искра или нет, а также не важно, идет гроза на улице или нет. Два разных металла, контактируя одновременно с мышцей, могут не просто заставить ее сокращаться, а могут сделать это несколько раз. Очевидно, что электричество имеет какое-то отношение к этому процессу и, что бы ни происходило электрический заряд не утрачивал своей силы даже после разряда и сокращения мышцы, напротив, заряд мог самопроизвольно возникать снова и снова. Гальвани предположил, что электричество возникало в самой мышце, и назвал это «животным электричеством».

Однако другие ученые подозревали, что причиной порождения электрического разряда является все-таки скорее объединение двух металлов, нежели сама мышца. Наиболее выдающимся из этих ученых был Алессандро Вольта. В 1800 году он изучал комбинации различных металлов, но соединенных не мышечной тканью, а простыми растворами, которые никто бы не задозорил в какой-то связи с «живой силой».

¹ В результате этих экспериментов, которые привлекли внимание публики, сокращение мышцы человека как реакцию на электрический шок (или на любое другое неожиданное ощущение или даже сильную эмоцию) и стали называть «гальванизацией».

Он использовал различные металлы, объединенные в цепь, верно предположив, что для достижения лучших результатов необходимо иметь несколько источников, а не один. Сначала он использовал сосуды, наполовину наполненные соленой водой (каждый вместо мышцы лягушки), и соединял их перемычками в виде металлических пластин, медной и цинковой, спаянных вместе. Медный конец пластины опускался в один сосуд, цинковый — в другой. В каждом сосуде был медный конец одного моста с одной стороны и цинковый конец другого моста с другой стороны.

Такой вот «венюк из чаю», как его называл Вольта, мог служить источником электричества, которое, как было ясно показано таким образом, возникало в металлах, а не в животных тканях. Еще важнее то, что электричество возникало постоянно и могло перемещаться непрерывным потоком.

Чтобы избежать потери тока, Вольта испытал другое устройство.

Он взял маленькие диски из меди или серебра (для этого хорошо подошли монеты) и диски из цинка. Затем построил из них столбик: серебро, цинк, серебро, цинк и т. д. Между этими пластинками положил картонные диски, пропитанные соленой водой, которые играли роль лягушачьих мускулов Гальвани или его собственных сосудов с соленой водой. Если до верхушки такого «вольтова столба» дотронуться металлическим проводом, то можно увидеть искру у его основания, если к основанию столба поднести другой конец этого провода. Фактически, если соединить проводом верхушку и основание, в нем создавался постоянный ток.

Это явление не могли полностью понять до начала следующего века, но в основе его лежал тот факт, что атомы всех веществ содержат как отрицательно заряженные электроны, так и положительно заряженные протоны. Следовательно, электрический заряд в постоянно действующем вольтовом столбе на самом деле не был создан Вольтой — он всегда существовал в веществе. Вольтов столб служил просто для того, чтобы разделять уже существующие отрицательные и положительные заряды. Легче всего описать это разделение на примере двух разных металлов.

Представим себе соприкосновение двух металлов, к примеру цинка и меди. Каждый металл содержит электроны, с большей или меньшей силой привязанные к атомам этого металла. В атомах цинка электроны с ядром связаны слабее, чем в атомах меди. На границе между металлами электроны стремятся переменаться из цинка в медь. Можно описать этот процесс

как перетягивание атомами меди электронов из атомов цинка. Это продолжается недолго, так как атомы меди накапливают отрицательный заряд (благодаря перескочившим к ним электронам), а атомы цинка — положительный.

Дальнейшее перемещение электронов из положительно заряженного цинка в отрицательно заряженную медь быстро становится невозможным, и равновесие устанавливается на том уровне, когда заряд в обоих металлах еще очень мал. Однако заряд получается достаточно большим, чтобы его можно было распознать, и, поскольку противоположные заряды разделены, между металлами возникает *контактная разность потенциалов*.

Сила притяжения атомами электронов изменяется пропорционально изменению температуры, однако у разных металлов это изменение различно. Представим длинную полоску из цинка и длинную полоску из меди, соединенные только двумя концами, причем имеющими различную температуру (это называется *термопарой*).

На каждом конце полоски есть контактная разность потенциалов, но с двух концов она различна. Конец А медной полоски накапливает больше электронов, чем конец В, потому что температура увеличивает его силу притяжения электронов из цинка.

Поскольку концентрация электронов в меди на конце А больше, чем на конце В, то электроны из точки А устремятся по медной полоске в точку В. Теперь в В слишком много электронов, чтобы атомы могли их удержать при обычной температуре. Поэтому они начинают перескакивать к атомам цинка. Однако конец А, потерявший часть электронов, снова получает возможность приобретать их из цинка.

Процесс будет продолжаться бесконечно — электроны будут перемещаться из края А в край В внутри медной пластины и снова из края В в край А внутри цинковой, и так до тех пор, пока поддерживается разность температуры на концах пластин. Такое *термоэлектричество* впервые обнаружил в 1821 году немецкий физик Томас Иоганн Зеебек (1770—1831).

Практическое применение этого явления несложно придумать. Количество постоянного тока, который проходит через термопару, зависит от температурной разницы на концах пластин. Следовательно, такое приспособление можно использовать как термометр. Так, если брать высокоплавкие металлы, например платину, то можно измерять температуры гораздо более высокие, чем те, которые способен выдержать обычный термометр. И еще, поскольку термопара увеличивает и изме-

ряет даже самые незначительные электрические потоки, то с ее помощью определяют очень слабые источники тепла, например, можно измерить тепло, исходящее от Луны или Венеры¹.

Химические элементы питания

Соединение разных металлов посредством токопроводящего раствора создает эффект, похожий на эффект термопары, но в данном случае изменение температур уже не обязательно.

Предположим, к примеру, что полоску из цинка наполовину опустили в раствор сульфата цинка. Известно, что цинк вступает в реакцию с раствором. Каждый атом цинка, переходя в раствор, теряет по два электрона, следовательно, на стержне накапливается отрицательный заряд. Атомы цинка, потерявшие электроны, становятся положительно заряженными. Их положительный заряд по величине равен отрицательному заряду потерянных электронов. Заряженный атом называется *ионом*. Итак, мы имеем: положительно заряженные ионы цинка в растворе и атомы цинка на полоске, накапливающие отрицательный заряд.

Теперь представим полоску меди, опущенную в раствор сульфата меди. В растворе уже имеются положительные ионы меди, поэтому новые ионы образовываться не будут, наоборот, ионы меди станут возвращаться к полоске вместе со своим положительным зарядом. Теперь представим, что сосуд с кислотой, в которую погружена цинковая пластина, и сосуд с сульфатом меди, в который погружена медная пластина, соединены пористым мостиком, так что жидкости могут постепенно проникать из одного сосуда в другой.

У нас есть цинковая полоска с небольшим отрицательным зарядом и медная полоска с небольшим положительным зарядом. Если две полоски соединить проводом, то избыточные электроны с цинковой пластины легко перейдут на медную, на которой

¹ Так как электрический поток может поддерживаться одной температурой, то мы способны вырабатывать постоянный ток посредством сжигания керосина (без какого-либо движения). Как мы увидим в главе 12, в XIX веке были очень популярны и другие способы получения постоянного тока при помощи сжигания топлива, но именно возможность термоэлектричества вызвали обновенный интерес в XX веке. Особенно интересна возможность использования Солнца в качестве источника производства температурной разницы, тогда солнечную энергию станет возможным использовать для генерации термоэлектричества, которое будет производиться в огромных масштабах. Это стало бы наиболее желанным дополнением к энергоресурсам человека.

недостаток электронов. Так как цинк потеряет свои избыточные электроны и, как следствие, его отрицательный заряд уменьшится, то новые атомы цинка начнут вступать в реакцию с раствором для создания новых избыточных электронов. На медной полоске, наоборот, из-за перебежавших к ней электронов положительный заряд уменьшится, а значит, все больше новых положительных ионов меди устремится из раствора на полоску.

Итак, электроны по проводу перебегают от цинка к меди, а затем посредством раствора возвращаются к нему. Процесс будет длиться до тех пор, пока все атомы цинка не растворятся или пока все ионы меди не осадут (или пока не случится и то и другое вместе). В термопаре поток электронов поддерживался разницей температур, в вольтовом столбе — химической реакцией.

Хотя электроны перебежали по проводу от цинка к меди, ученые, основываясь на неправильном предположении Франклина (см. гл. 10), пришли к заключению, что ток движется в направлении от положительного полюса (медь) к отрицательному (цинк).

Похождением позже экспериментов Вольты Фарадей придумал термин для обозначения металлических стержней, которые опускались в растворы и служили полюсами. Он назвал их *электродами* (от греческого слова, означающего «направление электричества»). Положительный полюс получил название *анод* (верхний), отрицательный — *катод* (нижний), поскольку Фарадей представлял электричество в виде потока, стремящегося вниз.

Различные химические элементы, которые могут порождать постоянный электрический ток, называются гальваническими элементами, электрическими элементами или электрохимическими элементами. Все три названия могут употребляться. Часто, как и в начальных экспериментах Вольты, используются группы элементов. Такая группа одинаковых предметов называется «батареей», поэтому группы элементов, таких как вольтов столб, — это *электрические батареи*, или просто *батареи*. (В разговорной речи слово «батарея» может относиться и к одиночному элементу.)

Благодаря открытию Вольты появилась возможность изучать постоянные и продолжительные потоки электричества. Вначале было принято называть это явление «гальванизмом» или «гальваническим электричеством» в честь Гальвани. Однако разумнее называть его *электродинамикой* («электричеством в движении») в противоположность электростатике. Наука, изучающая химические реакции, которые создают электрический ток, называется, естественно, *электрохимией*.

Электрический ток начали использовать почти сразу же после его открытия. Поскольку поток электронов является результатом химических реакций, неудивительно, что электроны, движущиеся через смесь различных химических субстанций, могут порождать новую химическую реакцию, причем такую, которую сложно или невозможно получить иными методами.

В 1800 году, спустя всего шесть недель после первого доклада Вольты, два английских ученых, Уильям Николсон (1753—1815) и Энтони Карлейл (1768—1840), пропустили электрический ток через воду и обнаружили, что при этом она разлагается на водород и кислород. Такой процесс, при котором через растворы или расплавы проходит электрический ток, называется *электролизом* («расщепление электричеством»). В результате этого процесса молекулы распадаются на простые составляющие.

В 1807-м и 1808 годах английский химик Гемфри Дэви (1778—1829), используя батареи небывалой силы, смог разложить на жидкие составляющие некоторые очень активные металлы. Ему удалось отделить три металла и впервые искусственно создать такие металлы, как натрий, калий, кальций, стронций, барий и магний, — то, что не удавалось до использования электричества еще ни одному химику.

Его ассистент, Фарадей, продолжил изучение электролиза и показал, что количество вещества, выделяющееся при электролизе, прямо пропорционально электрическому заряду, который прошел через устройство. Его *законы электролиза*, которые будут детально рассмотрены в III части, способствовали формированию атомистического взгляда на материю, который предложил английский химик Джон Дальтон (1766—1844). В течение следующего столетия ученые, опираясь на эти законы, открыли электрон и установили внутреннее устройство атома.

Благодаря исследованиям Фарадея кулон можно более понятным образом определить не только через общее количество заряда или общее количество электричества (точную цифру которых иногда сложно установить), но и через количество тока, приводящее к химической реакции определенного объема (а это определяется очень просто). Например, заряд в один кулон, пропущенный через раствор серебра, приводит к выделению 1,18 мг металлического серебра.

Особенно интересует химиков выделение серебра массой 107,87 г — это то, что они называют «вес серебра в грамм-атомах». Следовательно, их интересует, сколько кулонов необходимо для получения 107,87 г серебра. Но это равняется 107,870 мг. Разделим это на 1,18 мг (количество серебра, которое выделя-

ется при 1 кулоне). Получим 95 500 — искомое число кулонов. Это число принимают за 1 *фарад* тока.

Один кулон электричества выделяет определенное количество серебра (или производит другую химическую реакцию определенного объема) независимо от скорости прохождения тока через раствор. Но вот скорость выделения серебра зависит от количества кулонов, которое проходит через раствор в единицу времени. Естественно поэтому говорить о мощности потока (или о *силе тока*) как о количестве кулонов в секунду. Один кулон в секунду равняется одному *амперу*, в честь Андре Мари Ампера (1775—1836), чья работа будет описана ниже. Итак, ампер — это единица силы тока.

И тогда, если ток, проходя через раствор, образует 1,18 мг металла каждую секунду, мы говорим, что через раствор проходит 1 ампер тока.

Сопротивление

Сила тока между точками А и В зависит от разности потенциалов между ними. Если при разности потенциалов 20 вольт между этими точками возникает ток силой 1 ампер, то при разности потенциалов 40 вольт возникает ток силой 2 ампера, а при разности потенциалов 10 вольт — 0,5 ампера.

Прямая зависимость между разностью потенциалов и силой тока верна только при передаче тока по определенному проводнику при определенных условиях. Если природа проводника меняется, то и зависимость между разностью потенциалов и силой тока меняется.

Например, с увеличением длины проводника (при постоянной разности потенциалов) сила тока уменьшается. Так, если в проволоке длиной 1 м при разности потенциалов 20 В возникает ток силой 1 А, то при той же разности потенциалов в проволоке такой же толщины, но длиной 2 м возникает ток силой 0,5 А.

С другой стороны, при увеличении толщины проволоки сила тока, возникающего в ней, также увеличивается пропорционально увеличению площади поперечного сечения, или, что тоже верно, пропорционально квадрату диаметра проволоки. Если в проволоке толщиной 1 мм при разности потенциалов 20 В возникает ток силой 1 А, то при увеличении толщины проводника до 2 мм (при постоянной разности потенциалов) возникает ток силой 4 А.

Кроме того, очень важно, по какому веществу проходит ток. Если в медной проволоке при разности потенциалов 20 В возникает ток силой 3 А, то в золотой проволоке такой же длины

и толщины и с такой же разностью потенциалов возникает ток силой 2 А, а в вольфрамовой проволоке при тех же условиях — 1 А. В кварцевом волокне такой же длины и толщины возникает ток силой 0,000000000000000000003 А — такой маленький, что его почти не существует.

Все эти законы и правила открыл немецкий физик Георг Симон Ом (1787—1854). В 1826 году он высказал предположение, что сила тока, возникающего и проходящего на данном участке под воздействием данной разницы потенциалов, зависит от сопротивления проводящего материала; увеличение длины проводника в 2 раза приводит к увеличению сопротивления в 2 раза; увеличение диаметра в 2 раза приводит к уменьшению сопротивления в 4 раза; замена вольфрама на медь приводит к уменьшению сопротивления и т. д.

Сопротивление можно рассматривать как отношение между разностью потенциалов и силой тока. Если записать разность потенциалов («электродвижущую силу») как E , силу тока как I , а сопротивление как R , то можно сказать, что

$$R = \frac{E}{I}. \quad (\text{Уравнение 11.1})$$

Это закон Ома. Из этой формулы, путем перестановки данных, закон Ома может быть записан как $I = E/R$ и $E = IR$.

Сопротивление изменяется, как нетрудно догадаться, в *омах*, то есть проводник имеет сопротивление 1 Ом, если при разности потенциалов 1 В сила тока равна 1 А. Из уравнения 11.1 мы видим, что 1 Ом можно представить как 1 В на 1 А.

В некоторых случаях удобнее рассматривать *электрическую проводимость* материала, чем сопротивление. Электрическая проводимость — величина, обратная сопротивлению. Единица измерения электропроводности была представлена (по причине ученых) как Мо, то есть Ом наоборот.

Проводник с сопротивлением 1 Ом имеет электропроводимость $1/\Omega$, или 1 Мо. Сопротивление, равное 3 Ом, соответствует электропроводности $1/3$ Мо, сопротивление, равное 100 Ом, соответствует электропроводности $1/100$ Мо и т. д. Если представить электропроводность как C , то из уравнения 11.1 получаем:

$$C = \frac{1}{R} = \frac{I}{E}. \quad (\text{Уравнение 11.2})$$

Таким образом, 1 Мо — то же самое, что 1 А на 1 В.

При любых условиях сопротивление зависит от длины и диаметра проводника (кроме других параметров). В целом сопротивление изменяется прямо пропорционально длине (L) и обратно пропорционально площади поперечного сечения (A) проводника. Таким образом, сопротивление пропорционально зависимости L/A . Если представить эту зависимость как постоянную ρ (греческая буква «ро»), то можно сказать, что

$$R = \frac{\rho L}{A}, \quad (\text{Уравнение 11.3})$$

где ρ — удельное сопротивление. Каждое вещество имеет собственное удельное сопротивление.

Преобразовав уравнение 11.3 для нахождения удельного сопротивления, мы получим

$$\rho = \frac{RA}{L}. \quad (\text{Уравнение 11.4})$$

В системе МКС единица измерения R — Ом, A — квадратный метр (м^2), а L — метр. Единица измерения ρ соответственно Ом-квадратные метры на метр, или, сократив уравнение, *ом-метры*.

Чем лучше проводник, тем ниже сопротивляемость. Самым лучшим из известных проводников является серебро, которое при температуре 0 °С имеет сопротивляемость около 0,0000000152, или $1,52 \times 10^{-12}$ ом·м. Медь достаточно близка к нему — 0,000000154, далее идут золото и алюминий с сопротивляемостью, равной соответственно 0,000000227 и 0,000000263 Ом·м. В целом металлы имеют низкую сопротивляемость и, как следствие, являются отличными проводниками.

Даже сопротивляемость никрома, сплава никеля, железа и хрома, составляющая всего лишь 0,000001 Ом·м, считается необычно высокой для металлов. Сопротивляемость металлов так мала потому, что их атомная структура такова, что каждый атом имеет один или два свободно движущихся, удаленных от ядра электрона. Поэтому заряд может легко переходить от атома к атому с этими электронами¹.

¹ Движение электронов — это не то же самое, что электрический ток. Электроны движутся с определенной не очень высокой скоростью, но сила, приводящая их в движение, движется гораздо быстрее. Если выстрелить шашки в ряд и щелкнуть еще по одной шашке так, чтобы она ударилась об этот ряд с одного края, то она ударится о ряд шашек и остановится (может быть, даже слегка отскочит). Шашки, в которые она ударится, останутся приблизительно на своем месте, но крайняя шашка с другой стороны отскочит, про-

Вещества, электроны в атомах которых прочно «присоединены» к ядру, обладают очень высокой сопротивляемостью. Даже при огромных разностях потенциалов в них может возникнуть ток лишь очень небольшой силы. Вещества, обладающие сопротивляемостью свыше миллиона ом-метров, вообще не способны проводить ток. Древесина клена имеет сопротивляемость 300 млн Ом·м, стекло — около триллиона, сера — около квадриллиона, а кварц — около 500 квадриллионов Ом·м.

Помимо проводников, сопротивляемость которых очень низка, и изоляторов, сопротивляемость которых очень высока, существует группа веществ, которые характеризует сопротивляемость средней силы, выше, чем у нихрома, но ниже, чем у древесины. Наиболее известные примеры — элементы германий и кремний. Сопротивляемость германия — 2 Ом·м при 0 °С, а кремния — 30 000. Такие вещества, как германий и кремний, называют *полупроводниками*.

Обратите внимание, что вышеприведенные значения сопротивляемости верны для температуры 0 °С. Эти значения меняются с возрастанием температуры у металлов в сторону возрастания. Так, электроны, двигаясь сквозь проводник, обязательно встречают атомы вещества, которые преграждают им движение, и некоторая часть электрической энергии потеряется при преодолении препятствий. Эта потеря энергии происходит из-за сопротивляемости вещества. Если температура проводника возрастает, то атомы проводника вибрируют быстрее (см. ч. I), и электронам становится труднее проходить; следовательно, сопротивляемость увеличивается. (Сравните, к примеру, свои собственные ощущения: насколько легче продираться сквозь толпу спокойно стоящих людей, чем через толпу, где все снуют туда-сюда.)

Если известна сопротивляемость при 0 °С (ρ_0), то она увеличивается на некоторую часть этой величины ($\rho_0\alpha$) с каждым градусом повышения температуры (t). Следовательно, увеличение сопротивляемости для каждой заданной температуры — $\rho_0\alpha t$. Общая сопротивляемость при этой температуре (ρ_t), следовательно, равняется сопротивляемости при 0 °С плюс увеличение, или:

$$\rho_t = \rho_0 + \rho_0\alpha t = \rho_0(1 + \alpha t). \quad (\text{Уравнение 11.5})$$

должна движение шашки, по которой шелкнули. Сами шашки почти не двигались, но момент силы перешел по линии шашек со скоростью, которая зависит от эластичности материала, из которого эти шашки сделаны. Таким же образом, независимо от реальной скорости электронов, электрическая сила передается сквозь любое вещество со скоростью света.

Постоянная α , показывающая увеличение сопротивляемости при каждом градусе, называется температурным коэффициентом сопротивляемости.

Пока температурный коэффициент сопротивляемости остается неизменным, реальное сопротивление отдельного проводника изменяется по мере изменения температуры очень простым образом. Соответственно сопротивление тугоплавких металлов заданных размеров позволяет добиваться больших температур.

Что касается полупроводников, температурный коэффициент сопротивляемости для них отрицательный, то есть их сопротивляемость уменьшается с увеличением температуры. Причиной этому является то, что при повышении температуры материала жесткость удержания электронов в атоме ослабевает; большее количество электронов получает возможность двигаться и переносить заряд. Возросшее количество доступных электронов преодолевает дополнительное сопротивление, производимое активнее вибрирующими атомами, поэтому общая сопротивляемость падает.

Если бы температурный коэффициент сопротивляемости действительно был постоянен, то следовало бы ожидать, что при температурах, близких к абсолютному нулю, и сопротивляемость упадет до нуля. Однако при низких температурах сопротивляемость медленно уменьшается, и зависимость, по которой понижается сопротивление с понижением температуры, такова, что в начале XX века физики были уверены, что сопротивление металла упадет до нуля только при абсолютном нуле температуры, и ни на йоту раньше. Это казалось здравым рассуждением, ведь только при абсолютном нуле температуры полностью прекратится вибрирование атомов и исчезнут любые препятствия для движения электронов.

Однако изменение реальных сопротивлений при температурах, близких к абсолютному нулю, стало возможно только после того, как голландский физик Хейке Камерлинг-Оннес (1853—1926) смог в 1908 году получить жидкий гелий. Среди всех веществ у гелия самая низкая температура плавления, 4,2 °K, и только в среде из жидкого гелия изучение сверхнизких температур становится возможным.

В 1911 году Камерлинг-Оннес установил, к своему удивлению, что сопротивляемость ртути, которая по мере понижения температуры становилась все меньше и меньше по предсказуемому графику, вдруг резко упала до нуля при температуре 4,16 °K.

Ряд других металлов тоже продемонстрировал свойство *сверхпроводимости* при температуре жидкого гелия. Есть некоторые сплавы, которые становятся сверхпроводящими при темпера-

турах, близких к температуре плавления водорода. Сплав ниобия и олова становится сверхпроводящим уже при температуре $18,1^\circ\text{K}$.

Другие же, например титан, становятся сверхпроводящими только при температурах ниже $0,39^\circ\text{K}$. Хотя было найдено уже около 900 веществ, которые обнаруживают свойства сверхпроводимости при температурах около абсолютного нуля, остается еще множество веществ (включая являющиеся при обычных температурах хорошими проводниками, например серебро, медь и золото), которые до сих пор пока не продемонстрировали сверхпроводимости ни при каких температурах, даже самых низких из испробованных.

Электроэнергия

Для поддержания электрического тока при сопротивлении требуется энергия. Необходимое количество энергии напрямую зависит от количества общего тока при сопротивлении, также зависит и от силы тока. Так как при заданном сопротивлении сила тока напрямую зависит от разности потенциалов (согласно закону Ома), то можно сказать, что энергия заданного электрического тока равна количеству передаваемого заряда, умноженного на разность потенциалов.

Так как энергия может быть трансформирована в работу, обозначим ее W . Таким образом, если обозначить разность потенциалов как E , а общее количество передаваемого заряда как Q , приходим к следующему:

$$W = EQ. \quad (\text{Уравнение 11.6})$$

Единицей измерения разности потенциалов является вольт, а единицей измерения заряда — кулон. Если энергия равна количеству передаваемого заряда, умноженному на разность потенциалов, то размерность единицы энергии должна выражаться в вольтах, умноженных на кулоны. Однако, согласно определению, вольт — это один джоуль на кулон (см. гл. 10). Таким образом, единицей энергии должен быть джоуль, разделенный на кулон, умноженный на кулон, или — джоуль. Так как джоуль — это единица энергии в системе МКС, то можно сказать, что при передаче электрического заряда в 1 кулон при разности потенциалов сопротивления в 1 вольт расходуется 1 джоуль энергии, который может преобразовываться в другие формы энергии, такие как работа, свет или тепло.

Часто всего полезнее бывает высчитывать степень расхода энергии (или выполняемой работы), чем общий объем затраченной энергии (или выполненной работы). Например, если две системы потребляют одинаковое количество энергии или выполняют одинаковый объем работы, но одна система это выполняет за минуту, а другая за час, то очевидно, что разница между ними существенна.

Степень расхода энергии или выполнения работы называется *мощностью*. Если рассматривать энергию, расходуемую в секунду, то единицей мощности будет *джоуль в секунду*. Один джоуль в секунду получил название *1 ватт*, в честь шотландского ученого Джеймса Уатта (1736—1819), работа которого была описана в части I.

Если 1 ватт равен 1 джоулю в секунду, а 1 джоуль равен 1 вольт-кулону (согласно уравнению 11.6), то можно считать, что 1 ватт равен 1 вольт-кулону в секунду. Однако 1 кулон в секунду равен 1 амперу, и тогда вольт-кулон в секунду будет эквивалентен вольт-амперу, и это приводит нас к заключению, что 1 ватт равен 1 вольт-амперу.

Все это означает, что ток, направляемый разностью потенциалов в 1 вольт и имеющий силу 1 ампер, являет собой мощность в 1 ватт. В общем, электрическая мощность определяется разностью потенциалов, умноженной на силу тока. Если обозначить мощность как P , то получается следующее:

$$P = EI. \quad (\text{Уравнение 11.7})$$

Электрические приборы обычно обозначаются числом ватт, которые говорят об уровне потребления ими электрической энергии. Лучше всего мы знакомы с этим на примере электрических ламп. В лампах количество расходуемой энергии используется для повышения температуры нити накала. Чем выше расход энергии и чем выше температура нити, тем больше излучение, исходящее от лампы. Именно поэтому лампы в 100 ватт ярче и горячее, чем лампы в 40 ватт.

Обычно разность потенциалов электрического тока в жилых домах — 120 вольт, и она остается неизменной. Из уравнения 11.7 мы видим, что $I = P/E$. Соответственно, для лампы в 100 ватт, горящей в жилом доме, сила тока будет следующей: $I = 100/120 = \frac{5}{6}$. Таким образом, сила тока в лампе в 100 ватт будет равна $\frac{5}{6}$ ампера. Исходя из этого мы можем точно рассчитать нужное сопротивление (R) лампы. Согласно закону Ома, $R = E/I$, $R = 120$ поделить на $\frac{5}{6}$, т. е. 144 ома.

Ватт является единицей мощности в системе МКС, однако он не является наиболее часто употребляемым. Чаше мы исполь-

уем значение *киловатт*, который равен 1000 ватт. В систему МКС не входит такая единица, как *лошадиная сила*, которая всегда употреблялась в Соединенных Штатах как единица измерения для двигателей внутреннего сгорания. Лошадиная сила больше ватта; 1 лошадиная сила равна 746 ватт. Из этого следует, что 1 киловатт равен 1,34 лошадиной силы.

Так как мощность — это энергия, поделенная на время, то энергия будет мощностью, умноженной на время. Данное соотношение, как обычно, подводит нас к единицам измерения. Так как 1 ватт = 1 джоуль/секунду, то 1 джоуль = 1 ватт-секунда. Таким образом, *ватт-секунда* является полноправной единицей энергии в системе МКС, так же как и джоуль, которому она равняется. В этой группе более крупной единицей энергии будет *киловатт-час*. Так как киловатт равен 1000 ватт, а 1 час равен 3600 секундам, то киловатт-час будет равен (1000) (3600) ватт-секунд или джоулей. Другими словами, 1 киловатт-час = 3 600 000 джоулей. Лампа в 100 ватт (0,1 киловатт) в течение 24 часов сжигает энергию равную 2,4 киловатта. Счета за электричество, которые мы получаем дома, основаны на потреблении киловатт-часов энергии.

Из закона Ома (уравнение 11.1) мы знаем, что $E = IR$. Совместив эту формулу с формулой 11.7, мы получаем следующее:

$$P = IR^2 \quad (\text{Уравнение 11.8})$$

Другими словами, уровень электрической энергии, расходуемой на электрический ток, изменяется прямо пропорционально сопротивлению, умноженному на силу тока в квадрате.

Иногда очень важно израсходовать как можно меньше энергии при передаче тока, т. е. при проводке тока от аккумулятора (или другого источника) к тому месту, где электрическая энергия будет преобразована в другую полезную форму энергии (например, к электрической лампе, где часть энергии будет преобразована в свет). В таких случаях сопротивление должно быть как можно ниже. При одинаковой длине и толщине проволоки самое низкое сопротивление у меди и серебра. Так как медь намного дешевле серебра, то именно из этого материала обычно изготавливают электрические проводки.

Однако для передачи электричества на длинные расстояния даже медь является дорогой, и тогда используется третий вариант — очень дешевый алюминий. Алюминий, несмотря на то что его сопротивление в 1,7 раза выше, чем у меди, все же является хорошим проводником. Высокую сопротивляемость можно уравновесить тем, что плотность алюминия меньше

плотности меди в 3 раза, поэтому алюминиевая проволока толщиной 1 мм будет не тяжелее медной проволоки толщиной 0,6 мм при той же длине. Сопротивление понижается по мере увеличения площади поперечного сечения проволоки; следовательно, сопротивление более толстой алюминиевой проволоки будет меньше, чем более тонкой (и значительно более дорогой), равной по весу медной проволоки.

С другой стороны, иногда требуется преобразовать электрическую энергию в тепло настолько, насколько это возможно, например в утюгах, тостерах, электрических плитах и т. д. В этих случаях требуется сравнительно высокое сопротивление (но не настолько высокое, чтобы не давать току достигнуть определенной силы), и для этого применяются сплавы с высоким сопротивлением, такие как нихром.

В электрической лампе особенно нужна высокая температура, достаточная для излучения большого количества видимого света (см. гл. 8). Всего несколько проводников могут выдержать столь высокую температуру, и один из них — вольфрам. Температура плавления вольфрама — 3370 °С, чего более чем достаточно. Однако вольфрам обладает всего лишь $\frac{1}{20}$ сопротивляемости нихрома. Для повышения сопротивляемости вольфрама нить накаливания в лампе должна быть одновременно тонкой и длинной.

(При температуре каления, которая очень высока, вольфрам моментально вступал в реакцию с кислородом, находящимся в воздухе, и портился. По этой причине в ранние дни зарождения ламп накаливания воздух из них откачивали. Однако в вакуумном пространстве тонкие вольфрамовые нити слишком быстро испарялись и имели очень ограниченный срок жизни. Для решения этой проблемы в лампах стали применять инертные газы: сначала азот, а затем аргон. Эти газы не вступали в контакт с добела накаленной вольфрамовой нитью, а давление газа сокращало испарение и увеличивало срок жизни ламп.)

Цепи

Допустим, что ток пропустили через проводник сопротивлением (R) в 100 Ом. Далее его пропустили через проводник сопротивлением (R') в 50 Ом, а затем сопротивлением (R'') в 30 Ом. Назовем эти этапы «сопротивлениями» и для простоты допустим, что сопротивления других проводников, помимо трех вышеназванных, маловажны и могут быть опущены.

Вышеуказанные сопротивления являются *последовательными*: ток должен пройти сначала первый, потом второй, а затем и

третий этап сопротивления. Очевидно, что в конечном счете ток прошел через общее сопротивление в $100 + 50 + 30$, или 180 Ом. Каждый раз, когда ток проходит через этапы, соединенные одной цепью, общее сопротивление будет равным сумме всех поэтапных сопротивлений.

Если в наших домашних электрических сетях ток имеет разность потенциалов в 120 вольт и мы допустим, что ток должен будет пройти только через сопротивления R , R' и R'' , то при помощи закона Ома мы сможем высчитать силу тока, проходящего через сопротивления. Общее сопротивление равно 180 Ом, и, следуя формуле $I = ER$, вычисляем, что сила тока равна 120 В, разделенным на 180 Ом, следовательно, $2/3$ ампера. Весь ток проходит через все сопротивления, поэтому его сила на всем протяжении системы остается неизменной.

Закон Ома может быть применен как к части системы, так и ко всей системе. Какова, к примеру, разность потенциалов на первом из трех этапов системы, обозначенном R ? Его сопротивление задано как 100 Ом, а его вычисленная нами для этого участка (как и для всех остальных) сила тока равна $2/3$ ампера. По закону Ома $E = IR$, так что разность потенциалов на первом участке будет равна 100 Ом умножить на $2/3$ ампера, следовательно, $66\frac{2}{3}$ вольта. На втором сопротивлении, обозначенном как R' , она будет равна 50 Ом умножить на $2/3$ ампера, следовательно, $33\frac{1}{3}$ вольта. На третьем сопротивлении, обозначенном как R'' , будет равна 30 Ом умножить на $2/3$ ампера, следовательно, 20 вольт. Общая разность потенциалов будет равна $66\frac{2}{3} + 33\frac{1}{3} + 20$, следовательно, 120 вольт¹. Общая разность потенциалов в цепи равна сумме разности потенциалов всех участков цепи.

Допустим, что к цепи добавили четвертый участок сопротивления, скажем в $60\ 000\ 000\ 000\ 000$ Ом. Другие сопротивления по сравнению с этим настолько малозначительны, что их можно будет игнорировать. Сила тока будет равна 120 вольтам, поделенным на 60 триллионов Ом, следовательно — две триллионных ампера. Эта сила настолько мала, что с таким же успехом можно говорить об отсутствии тока вообще.

Если два проводника разделить воздушной пробкой, то движение тока прекратится, так как у воздуха очень высокая сопротивляемость. Для непрерывного движения тока требуется, чтобы между проводниками не было значительных прослоек воздуха. Электрический ток должен передвигаться по непрерыв-

¹ Даже проводка, хоть ее сопротивляемость и настолько низка, насколько это вообще возможно, имеет сопротивление. Проводка последовательно соединена с объектом, к которому ведет, и в самой проводке существует некоторая разность потенциалов, хотя и небольшая, порядка одного-двух вольт.

ному пласту проводящих материалов от одного полюса аккумулятора (или другого источника электричества) к другому полюсу. Электрический ток, покинув аккумулятор, должен по кругу вернуться к нему, это называется *электрической цепью*.

Если в последовательно соединенной цепи возникает воздушная пробка, появляется высокое сопротивление и ток практически пропадает. Такая цепь называется «разомкнутой», или «разорванной». Если же воздушная пробка устраняется, то электрический ток возобновляет свое движение и цепь называется «замкнутой»¹. Электрические розетки в стенах не передают электрического тока, если в них не вставить штепсель, потому что между двумя «портами» существует воздушная пробка. Однако она исчезает, когда в розетку вставляют штепсель. Тем не менее в электрических приборах имеется своя воздушная пробка, так что сразу после подключения к электрической цепи электрический ток не поступает. Только после того как повернуть переключатель или нажать кнопку на приборе, эта вторая воздушная пробка исчезает и электрический ток начинает циркулировать.

Иногда желательно, чтобы воздушная пробка возникала мгновенно. Существуют некоторые условия, когда сила тока в той или иной цепи может возрасти до нежелательного уровня. При возрастании силы тока уровень расхода энергии и соответственно уровень нагревания возрастают пропорционально квадрату силы тока (см. уравнение 11.8). Тепло может повредить электрический прибор или положить начало пожару в доме.

Для того чтобы это предотвратить, обычно в цепи вставляют пластину низкотемпературного сплава. Устройство, содержащее подобный сплав, называется «*плавким предохранителем*». В том случае, если сила тока превышает предел, указанный на предохранителе (обычно в бытовых приборах этот предел составляет 15 ампер), то уровень тепла возрастает и пластина начинает плавиться, что приводит к возникновению воздушной пробки, и цепь разрывается. Электрический ток в цепи можно возобновить только после замены предохранителя. Разумеется, если предохранитель сгорел неоднократно, то разумнее всего проверить всю цепь и выявить неполадки.

¹ Естественно, если разность потенциалов достаточно высока, ток будет иметь значительную силу при любом сопротивлении. Огромная разность потенциалов между облаками или между облаками и землей, существующая во время грозы, является достаточной, чтобы электрический заряд смог преодолеть большие расстояния, заполненные воздухом. И человек может воспроизводить это явление в меньших масштабах («рукотворные молнии»). Однако обычный электрический ток, с которым мы имеем дело, не представляет опасности, так как не может преодолеть даже маленькие расстояния, заполненные воздухом.

Когда в сети последовательно соединены несколько объектов, то один и тот же электрический ток, проходя в цепи первый объект, затем проходит по очереди и все остальные. Тем не менее ток может проходить из пункта А в пункт В и другими путями, которые могут быть, например, соединены отдельно тремя разными сопротивлениями R (100 Ом), R' (50 Ом), R'' (30 Ом). Ток протекает в соответствии с разностью потенциалов между пунктами А и В, и она должна быть одной и той же независимо от того, каким путем идет электрический ток. (Например, при перемещении внутри здания с 12-го этажа на 10-й изменение гравитационного потенциала на протяжении двух этажей будет постоянной — не важно, спускаться ли на лифте, по лестнице или по веревке.)

Так как обычно эти три сопротивления на схемах изображаются параллельно, то соединение называется *параллельным*. Касательно параллельной электрической цепи можно сказать, что разность потенциалов всегда постоянна на каждом ее этапе.

Достаточно легко вычислить силу тока в каждом из участков с разными сопротивлениями, так как разность потенциалов и сопротивления нам известна. Если в бытовых домашних электросетях разность потенциалов равна 120 вольт, то, значит, такова же и разность потенциалов каждого из параллельных участков. Поскольку по закону Ома $I = E/R$, сила тока на первом участке равна $120/100$, или 1,2 ампера, на втором — $120/50$, или 2,4 ампера, и на третьем — $120/30$, или 4 ампера.

Видно, что существует обратная связь между силой тока и сопротивлением на объектах в параллельной цепи. Так как противоположностью сопротивления является проводимость ($C = 1/R$), то можно сказать, что сила тока в параллельно соединенных объектах прямо пропорциональна их проводимости.

Представим, что точки А и В соединены очень длинной, компактно смотанной проволокой, настолько компактно, что эти точки разделяют одновременно и несколько метров проволоки, и 1 см воздуха. Можно считать, что проволока и воздух являются частями параллельной цепи. Таким образом, ток может течь или через проволоку, или через небольшой слой воздуха. Однако сопротивление воздуха гораздо больше, чем проволоки, и через воздух проходит лишь минимальное количество тока. Практически весь электрический ток проходит через проволоку.

Если же слой воздуха уменьшить, то общее сопротивление воздушной пробки между пунктами А и В понизится и в ней будет обнаруживаться ток все большей и большей силы. По

пути ток выбивает электроны из атомов воздуха, повышая тем самым способность воздуха проводить электричество при помощи электронов и положительно заряженных ионов, которые электроны оставляют после себя. В результате сопротивление воздушной пробки понижается еще дальше.

В один переломный момент этот порочный круг, в котором ток создает все больше ионов, вызывающих все больший ток, приводит к тому, что через воздух проходит ток в больших количествах, с искрами и треском, которые и привлекли такое внимание к лейденской банке (см. гл. 10). Так как ток выбрал наикратчайший путь из пункта А в В, данное явление назвали *коротким замыканием*. По проволоке и другим предметам из пункта А в пункт В ток больше не идет, и электричество в цепи пропадает.

При коротком замыкании, когда значительная часть прежней цепи выходит из строя, происходит внезапное снижение общего сопротивления в цепи. Сопротивление в искрящейся воздушной пробке очень низкое, возможно, даже ниже, чем в проволоке и других приборах цепи. В остатке цепи сила тока значительно возрастает, что приводит к увеличенному нагреву. В лучшем случае должен выйти из строя один из предохранителей, в худшем — искры в конце концов подожгут любой воспламеняющийся предмет, находящийся поблизости, что может привести к пожару.

Для снижения вероятности коротких замыканий обычно проволоку окружают изоляционным материалом: шелком, резиной, пластмассой и т. д. У этих веществ не только сопротивление выше, чем у воздуха, но и, будучи твердыми телами, они всегда разделяют две разные проволоки (даже если эти проволоки крепко прижимают друг к другу). Однако изоляция может изнашиваться, и тогда снова появляется опасность коротких замыканий.

Возвращаясь к нашим трем участкам с разными сопротивлениями в параллельной сети, зададимся вопросом: каково же общее сопротивление системы? Известно, что общая сила тока в цепи равна сумме сил тока на каждом ее участке. В нашем примере общая сила тока в цепи будет $1,2 + 2,4 + 4,0 = 7,6$ ампера. Разность потенциалов между точками А и В параллельной цепи — 120 вольт. Следуя закону Ома $R = E/I$, общее сопротивление будет равно 120 вольтам, поделенным на общую силу тока в 7,6 ампера. Следовательно, общее сопротивление равно $120/7,6$, т. е. чуть менее 16 Ом.

Следует обратить внимание, что общее сопротивление меньше каждого из трех взятых по отдельности сопротивлений от-

дельных участков. Для того чтобы понять, почему так происходит, следует рассмотреть закон Ома $R = E/I$ применительно к параллельной цепи. R обозначает общее сопротивление, I — общую силу тока, а E остается неизменной независимо от того, взят один объект или несколько. Сила тока равна сумме сил тока на каждом отдельном отрезке цепи (I , I' и I''). Следовательно:

$$R_i = \frac{E}{I + I' + I''}. \quad (\text{Уравнение 11.9})$$

Обратив это выражение, получим:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{I + I' + I''}{E} = \frac{I}{E} + \frac{I'}{E} + \frac{I''}{E}. \quad (\text{Уравнение 11.10})$$

Согласно закону Ома, I/E должно равняться $1/R$, I'/E — равняться $1/R'$ и I''/E — равняться $1/R''$, индивидуальным сопротивлениям объектов параллельной цепи. Таким образом:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} + \frac{1}{R''}. \quad (\text{Уравнение 11.11})$$

Поговорим об обратных соотношениях в уравнении 11.11. Можно сказать, к примеру, что обратное отношение общего сопротивления равняется сумме обратных отношений отдельных сопротивлений. Выходит так, что чем меньше величина, тем больше обратная ей, и наоборот. (Например, число 11 больше, чем 3, а $1/11$ меньше, чем $1/3$.) Таким образом, исходя из того, что обратное соотношение общего сопротивления ($1/R_i$) равняется сумме обратных соотношений каждого сопротивления в отдельности и соответственно превосходит каждое из них в отдельности, общее сопротивление (R_i), как таковое, должно быть меньше каждого отдельно взятого сопротивления.

Важным свойством параллельных цепей является следующее: если в параллельной цепи произошел разрыв, то электричество исчезает только в том отрезке, где это случилось. Ток продолжает поступать из пункта А в пункт В по оставшимся отрезкам цепи. При параллельных цепях можно, например, пользоваться одной розеткой, в то время как другие остаются разомкнутыми. А если в параллельной цепи перегорает лампочка (в месте разрыва перегоревшей нити накала получается воздушная пробка), то другие лампочки продолжают гореть.

Батареи

На протяжении первой половины XIX века главным источником электрического тока был химический элемент питания, и, хотя по КПД он уже давно уступил пальму первенства другим источникам питания, он остается популярным и практически незаменимым при выполнении множества особых задач.

Наиболее известный тип гальванического элемента, используемого в наши дни, имеет в качестве отрицательного полюса сосуд из металлического цинка, а в качестве положительного полюса — угольный электрод в оболочке из двуокиси марганца¹. Между ними находится водный раствор нашатырного спирта и хлористого цинка. В раствор добавляется крахмал в количестве, достаточном для формирования вязкой массы, чтобы раствор не вытекал из батарейки. Из-за того что батарейка не протекает, ее называли «сухим элементом». Ее также называют батарейкой для фонарика, поскольку она часто используется в ручных фонариках. Существует и третье название — «элемент Лекланше»: сочетание цинк-углерод было получено впервые в 1868 г. французским химиком Жоржем Лекланше (1839—1882), правда, лишь 20 лет спустя была получена «сухая» форма этого сочетания.

Разность потенциалов между положительным и отрицательным полюсами химического элемента зависит от природы имеющих место химических реакций, то есть от того, насколько сильно вещества, составляющие полюсы, склонны присоединять или терять электроны. В случае с сухим элементом разность потенциалов должна в идеале равняться 1,5 В.

Разность потенциалов может увеличиться, если две батарейки или более будут соединены последовательно, то есть если положительный полюс одной батарейки будет подсоединен к отрицательному полюсу другой. В таком случае ток, вытекающий из первой батарейки, под действием разности потенциалов в 1,5 В входит во вторую батарейку и дает толчок производимому в ней току. Напряжение на выходе второй батарейки, таким образом, будет составлять 3,0 В — собственная разность потенциалов 1,5 В плюс разность потенциалов батарейки, к которой она подсоединена, — тоже 1,5 В. Когда элементы соединены последовательно, так что ток проходит через каждый из них, общая разность потенциалов равна сумме разностей потенциалов каждой отдельной батарейки.

¹ Это в том случае, если батарейка имеет цилиндрическую форму. Если батарейка квадратная, то полюса располагаются несколько по-другому.

Элементы можно соединить и параллельно, то есть положительный полюс — к положительному, отрицательный — к отрицательному. Общий ток не идет через все батарейки; наоборот, каждая батарейка отдает свою часть тока и получает обратно свою часть, так что разность потенциалов одной из них не влияет на разность потенциалов другой. Однако преимущество обеспечения напряжения в 1,5 В десятью элементами вместо одного заключается в том, что общее количество цинка в 10 гальванических элементах в 10 раз больше, чем в одном, и, таким образом, комбинация из 10 батареек будет давать ток в 10 раз дольше, чем одна.

К тому же есть такое понятие, как внутреннее сопротивление батарейки. Ведь ток идет не только через провода и приборы, которые составляют цепь, соединяющую положительный полюс с отрицательным; он идет также от полюса к полюсу внутри батарейки посредством химических реакций, происходящих в ней. Внутреннее сопротивление — это сопротивление этому электрическому току внутри батарейки. Чем выше сила тока, забираемого из батарейки, тем выше должна быть сила тока, проходящего через нее. Разность потенциалов, необходимая для того, чтобы пропустить этот ток через батарейку, зависит от силы тока: по закону Ома, $E = IR$. R в данном случае — внутреннее сопротивление элемента, а E — разность потенциалов, приводящая ток в движение от отрицательного полюса к положительному (по представлениям электриков). Эта разность потенциалов имеет направление, противоположное тому, по которому идет ток от положительного полюса к отрицательному во *внешней цепи* вне элемента, так что внутреннюю разность потенциалов нужно вычесть из внешней. Итак, чем большую силу тока извлекать из батарейки, тем меньше становится даваемая ей разность потенциалов, и происходит это из-за внутреннего сопротивления.

Когда элементы соединены последовательно, внутреннее сопротивление последовательной цепи равно сумме внутренних сопротивлений отдельных батареек. Разность потенциалов может увеличиться, но десять последовательно соединенных элементов будут так же чувствительны к высоким силам тока, как и один элемент. А вот когда элементы соединены параллельно, общее внутреннее сопротивление элементов цепи будет меньше, чем внутреннее сопротивление любой отдельной батарейки, как и в случае с обычными сопротивлениями. Параллельное соединение, таким образом, может обеспечивать большую силу тока без потери в разности потенциалов, чем один элемент, хотя максимальная разность потенциалов будет такой же.

Электрические батареи различных типов сослужили хорошую службу техническому прогрессу и остаются весьма полезными. На батарейках работают не только карманные фонарики, но и множество других устройств — от детских игрушек до радиоприемников. Химики вроде Дэви использовали их даже для совершения научных открытий, для которых требовались весьма солидные количества электроэнергии. Однако по-настоящему глобальное использование электричества, например для обеспечения электропитания огромных заводов или освещения целых городов, не может быть осуществлено простым соединением миллионов гальванических элементов — это было бы слишком дорого.

Сухой элемент, к примеру, получает свою энергию путем превращения металлического цинка в ионы цинка. С химической точки зрения это равносильно сжиганию цинка — его использованию в качестве топлива. Когда сухая батарея дает ток в 1 А, она потребляет 1,2 г цинка в час. В течение этого часа батарея будет давать мощность $1,5 \text{ В} \times 1 \text{ А}$, то есть 1,5 Вт. Таким образом, 1,5 Вт·ч эквивалентно расходу 1,2 г цинка, а 1 кВт·ч (1000 Вт·ч) равен расходу 800 г цинка. Если бы типичная современная американская семья использовала в качестве источников питания сухие батареи, то при среднем уровне потребления электроэнергии она легко бы «съедала» 8 т цинка в день, не говоря уж о других материалах. Это было бы не просто баснословно дорого, но даже весь цинк, производимый в мире, не мог бы поддерживать экономику, в которой каждая семья потребляла бы цинк в таких количествах. На самом деле наш современный электрифицированный мир просто не смог бы существовать на основе обычных гальванических элементов¹.

Одним из способов уменьшить расходы может стать обращение химических реакций в батареях, чтобы вещества, служащие полюсами, могли быть использованы вновь и вновь. Для сухой батареи это непрактично, однако существуют ведь заря-

¹ Продолжаются попытки разработать батареи на основе веществ, являющихся более привычными для нас видами топлива. Такие батареи должны работать на смеси водорода, метана, спирта или даже угля с кислородом. В некоторых случаях для проведения нужных химических реакций привлекаются и бактерии. *Топливные батареи* были бы гораздо дешевле, чем привычные нам химические батареи. Если бы стало возможным получение электричества напрямую из сжигания топлива и более эффективным образом, чем это делается сейчас, что будет подробнее описано в двух следующих главах, — это привнесло бы революцию в различных секторах нашей экономики. Топливные батареи сейчас находятся в стадии разработки, и уж точно их не было в конце XIX века, когда началась электрификация промышленных районов земного шара.

жаемые батарей (аккумуляторы). Наиболее распространенные из них — это элементы, в которых отрицательным полюсом является металлический свинец, а положительным — пероксид свинца. Полюсы разделяются достаточно концентрированным раствором серной кислоты.

Когда такая батарея разряжается и из нее извлекается электрический ток (при разнице потенциалов около 2 В на каждую батарею), протекающие при этом внутри элемента химические реакции превращают как свинец, так и его пероксид в сульфат свинца. Во время этого процесса также расходуется серная кислота. Если электричество запускают обратно в батарею (то есть если отрицательный полюс источника питания, работающий при разности потенциалов более 2 В, подсоединяют к отрицательному полюсу батареи, а положительный полюс источника — к положительному полюсу, так что она начинает работать «вспять» вследствие импульса, который сильнее, чем ее собственный), то химическая реакция начинает развиваться в обратном порядке. Вновь формируются свинец и пероксид свинца, а раствор серной кислоты становится более концентрированным. Батарея снова заряжается. Подобный элемент был впервые создан в 1859 году французским физиком Гастоном Планте (1834—1889).

Грубо говоря, кажется, что когда батарея перезаряжается, то электричество в нее поступает и там хранится. В действительности это не так. Электричество в ней не хранится: попросту происходит химическая реакция, в результате которой появляются химические элементы, которые, в свою очередь, производят электричество. Таким образом, в них хранится химическая энергия и подобные батареи называются *аккумуляторными батареями*. Именно такие батареи (обычно они состоят из 3—6 последовательно соединенных батарей из свинца и его пероксида) располагаются под капотами автомобилей.

Аккумуляторные батареи тяжелы (из-за содержащегося в них свинца), опасны в обращении (из-за содержащейся в них серной кислоты) и дороги. Тем не менее, из-за того что эти батареи можно часто перезаряжать, ими пользуются на протяжении многих лет без замены и их пользу нельзя недооценивать.

Однако откуда берется электричество для перезарядки аккумуляторных батарей? Если электричество поступает из обычных непerezаряжающихся батарей, то мы опять возвращаемся к самому началу. Вполне очевидно, что, для того чтобы аккумуляторные батареи пользовались массовым спросом, источник электричества для их подзарядки должен быть дешевым и легкодоступным. Например, в автомобилях аккумуляторные батареи постоянно заряжаются от энергии сжигаемого бензи-

на, что намного дешевле и доступнее, чем энергия сжигаемого цинка.

Для того чтобы объяснить, как сжигаемый бензин способствует электроэнергии, мы обратимся к одному простому, но очень важному опыту, проведенному в 1819 году.

Глава 12

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Опыт Эрстеда

С начала XIX века электричество и магнетизм стали восприниматься как две абсолютно независимые друг от друга силы. То есть, конечно, и электричество, и магнетизм сильны, обоим им свойственны отталкивание и притяжение, действие обеих сил слабеет по мере увеличения расстояния обратно пропорционально его квадрату. Однако магнетизм действовал только на железо и (в небольшой степени) на некоторые другие вещества, в то время как электричество казалось всепроникающим в своих проявлениях. Магнетизм проявлял полюса только в парах, а в электричестве они обнаруживались по отдельности; и не существовало никакого магнитного тока, подобного электрическому. Различий обнаруживалось больше, чем сходств.

Однако в 1819 году в результате простого эксперимента, который провел в ходе лекции (без какого-либо ожидания великих последствий) датский физик Ханс Кристиан Эрстед, было совершено важное открытие. Он использовал в ходе лекции сильную батарею и приблизил проволоку, по которой был пропущен ток, к компасу таким образом, что эта проволока была параллельна линии север—юг и соответственно стрелке компаса. (Сейчас неясно, что именно ученый пытался доказать с помощью своих действий.)

Так или иначе, когда Эрстед положил проволоку поверх стрелки компаса, стрелка резко повернулась и благодаря току, идущему по проволоке, стала показывать направление восток—запад. Физик был крайне удивлен, но пошел еще дальше и пустил электрический ток в обратном направлении, присоединив проволоку к электродам в обратной последовательности. Теперь стрелка компаса снова резко повернулась, но в обратную сторону.

Как только Эрстед объявил о своем открытии, физики всей Европы начали проводить дальнейшие опыты, и вскоре стало ясно, что электрические и магнитные явления тесно связаны, то есть теперь нужно было говорить уже об *электромагнетизме*.

Французский физик Доминик Франсуа Жак Араго почти сразу показал, что проволока с электрическим током не только притягивала намагниченную стрелку, но и размагничивала железные опилки, так же как и прямо направленный магнит. Магнитная сила, неразличимая в обычных магнитах, проявилась в действии электрического тока. Несомненно, поток электрического тока является магнитом.

Чтобы показать это более наглядно, можно было воспользоваться железом, как намагниченным, так и немагнитным. Если два магнита притягивались друг к другу или отталкивались (это зависит от того, как были расположены их поля), то же самое должно было быть справедливым и для двух проводов, каждый из которых нес электрический заряд.

Это было продемонстрировано в 1820 году французским физиком Ампером, в честь которого названа единица измерения силы тока. Ампер начал свой опыт с двух параллельных проводов, каждый из которых был подсоединен к отдельной батарее. Один провод был закреплен, а второй свободно двигался по направлению к первому или от него. Когда ток шел в одном и том же направлении по обеим проволокам, подвижная проволока придвигалась к закрепленной, что позволяло говорить о явлении притяжения между носителями тока. Если ток двигался в противоположном направлении, то подвижная проволока отодвигалась, демонстрируя явление отталкивания. Далее, когда Ампер закреплял носители тока таким образом, что подвижная проволока могла свободно вращаться, то в тех случаях, когда ток проходил по проволокам в противоположных направлениях, она поворачивалась на 180° , пока ток не двигался снова в одном и том же направлении по обеим проволокам. (Так же как и маленький магнит, северный полюс которого поднесен к северному полюсу второго, будет поворачиваться, стремясь соединиться с южным полюсом второго магнита.)

Кроме того, если текущий ток является магнитом, он должен обнаруживать силовые магнитные линии, так же как и обычный магнит, и эти силовые линии должны увлекать за собой стрелку компаса. Поскольку стрелке компаса свойственно поворачиваться в направлении, перпендикулярном течению тока по проволоке (независимо от того, держат ли проволоку над компасом, под ним или сбоку), магнитные силовые линии проволоки с током появляются в форме концентрических цилиндров около этой проволоки, перпендикулярном течению проволоки, можно увидеть силовые линии в форме концентрических окружностей. Это можно продемонстрировать с помощью проволоки с током, проходящей вверх сквозь малень-

кую дырочку в положенном горизонтально куске картона. Если рассыпать железные опилки по картону, то они расположатся кругами вокруг проволоки.

В случае с обычным магнитом принято считать, что силовые линии имеют направление — от северного полюса к южному. Поскольку северный полюс стрелки компаса всегда указывает на южный полюс магнита, она всегда указывает в условно принятом направлении силовых линий, а также показывает направление силовых линий находящейся рядом проволоки с током, что позволяет выяснить направление тока.

Ампер принял допущение Франклина о течении тока от позитивного электрода к негативному. Если проволока была направлена таким образом, что, в терминах этого допущения, ток шел бы непосредственно по направлению к наблюдателю, то силовые линии, исследованные при помощи стрелки компаса, двигались бы вокруг проволоки по часовой стрелке.

Чтобы легче было запомнить, Ампер разработал то, что позже будет названо «правилом правой руки». Представьте, что вы держите проволоку с током в правой руке; обхватите ее кистью руки, при этом большой палец будет параллелен проволоке и укажет направление течения тока. Обхватывающие ее пальцы, от ладони к кончикам ногтей, будут показывать направление магнитных силовых линий.

(Вполне возможно определять вместо условного направления тока направление потока электронов. Этот поток движется противоположно течению тока, поэтому если вы будете использовать тот же способ, то придется задействовать левую руку, которой нужно обхватить проволоку. При этом большой палец укажет направление потока электронов, а пальцы — направление силовых линий.)

Проволока с идущим по ней током, так же как и магнит, может принимать самые различные формы, не обязательно прямого прута. Например, из проволоки можно сделать петлю. В таком случае силовые линии, находящиеся снаружи петли, проколят далеко друг от друга, а находящиеся внутри ее скучены вместе. Следовательно, магнитное поле внутри петли сильнее, чем снаружи.

Теперь представьте, что проволока скручена не в одну петлю, а в несколько и напоминает диванную пружину. Такая форма называется *спираль*, или *соленоид* (от греческого, означающего «в форме трубы»). В таком соленоиде силовые линии каждой петли будут усиливать соседние линии, а результирующая сила будет охватывать внешнюю часть спирали от начала до конца. Затем силовые линии перейдут на внутреннюю

часть соленоида, чтобы вернуться к его началу. Чем больше отдельных петель или витков содержит соленоид, тем сильнее поле и тем больше линий сконцентрировано внутри спирали. Если витки расположены близко друг к другу, то сила поля еще увеличивается, а внутри соленоида еще более усиливается магнитный поток.

Иначе говоря, поток внутри соленоида изменяется прямо пропорционально количеству витков (N) и обратно пропорционально длине проволоки (L). Следовательно, он изменяется прямо пропорционально N/L . Сила магнитного поля, созданного электрическим током, зависит также от силы тока. Так в 2 ампера произведет на заданном расстоянии от проволоки магнитное поле, которое будет в 2 раза сильнее, чем поле, произведенное током в 1 ампер в тех же условиях. В случае с соленоидом мы получим следующее отношение для магнитного поля, которое практически одинаково во всей его внутренней части:

$$H = \frac{1,25NI}{L}, \quad (\text{Уравнение 12.1})$$

где H — это сила магнитного поля в эрстедах; I — сила тока в амперах; N — количество витков в соленоиде; L — длина спирали в сантиметрах.

Отношение между силой магнитного поля и силой тока дает возможность определить ампер через магнитную силу. Если в двух длинных параллельных проводах, расположенных на расстоянии один метр друг от друга, течет постоянный ток одной и той же силы, производящий взаимную силу (притяжения или отталкивания) в 2×10^{-7} ньютонов на метр длины, этот ток имеет силу 1 ампер. Таким образом, получается, что ампер можно определить через механические единицы измерения, а остальные единицы электричества могут быть определены через ампер. (Поскольку именно работа Ампера сделала возможным дать такое механическое определение электрической единице, то она и была названа его именем.)

Соленоид ведет себя так, как будто это магнитный брусок, сделанный из воздуха. Это подтверждает предположение о том, что в обычных магнитных брусках происходит то же, что и в проволоке, скрученной петлями, по которой пропущен ток. Однако до XX века оно пребывало не более чем предположением. Лишь после того как существование электрона и его место в атоме уже были хорошо изучены, обычные магнитные явления стали объяснять вращением электронных зарядов внутри атомов. В некоторых

случаях электронные вращения внутри атомов могут быть уравновешены, поскольку одни вращаются по часовой стрелке, а другие — против часовой стрелки, так что результирующей магнитной силы наблюдаться не будет. В других случаях, особенно это касается железа, вращения не уравновешены и магнитная сила может стать очевидной, если сами атомы выровнены соответствующим образом.

Таким образом, появляется возможность объяснить магнетизм Земли. Даже если допустить, что жидкое железо Земли имеет температуру выше точки Кюри (см. гл. 9) и не может быть обычным магнитом, тем не менее возможно, что вращения Земли создаст в этой жидкой магнитной системе медленное вихревое движение с электрическим зарядом и что ядро Земли ведет себя скорее как соленоид, нежели как магнитный брусок. Эффект получается одинаковый.

Если это так, то планета, не обладающая жидким ядром, в котором могли бы возникнуть завихрения, или вращающаяся недостаточно быстро, чтобы привести в движение, не будет обладать значительным магнитным полем (если вообще будет им обладать). Факты, собранные в результате современных опытов с ракетами, кажется, подтверждают это. Плотность Луны составляет всего $\frac{1}{3}$ от плотности Земли, и это заставляет полагать, что на Луне нет плотного жидкого железного ядра значительного размера, — и исследования Луны ясно показали, что сколь-либо значимого магнитного поля она не имеет.

Венера же, напротив, очень похожа на Землю в отношении размера и плотности, и, вероятно, на этой планете имеется жидкое железное ядро. Однако астрономические данные, полученные в 1960-х годах, показали, что Венера вращается медленнее, приблизительно один раз в 200 с лишним дней. И на Венере тоже, по данным, полученным с «Маринера II» (аппарата-исследователя Венеры), значимое магнитное поле отсутствует.

Юпитер и Сатурн, которые намного больше Земли, тем не менее вращаются быстрее и обладают значительно большими магнитными полями, чем Земля.

Солнце представляет собой сплошь текучую среду, скорее газообразную, чем жидкую, а в результате вращения в его магнитной системе, бесспорно, присутствуют вихри. Возможно, что именно такие вихри объясняют наличие магнитного поля у Солнца, особенно учитывая «пятна» на нем. У некоторых звезд обнаружены гораздо более сильные магнитные поля, чем у Солнца, а что касается галактик, считается, что магнитные поля галактик имеют размеры, сопоставимые с размером самих галактик.

Применение электромагнетизма

Силу магнитного поля внутри соленоида можно увеличить, поместив в спираль железный брусок. Высокая проницаемость железа (см. гл. 9) будет способствовать концентрации и без того близко расположенных друг к другу магнитных линий. Первым, кто поставил этот опыт, стал англичанин Уильям Стёрджен (1783—1850), который в 1823 году 18 раз обернул изолированную медную проволоку вокруг бруска U-образной формы и изобрел *электромагнит*. Пустив электрический ток, Стёрджен убедился, что его электромагнит способен поднять вес в 20 раз больше собственного. В отсутствие тока это устройство теряло магнитные свойства и не могло ничего поднять.

Однако электромагнит стал таким, какой он сейчас, только благодаря американскому физiku Джозефу Генри (1797—1878). В 1829 году он повторил эксперимент Стёрджена, но использовал изолированную проволоку. Теперь витки можно было располагать вплотную друг к другу, не опасаясь коротких замыканий. Следовательно, Генри мог сотни раз обернуть даже недлинную проволоку вокруг железного бруска, сильно увеличивая таким образом отношение N/L (см. уравнение 12.1) и усиливая мощь магнитного поля при заданной силе тока. В 1831 году ученый изготовил небольшой электромагнит, который мог поднять более тонны железа.

Электромагнитные явления сделали возможным создание магнитных полей огромной силы. Игрушечный магнит-подкова мог создать магнитное поле с силой в несколько сотен гауссов, средний магнит-брусок — в 3000 гауссов, а мощный — в 10 000 гауссов. А с помощью электромагнитов вполне доступно создание магнитных полей силой 60 000 гауссов.

Еще большее увеличение магнитного поля теорически не является проблемой, нужно лишь увеличить силу тока. Но, к сожалению, это приведет также к увеличению количества выделяемого тепла (выделение тепла увеличивается пропорционально квадрату силы тока), что влечет за собой проблему перегрева проволочных катушек и необходимость их охлаждения. Кроме того, магнитные силы провоцируют серьезную механическую деформацию. К XX веку изобретательность в проектировании, а также использование прочных материалов позволили с помощью коротких вспышек электрического тока создавать временные поля, сила которых измеряется сотнями тысяч гауссов. Создавались даже короткоживущие поля с силой в полтора миллиона гауссов, приводившие к взрывам проводников электрического тока.

Поддержка столь сильных магнитных полей требовала продолжительного использования сильнейших электрических токов и мощных охлаждающих установок, а это слишком дорого обходилось. В поисках возможности избежать таких расходов внимание ученых обратилось на явление сверхпроводимости. Если некоторые проводники охладить до температуры жидкого гелия, то их сопротивление падает до нуля, поэтому проходящий по ним ток не вырабатывает тепла независимо от своей силы. Более того, электрический ток, пущенный по замкнутой цепи при такой температуре, будет течь бесконечно; магнитное поле, созданное при тех же условиях, также поддерживается вечно (то есть в течение того времени, пока сохраняется достаточно низкая температура). Иначе говоря, существование магнитного поля в таких условиях поддерживается не за счет постоянной подачи тока.

Если сверхпроводник используется в обмотке вокруг железной сердцевины при температуре жидкого гелия, то, похоже, что чем больше электричества будет в него накачиваться, тем более сильные магнитные поля при этом будут достигаться без всяких ограничений. Когда нужная сила поля будет достигнута, ток можно отключить, а магнитное поле при этом останется.

К сожалению, сверхпроводники дают не совсем такую картину. Сверхпроводящий материал полностью диамагнитен, то есть ни одна магнитная силовая линия не проходит внутри его. Эти два свойства, сверхпроводимость и полная диамагнитность, взаимосвязаны. Если сверх меры нагнетать ток в сверхпроводящий электромагнит и тем самым усиливать магнитное поле, то магнитный поток возрастает. Силовые линии скапливаются все ближе и ближе друг к другу, и, когда сила поля достигает порогового значения (именуемого *критической силой поля*), они прорываются внутрь сверхпроводника. Как только вещество теряет свои диамагнитные свойства, оно также лишается и сверхпроводимости, начинается выработка тепла и весь процесс срывается. Сверхпроводящий магнит не может быть сильнее критической силы поля того вещества, из которого изготовлены витки, и, к сожалению, эта сила не превышает нескольких сотен гауссов для большинства металлов. Свинец, к примеру, теряет свою сверхпроводимость при силе магнитного поля в 600 гауссов даже при самых низких температурах. Поэтому сверхпроводящие магниты из свинца не могут быть сильнее игрушечных.

К счастью, в 1950-х годах было обнаружено, что гораздо больших результатов можно достичь, сплавливая чистые металлы между собой. К примеру, сплав ниобия и олова сохраняет сверхпроводимость при температуре жидкого гелия, создавая

постоянное и относительно дешовое магнитное поле с силой более 200 000 гауссов, а сплав ванадия и галлия выдерживает силу магнитного поля в несколько раз больше этой. Думается, что в эру сильнейших сверхпроводящих электромагнитов и этот рекорд будет побит.

Однако электромагнит пригоден не только для увеличения грубой силы. Рассмотрим электрическую цепь, в которую входит электромагнит. В цепи есть ключ, который при помощи пружинного действия «открывается» таким образом, что сохраняется зазор, поэтому ток по цепи не течет. Когда ключ «закрыт», цепь замыкается, по ней проходит ток, а электромагнит притягивает находящийся поблизости магнитный брусок.

Представим, что железный брусок тоже является частью цепи. Соответственно, когда его начинает притягивать электромагнит, он вырывается из соединения. Цепь разрывается, и течение тока прекращается. Поскольку ток больше не проходит по цепи, электромагнит теряет свою способность притягивать предметы, а железный брусок возвращается на свое место к прикрепленной пружине. Цепь снова замыкается, действие электромагнита возобновляется, и он опять притягивает к себе железный брусок.

Пока ключ остается в «закрытом» состоянии, продолжается чередование притяжения железного бруска к электромагниту и возвращения его в цепь. Это явление сопровождается короткими жужжащими звуками. Если к железному бруску присоединить молоточек, который будет ударять по металлической сфере, то мы получим *электрический звонок*.

Теперь предположим, что железный брусок не является частью цепи. В этом случае, когда ключ «закрыт», электромагнит усиливает притяжение, привлекает к себе брусок и удерживает его. Как только ключ размыкается (но не раньше этого момента), электромагнит теряет свою силу притяжения и брусок возвращается на место.

Железный брусок при этом перемещается туда-обратно, но не в неизменном ритме быстрых колебаний, а следуя произвольным действиям того, кто воздействует на ключ. Когда брусок ударяется об электромагнит, он издает щелчок, поэтому движение руки, которая «открывает» или «закрывает» ключ, производят некую последовательность щелчков.

Очевидно, что таким образом можно кодировать информацию. Закрепив за определенной последовательностью щелчков конкретные буквы алфавита, можно передавать сообщения из одного места в другое со скоростью, близкой к скорости света.

На практике возможность передавать информацию подобным образом ограничивается тем, что сила тока, пропускаемо-

до через проволоку при заданной разности потенциалов, уменьшается, если проволока удлиняется и ее общее сопротивление увеличивается. При передаче тока на большие расстояния сила тока становится ничтожно малой, недостаточной для создания магнитного поля, способного передвинуть тяжелый железный брусок, и не падает до такой степени, что оказывается уже неспособной передвигать тяжелый для нее металлический брусок.

Эту проблему смог решить Генри. Он пустил ток по длинной проволоке по направлению к легкому по весу ключу, пока сила тока не стала очень малой, но еще способной привести в действие электромагнит. Этот легкий ключ, двигаясь по направлению к магниту, замыкал вторую цепь, подключенную к батарее, расположенной возле ключа, и запускал таким образом ток по второй, более короткой проволоке. Этот ток был сильнее, поскольку вторая проволока была короче первой и вследствие этого имела меньшее сопротивление. Второй, более сильный ток в точности дублировал первый, более слабый: когда ключ первой цепи «закрывался» вручную, находящийся на расстоянии ключ в этот же момент замыкался при помощи электромагнита, а когда «ручной» ключ размыкался, тут же размыкался и второй.

Устройство, которое передает образцы тока от одной цепи к другой, — *электрическое реле*. Вторая цепь, в свою очередь, может запускать третью, третья — четвертую и т. д. Использование реле и батарей на определенных расстояниях позволяет посылать заданную последовательность щелчков по всему миру. К 1831 году Генри посылал сигналы по проволоке на расстояние 1 мили.

Генри не запатентовал свое изобретение и не попытался превратить его в полезное устройство. С его помощью это сделал американский художник Сэмюэл Финли Бриз Морзе (1791—1872). К 1844 году были протянуты провода от Балтимора до Вашингтона, и по ним прошла определенная последовательность сигналов, записываемых как точки для коротких сигналов и тире — для длинных (азбука Морзе). Первое сообщение было цитатой из библейской Книги чисел: «Что создал Господь?» Так появился *телеграф* (от греческого выражения, означающего «писать на расстоянии»), и широкой публике впервые довелось узнать, каким образом новая наука об электричестве может перевернуть жизнь человечества.

В конце концов телеграфные линии пересекли континенты, и в 1866 году был продолжен кабель через Атлантический океан. По этому кабелю при помощи азбуки Морзе почти мгновенно могли передаваться сообщения из Великобритании в США и обратно. Прокладка кабеля была крайне сложным мероприятием, которое

было произведено исключительно благодаря нечеловеческой настойчивости американского финансиста Сайруса Вест Филда (1819—1892). Проведение кабеля было связано с огромными проблемами еще и потому, что реле не могли работать под водой так же, как на суше. Многие трудности были разрешены благодаря таким людям, как британский физик Уильям Томсон, лорд Кельвин (1824—1907), и все равно межконтинентальное сообщение оставалось несовершенным вплоть до изобретения радио (об этом будет идти речь в III части этой книги). Тем не менее к 1900 году на Земле не оставалось цивилизованных мест, не охваченных телеграфной связью, и наконец-то первый раз на протяжении тысяч лет существования цивилизации человечество получило возможность сформировать единое (пусть не всегда дружное или терпимое) сообщество.

Другой, более непосредственный способ сообщения также в большой мере зависит от электромагнита. Речь идет о *телефоне* («говорить на расстоянии»), который изобрел в 1876 году шотландский, а затем американский учитель Александер Грейам Белл (1847—1922), а вскоре усовершенствовал Эдисон.

Если описывать как можно проще, то телефонный передатчик-микрофон (в который вы говорите) содержит углеродные гранулы в коробочке, которая спереди и сзади ограничена токопроводящими стенками. Передняя стенка представляет собой достаточно тонкую и гибкую мембрану. Через эту коробочку проходит электрический ток. Сопротивление углеродных гранул зависит от того, насколько хорошо они контактируют друг с другом. Чем лучше контакт, тем ниже общее сопротивление (разность потенциалов остается постоянной) и тем больше сила проходящего сквозь гранулы тока.

Когда говорят в микрофон, создается сложная последовательность областей сжатого и разреженного воздуха (см. ч. I). Если мембрана попадает в область сжатого воздуха, то она прогибается внутрь; попав в область разреженного воздуха, она выгибается наружу. Мембрана действует в точности так, как барабанная перепонка человеческого уха, которая реагирует на различные изменения звуковых волн.

Когда мембрана прогибается внутрь, углеродным гранулам становится легче контактировать, и сила тока увеличивается настолько, насколько сильно мембрана прогнулась. В свою очередь, сила тока уменьшается, когда мембрана выгибается наружу, гранулы реже соприкасаются, и контакт ухудшается. Итак, электрический ток пущен таким образом, что сила тока меняется, точно воспроизводя последовательность сжатий-разрежений звуковой волны.

На другом конце цепи, который может находиться за тысячу миль, благодаря реле и прочим усовершенствованиям электрический ток приводит в действие электромагнит в приемном устройстве телефона. Сила магнитного поля изменяется в зависимости от силы тока, поэтому сила этого поля представляет собой точную модель звуковой волны, которую посылает удаленный микрофон. Около электромагнита расположена тонкая железная мембрана, которая прогибается внутрь под воздействием магнитной силы. Мембрана в приемнике шевелится по образцу звуковой волны, принятой от передатчика, который расположен за много миль и, в свою очередь, создает точно такие же колебания звуковой волны в воздухе. В результате человек, находящийся у приемника, слышит именно то, что говорит собеседник в микрофон.

Новейшие применения электромагнитов требуют сверхпроводимости (см. гл. 9). Сверхпроводящую пластину располагают над магнитом, производящим сверхпроводимость. Магнитные силовые линии не могут проникнуть внутрь диамагнитной пластины, по этой причине невозможен физический контакт пластины и магнита. Между двумя сверхпроводниками должно быть некоторое пространство, которое и заполняют магнитные линии. Следовательно, пластина отталкивается магнитом и «плавает» над ним. Даже если на пластину положить некоторый вес, он не будет (до определенного предела) придавливать пластину к магниту. В лабораторных условиях пластина удерживала до 300 г веса на квадратный сантиметр. Не имея физического контакта с магнитом, пластина способна вращаться, практически не создавая трения, и, таким образом, может служить свободной опорой.

Примером практического применения свойств электромагнитов в условиях сверхпроводимости можно назвать создание переключателей очень маленького размера. Первое подобное устройство (сделано в 1935 году) состояло из тонкой проволоки из ниобия, которая находилась возле более толстой проволоки из тантала. Обе проволоки являются сверхпроводниками, но им можно придать различные критические силы магнитных полей. По танталу может быть пущен небольшой по силе ток, и при низкой температуре он будет идти по этой проволоке в течение неограниченного времени. Однако если при этом пустить ток по виткам из ниобия, пусть даже меньший по силе, то получившееся магнитное поле будет достаточным, чтобы разрушить сверхпроводимость тантала (на ниобии это не отразится). По танталу ток течь перестанет. Так один ток способен «выключать» другой.

Подобное устройство носит название *криотрон* (от греческого слова, означающего «замораживать», в связи с чрезвычайно низкими температурами, которые необходимы для сверхпроводимости). Совокупность комбинаций криотронов используется в многофункциональных переключающих устройствах в компьютерах. Преимущество криотроновых выключателей в том, что они очень маленькие, работают очень быстро и потребляют совсем немного энергии. Главный их недостаток, конечно, заключается в том, что действуют они только при температурах жидкого гелия.

Измерение электрического тока

Электромагнит вывел изучение электричества в целом на новый уровень. Благодаря электромагниту стало возможно обнаруживать электрические токи по наличию магнитных полей, которые они создают, и измерять силу тока по силе его магнитного поля.

В 1820 году, после того как Эрстед объявил о том, что лоток электрического тока сопровождается магнитным полем, немецкий физик Иоганн Кристоф Швейгер (1779—1857) предложил использовать магнитное поле в качестве средства измерения. Он поместил намагниченную иглу между двумя проволочными рамками. Когда электрический ток шел в одном направлении, игла отклонялась вправо, когда ток шел в обратном направлении, игла отклонялась влево. Поместив перед иглой шкалу, он смог определить величину отклонения и соответственно измерить силу тока. Это был первый *гальванометр* («прибор для измерения гальванического электричества» — такое название было предложено Ампером).

Первоначально гальванометр Швейгера состоял из зафиксированной проволочной рамки и подвижного магнита, но со временем выяснилось, что удобнее использовать зафиксированный магнит и подвижную рамку. Работа прибора, как и прежде, основана на принципе отклонения иглы, но игла прикреплена к проволочной рамке, а не к магниту. Устройство такого типа, удобное для практического применения, создал французский физик Жак Арсен Д'Арсонваль (1851—1940) в 1880 году. Оно стало известно как гальванометр Д'Арсонваля.

Гальванометры могут быть достаточно чувствительными, чтобы зафиксировать ток даже очень слабой силы. В 1903 году голландский физиолог Виллем Эйнтковен (1860—1927) изобрел *струнный гальванометр*. Он состоял из очень тонкого токопро-

водящего волокна, подвешенного (свободно плавающего) в магнитном поле. Даже самые ничтожные электрические токи, проходя через волокно, вызывали его отклонение. При помощи такого чрезвычайно чувствительного гальванометра мельчайшие изменения силы тока, порождаемые, например, сокращением мышцы, можно зафиксировать и измерить. Таким образом можно исследовать изменения электрической диаграммы, вызванные сердцебиением, и как диагностическое средство струнный гальванометр пополнил арсенал современной медицины.

Гальванометры оказались настолько чувствительными, что в изначальном виде их можно было без риска использовать только при сравнительно слабой силе тока. Чтобы измерить, к примеру, полную силу обычного тока, применяемого в домах, гальванометр следует специально закоротить. Чтобы не позволить току течь по подвижной катушке в гальванометре поперек проволоки, которая ведет к катушке и от нее, разместили проводник с низкой сопротивляемостью. Такая короткая цепь с малым сопротивлением называется шунт. Это устройство впервые использовал в 1843 году английский физик Чарлз Уитстон (1802—1875).

Шунт и катушка подсоединены параллельно, и сила тока, который проходит через каждое из этих устройств, обратно пропорциональна их сопротивлениям. Если сопротивления известны, можно вычислить, какая доля силы тока пройдет через катушку, и только эта доля и повлияет на отклонение магнитной стрелки. Чувствительность отклонения может быть изменена, если увеличить или уменьшить сопротивление шунта таким образом, чтобы доля всей силы тока, проходящая через катушку, соответственно увеличилась или уменьшилась.

Регулируя ту долю силы тока, которая достигает катушки, так, чтобы отклоняющаяся магнитная стрелка оставалась на шкале, можно измерить силу тока в домашней сети или вообще ток любой силы. Шкала калибруется для измерения в амперах, а гальванометр при наличии такой шкалы называется *амперметр*.

Представим, что гальванометр поперечно соединен с какой-то частью цепи, — это создает короткое замыкание. Если гальванометр имеет очень высокое сопротивление, то по его короткой цепи будет течь совсем слабый ток — достаточно слабый, чтобы практически никак не влиять на оставшуюся часть цепи.

Этот слабый ток будет порождаться той же разностью потенциалов, что и гораздо более сильный ток, текущий в главной цепи, между концами которой находится гальванометр. Ток,

пропущенный через гальванометр высокой сопротивляемости, будет меняться в зависимости от разности потенциалов. Скала с подвижной магнитной стрелкой может быть калибрована в вольтах, при этом гальванометр становится *вольтметром*.

Если сила тока и разность потенциалов в какой-либо цепи или ее части измеряется амперметром или вольтметром, сопротивление этой цепи или ее измеряемого участка можно вычислить по закону Ома. Кроме того, гальванометр позволяет вычислять неизвестное сопротивление, сравнивая его с уже известным.

Вообразим, что ток проходит через четыре сопротивления — R_1, R_2, R_3, R_4 — расположенные в виде параллелограмма. Ток входит в точке А и может течь либо через точку В к точке D через R_1 и R_2 или через точку С к точке D через R_3 и R_4 . Допустим, что точки В и С соединены токопроводящим проводом, при этом гальванометр подключен к этому проводу и является частью цепи. Если в точке В напряжение будет больше, чем в точке С, ток будет течь в направлении от В к С и гальванометр зафиксирует наличие тока в одном направлении. Если же напряжение в С будет больше, чем в В, ток потечет от С к В и гальванометр отметит течение тока в обратном направлении. Но если напряжения в В и С одинаковы, ток течь не будет, а гальванометр будет показывать нуль.

Представим, что гальванометр показывает нуль. Какой можно из этого сделать вывод? Ток, который течет от точки А к точке В, должен без потерь пройти от В к D, не уклоняясь от гальванометра. Таким образом, сила тока на отрезке от А до В через R_1 должна быть равна напряженности тока на отрезке от В до D через R_2 . Обе силы тока могут быть представлены как I_1 . Подобное доказательство верно и для определения равенства сил тока, проходящего через R_3 и R_4 . Это равенство может быть обозначено как I_2 .

По закону Ома разность потенциалов равна напряженности тока, умноженной на сопротивление ($E = IR$). Разностью потенциалов точек А и В соответственно является $I_1 R_1$, точек В и D — $I_1 R_2$, А и С — $I_2 R_3$, С и D — $I_2 R_4$.

Однако если стрелка гальванометра стоит на нуле, то разность потенциалов точек А и В та же, что и разность потенциалов А и С (иначе между точками В и С был бы ток и гальванометр не доказывал бы нуль), а разность потенциалов между В и D равна разности потенциалов между С и D, следуя тому же доказательству. В условных обозначениях напряженности тока и сопротивления можно выразить эти равенства следующим образом:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2, \quad (\text{Уравнение 12.2})$$

$$I_1 R_2 = I_2 R_1, \quad (\text{Уравнение 12.3})$$

Поделив уравнение 12.2 на уравнение 12.3, получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (\text{Уравнение 12.4})$$

Теперь предположим, что R_1 — это неизвестное сопротивление, которое нам нужно измерить, а R_2 — это сопротивление, которое нам известно. При этом R_1 и R_2 являются *переменными сопротивлениями*, которые могут изменяться заданным образом.

Простое переменное сопротивление можно представить на примере проволоки, натянутой вдоль метровой линейки, со скользящим контактом, который способен по ней двигаться. Подвижный контакт представляет собой точку С в вышеописанном устройстве. Протяженность проволоки от одного конца линейки до другого — это отрезок AD. Часть проволоки от точки А до точки С обозначается как R_1 , от С до D — как R_2 . Если провод однородный, то сопротивления R_1 и R_2 будут пропорциональны длине провода от А до С и от С до D соответственно и эти длины могут быть точно определены при помощи линейки. Абсолютные величины R_1 и R_2 установить нельзя, но отношение R_1/R_2 равно отношению AC/CD, и это именно то, что нам нужно.

Передвижение контакта по проводу приводит к увеличению разности потенциалов между А и С при увеличении расстояния между точками. В некоторой точке разность потенциалов между А и С станет равна разности потенциалов между А и D, а гальванометр при этом покажет нуль. В этой точке отношение R_1/R_2 определяется при помощи линейки, а отношение R_1/R_2 по уравнению 12.4 должно иметь то же значение.

Неизвестное сопротивление R_1 может теперь легко быть найдено, если умножить уже известную величину R_2 на отношение R_1/R_2 . Уитстон использовал этот способ для измерения сопротивлений еще в 1843 году (хотя некоторые исследователи использовали сходные приемы и до этого ученого). Этот метод был назван *мостом Уитстона*.

Генераторы

Электромагнит, сколь бы полезен он ни был, сам по себе не решает проблемы поиска дешевых источников электричества. Если магнитное поле создается химическим элементом пита-

ния, то оно будет слишком дорого стоить, поэтому вопрос о применении больших мощностей в этом случае даже не возникает.

Однако метод, с помощью которого изготавливается электромагнит, натолкнул на мысль о возможности использования обратного явления. Если электрический ток производит магнитное поле, то почему уже существующее магнитное поле не может создать ток?

Майкл Фарадей мыслил именно таким образом, и в 1831 году он провел крайне важный опыт (после четырех неудачных попыток). Пятый эксперимент ученого заключался в следующем. Он намотал витки проволоки на часть железного кольца, добавил ключ, с помощью которого можно замыкать и размыкать цепь, и присоединил батарею. Теперь при нажатии на ключ и замыкании цепи ток шел по катушке и создавалось магнитное поле. Магнитные силовые линии были сконцентрированы в имеющем высокую проводимость железном кольце.

Затем Фарадей намотал другую проволоку на противоположный отрезок железного кольца и соединил катушку с гальванометром. Когда создавалось магнитное поле, оно могло создавать ток во второй катушке, и этот ток должен был фиксироваться гальванометром.

Опыт прошел совсем не так, как ожидалось. При замыкании цепи происходил кратковременный всплеск тока во второй проволоке — это показал гальванометр, стрелка которого быстро дернулась и вернулась к нулю. Стрелка оставалась на нуле все время, пока ключ был разомкнут. Существование магнитного поля и его концентрация в железном кольце были очевидны. Однако существование магнитного поля само по себе не производило электрический ток. Только когда Фарадей снова разомкнул цепь, было зафиксировано второе отклонение магнитной стрелки гальванометра — в противоположную сторону.

Ученый решил, что ток порождало не само по себе наличие силовых магнитных линий, а движение этих линий вокруг проволоки. Начала вырисовываться картина происходящего. Когда в первой проволочной катушке начинал течь ток, создавалось магнитное поле, а силовые линии увеличивались, чтобы заполнить все свободное пространство. Когда они захватывали проволоку второй катушки, начинал идти ток. Силовые линии быстро заполняли пространство, а затем отходили от второй проволоки, ток существовал в течение только одного мгновения. Когда цепь замыкалась и магнитное поле стеновилось постоянным, во второй катушке ток возникнуть уже не мог. Однако когда размыкалась первая цепь, существование магнитного поля

прерывалось, и силовые линии начинали «падать» внутрь, создавая на мгновение ток в противоположном направлении.

Фарадей более четко уяснил себе (а также и аудитории, перед которой читалась лекция) это явление на более простом примере, поместив магнит в проволочную катушку, которая была соединена с гальванометром. Когда магнит устанавливали, стрелка гальванометра отклонялась в одну сторону, а когда его вытаскивали, она отклонялась в противоположном направлении. Пока магнит оставался в локое внутри катушки, на любой стадии его установки или вытаскивания никакого течения тока не наблюдалось. Однако в том случае, когда магнит был закреплен, а саму катушку переворачивали или опускали, ток снова начинал идти по проволоке. Не важно, двигалась ли проволока поперек силовых линий, или эти линии двигались поперек проволоки¹.

Фарадей, безусловно, использовал магнетизм для того, чтобы создать электрический ток, и изобрел таким образом *электромагнитную индукцию*. В США ученый Генри сделал то же открытие приблизительно в это же время, но работа Фарадея была опубликована первой.

Процесс возникновения тока по индукции можно легко представить, если рассмотреть пространство между полюсами магнита, где силовые линии проходят по прямой от северного полюса к южному, и предположить, что между этими полюсами движется одиозная медная проволока. (Не имеет значения, постоянный это электромагнит или же электромагнит при пущенном токе.)

Если проволока неподвижна или движется параллельно силовым линиям, индуцированный ток течь не будет. Если проволока движется в направлении, не параллельном силовым линиям, тем самым пересекая их, ток будет индуцироваться.

Величина разности потенциалов, которая приводит в движение индуцированный ток, зависит от количества силовых линий, пересекаемых в секунду, а эта скорость зависит от нескольких факторов. Во-первых, от скорости движущейся проволоки. Чем быстрее она движется в любом заданном направлении, не параллельном силовым линиям, тем большее количество этих линий

¹ Об этой демонстрации ходит известная легенда, возможно недостоверная. Некая женщина, наблюдавшая за демонстрацией, задала вопрос: «Мистер Фарадей, а какая от всего этого польза?» — на что ученый вежливо ответил: «Мэм, а какая польза от новорожденного ребенка?» По другой версии, этот вопрос задал Уильям Эварт Гладстоун (тогда свежиспеченный член парламента, будущий четырехкратный премьер-министр). Ответ Фарадея по этой версии гласил: «Сэр, через двадцать лет вы будете получать с этого налога».

она пересекает в течение секунды и тем больше разность потенциалов, приводящая к индукции тока.

Во-вторых, важен вопрос о направлении движения проволоки. Если проволока движется в направлении, перпендикулярном силовым линиям, то она в течение секунды пересекает некоторое количество этих линий. Однако при той же скорости движения, но в направлении, не совсем перпендикулярном силовым линиям, проволока пересекает меньшее число этих линий в единицу времени, и получающаяся при этом разность потенциалов меньше. Чем больше угол между направлением движения и перпендикуляром к силовым линиям, тем меньше разность потенциалов индуктированного тока. Так, при движении в направлении 90° к перпендикуляру это перемещение проволоки происходит фактически параллельно силовым линиям и тока не возникает.

Кроме того, если проволока скручена в витки и каждый виток пересекают силовые линии, разность потенциалов, приводящая в движение индуктированный ток, умножается в силу пропорционально отношению числа витков на единицу длины.

Направление индуктированного тока определяется при помощи правой руки, согласно системе, которую впервые предложил английский инженер-электрик Джон Эмброуз Флеминг (1849—1945), названной «правилом Флеминга», или *правилом правой руки*. Применение этого правила совсем несложно, если проволока движется перпендикулярно силовым линиям. Вытяните большой, указательный и средний пальцы так, чтобы каждый образовал прямой угол с двумя другими, причем большой палец направлен вверх, указательный — прямо, средний — налево. Указательный палец демонстрирует направление магнитных силовых линий от северного полюса к южному, большой палец показывает направление движения проволоки, а направление среднего пальца соответствует направлению течения тока по проволоке (от положительного полюса к отрицательному).

Спустя два месяца после открытия электромагнитной индукции Фарадей предпринял следующий шаг. Пока силовые магнитные линии пересекали электрический проводник, производился электрический ток, но как сделать этот процесс постоянным?

Ученый установил тонкий медный диск так, чтобы он мог поворачиваться на стержне. Когда диск поворачивался, его внешний край проходил между полюсами сильного магнита. По мере прохождения между этими полюсами он непрерывно пересекал магнитные линии, поэтому возникала разность потенциалов — разность, которая поддерживалась в течение всего времени, пока диск поворачивался. К диску были прикреплены две проволоки

с подвижными контактами. Один контакт слегка задевал медное колесо по мере его вращения, второй касался стержня. Другие концы проволок соединялись с гальванометром.

Поскольку наибольший электрический потенциал возникал на внешнем крае, где диск вращался сильнее всего, пересекая большее число магнитных линий в единицу времени, между этим краем и неподвижным стержнем возникала максимальная разность потенциалов. Электрический ток шел по проводам, фиксируемый гальванометром, пока диск вращался. Фарадей производил постоянный ток, не используя химических реакций, и создал первый *генератор электрического тока*.

Важность этого устройства колоссальна, поскольку именно оно превращает энергию движения в электрическую энергию. Диск можно вращать, например, при помощи парового двигателя, горения угля или нефти (что гораздо дешевле, чем жечь цинк) или используя турбину, приводимую в движение потоком воды, — так водопады или реки могут быть приспособлены для производства электроэнергии. Для того чтобы приспособить генератор к практическим нуждам, потребовалось 50 лет, однако в 80-х годах XIX века уже в массовых объемах производилось дешевое электричество. Появился электрический свет, и стала возможна электрификация общества в целом.

Глава 13

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Якорь

В современных генераторах вращающийся между двумя полюсами диск Фарадея заменен на катушки с медной проволокой, намотанной на железный цилиндр, который вращается между полюсами электромагнита. Вращающиеся катушки составляют *якорь*. Чтобы увидеть, что происходит, рассмотрим упрощенный случай: простую прямоугольную петлю из проволоки, которая поворачивается между северным (справа) и южным (слева) полюсами.

Представим, что такой прямоугольник расположен параллельно силовым линиям (движущимся справа налево) и начинает поворачиваться так, что проволока слева от него (проволока L) движется наверх, пересекая силовые линии, а проволока справа (проволока R) — вниз, тоже пересекая линии.

Начнем с проволоки L и вспомним правило правой руки. Направьте вверх большой палец так, чтобы он соответствовал

движению проволоки L. Вытяните указательный палец наверх, он будет соответствовать направлению южного полюса магнита. Средний палец обращен в нашу сторону, это и есть направление индуктированного тока в проволоке L.

Что же с проволокой R? Теперь большой палец нужно опустить вниз, в то время как указательный палец по-прежнему направлен влево. Средний палец обращен в противоположную от вас сторону, что соответствует направлению индуктированного тока в проволоке R. Индуктированный ток течет к вам по проволоке L и от вас по проволоке R, — именно это и происходит в прямоугольной петле.

Теперь представим, что проволоки L и R подсоединены каждая к отдельным токосъемникам (соответственно кольца A и B), каждое из которых отцентрировано относительно стержня, служащего осью, вокруг которой вращается петля. Ток потечет от кольца B по проволоке R, затем по проволоке L к кольцу A. Если же один конец цепи соединен с одним из колец при помощи подвижного соединения, а второй конец цепи — таким же образом связан с другим кольцом, то ток, произведенный поворачивающимся якорем, будет проходить по всей цепи.

Однако рассмотрим прямоугольную петлю более подробно. Поскольку петля вращается, проволоки L и R не могут безгранично двигаться вверх и вниз. Они постоянно меняют направление. Когда проволока L движется вверх, она изгибается вправо и перемещается под небольшим углом к силовым линиям, поэтому сила индуктированного тока уменьшается. То же самое происходит и с проволокой R, которая при движении вниз изгибается влево и тоже перемещается под меньшим углом к силовым линиям.

Ток продолжает уменьшаться по мере поворота петли, пока петля не совершит поворот в 90° , так что проволока L оказывается наверху, а проволока R — внизу. Теперь проволока L движется вправо, параллельно силовым линиям, а проволока R — влево, так же параллельно линиям. Сила индуктированного тока падает до нуля. Петля продолжает вращение, и проволоки L и R пересекают силовые линии, соответственно вниз и вверх. Две проволоки поменялись местами, проволока L стала проволокой R, и наоборот.

Обе проволоки, несмотря на перемену мест, по-прежнему соединены с теми же токосъемниками. Это означает, что, когда якорь совершает одно полное вращение, ток половину этого времени течет от кольца B к кольцу A, а вторую половину — от кольца A к кольцу B. Это повторяется при следующем вращении и т. д.

Таким образом производится *переменный ток*, который бесконечно движется взад-вперед. Одно вращение петли производит одно движение тока назад и вперед, то есть один *такт*. Если петля поворачивается со скоростью 60 оборотов в секунду, то перед нами 60-тактовый переменный ток.

Сила тока не остается равномерной, даже пока ток течет в одном направлении. В течение одного вращения петли сила тока начинается с нуля, когда проволоки (верхняя и нижняя) движутся параллельно силовым линиям, и постепенно возрастает до максимума, когда проволоки (правая и левая) движутся перпендикулярно силовым линиям, а затем вновь плавно снижается к нулю, поскольку проволоки (нижняя и верхняя) вновь становятся параллельны силовым линиям.

Петля продолжает вращаться, ток меняет направление. Представим, что поток становится меньше нуля, — так и будет, если силу тока измерять положительными значениями, пока он течет в одном направлении, и отрицательными — в обратном. Следовательно, упав до нуля, интенсивность тока постепенно продолжает падать до минимума, на котором проволоки (левая и правая) движутся перпендикулярно силовым линиям, и снова плавно возрастает до нуля, когда проволоки (верхняя и нижняя) опять движутся параллельно силовым линиям. Так завершается одно вращение, и цикл начинается заново.

Вообразим для удобства, что максимальная сила тока — 1 ампер, тогда в первой четверти вращения интенсивность изменится с 0 на +1, во второй четверти — с +1 на 0, в третьей четверти — с 0 на -1, в четвертой — с -1 на 0. Если рассмотреть изменение силы тока со временем, то возникает плавно возрастающая и падающая, бесконечно повторяющаяся волна, которая в математике называется *синусоида*.

Генератор легко можно видоизменить для того, чтобы производить ток, движущийся по цепи только в одном направлении, это будет *постоянный ток*. Такой тип тока открыл Вольт, и именно этот ток всегда получается при использовании химических элементов питания.

Представим, что два конца прямоугольной петли присоединены к «полукольцам», которые примыкают друг к другу вокруг стержня-оси вращения, но не соприкасаются. Проволока L связана с одним полукольцом, а проволока K — с другим. Подвижный контакт одного конца цепи касается одного полукольца, подвижный контакт другого конца — второго полукольца.

В течение первой половины полного оборота якоря ток идет от полукольца A к полукольцу B. Вторая половина оборота со-

проводящегося течением тока от полукольца В к полукольцу А. Однако каждый раз, когда якорь совершает полуобращение, полукольца меняются местами. Если один подвижный контакт касается положительного полукольца, то отрицательное полукольцо становится на место, как только становится положительным, и покидает свое место, как только начинает получать отрицательное значение.

Другими словами, первый подвижный контакт в процессе вращения касается каждого полукольца, когда кольца находятся в положительной стадии своего цикла; второй контакт касается полукольца, только когда они отрицательны. Ток в якоре может менять направление, но по присоединенной цепи он течет постоянным.

Сила тока по-прежнему возрастает и падает от 0 до +1 и от 0 до -1 и обратно. Путем увеличения числа петель и разделения колец на маленькие части можно свести к минимуму эти вариации в силе тока и получить достаточно ровный постоянный ток.

Генератор переменного тока выглядит проще, чем генератор постоянного тока, но для того, чтобы переменный ток можно было применить, следовало преодолеть некоторые трудности. Эдисон, например, был ярким сторонником постоянного тока и в последние десятилетия XIX века усиленно боролся против использования переменного тока. Большим защитником использования переменного тока был американский изобретатель Джордж Вестингауз (1846—1914).

Рассматривая своеобразное соревнование между двумя типами тока, с первого взгляда можно решить, что постоянный ток «выигрывает». Следовательно, переменный ток кажется в свете этого бесполезным. В конце концов постоянный ток в результате «куда-то попадает» и, следовательно, полезен, а переменный «никуда не попадает» и, следовательно, полезным быть не может — по крайней мере, так кажется.

Однако это представление неверно.

Это заблуждение. Оно возникает при проведении ошибочной аналогии с водой, которая течет по трубе. Мы хотим, чтобы вода полилась для какой-то определенной цели — чтобы полить, помыть, охладить что-либо, полить растения, потушить пожар и т. д.

Но в стандартные бытовые приборы электричество никогда не «вытекает» из провода. Оно никуда не уходит ни при каких обстоятельствах. Постоянный ток может течь только в одном направлении, но он движется в рамках своей цепи и никуда не «приходит», так же как если бы он двигался взад-вперед.

Бывают случаи, когда постоянный ток, безусловно, необходим. При зарядке батарей, например, ток должен идти только в одном направлении — противоположном тому, в котором он движется при разрядке батарей. С другой стороны, иногда не важно — постоянный ток или переменный.

К примеру, тостер или лампа накаливания работают только потому, что сопротивление раскаляет часть цепи (докрасна в тостере и добела — в лампочке). Эффект нагревания не зависит от направления тока, даже если оно меняется туда-сюда.

Таким же образом, вам будет жарко и вы вспотеете независимо от того, пробежали ли вы милью по прямой, по круговой дорожке или взад-вперед по комнате.

Более серьезная проблема с переменным током заключалась в том, что математический анализ его поведения более сложен, чем анализ цепей с постоянным током. Для разработки правильных цепей переменного тока нужно было сначала произвести полный математический анализ. Пока этого не произошло, таким цепям все время приписывалась низкая эффективность.

Полное сопротивление, импеданс

Ситуация, когда сила тока и разность потенциалов постоянно меняются, вызывает важные вопросы — например, как произвести простейшие вычисления касательно переменного тока. Если формула включает I (силу тока) или E (разность потенциалов), то непонятно, какую величину использовать, поскольку переменный ток не имеет постоянного значения ни того ни другого, а имеет только значения, которые постоянно изменяются от нуля до какой-то максимальной величины (I_{max} и E_{max}) сначала в одном направлении, потом — в другом.

Можно высчитать эти свойства переменного тока по их производительности — это проще, чем определять их абсолютные числовые значения. Можно увидеть, к примеру, что переменный ток способен иметь ту же производительность (если измерять теплоотдачу или другие факторы), что и постоянный ток с определенными значениями I и E . Соответственно величины I и E представляют собой *эффективную силу тока* и *эффективную разность потенциалов* переменного тока. Эффективные величины относятся к максимальным величинам следующим образом:

$$I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = 0,71 I_{max}, \quad (\text{Уравнение 13.1})$$

$$E = \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = 0,7 E_{\text{max}}. \quad (\text{Уравнение 13.2})$$

Можно предположить, что, найдя значения I и E для переменного тока, можно продолжить вычисления и сопротивления, представив его как отношение E/I (сила тока, при заданной разности потенциалов) в соответствии с законом Ома. Однако здесь начинаются сложности. Цепь, которая при постоянном токе имеет низкое сопротивление, при переменном токе будет характеризоваться гораздо большим сопротивлением, поскольку при той же разности потенциалов будет получаться более слабый ток. Очевидно, переменный ток наделяет цепь неким дополнительным фактором сопротивления, отличным от обычного сопротивления вещества, из которого изготовлена цепь.

Чтобы понять, почему это происходит, вернемся к первым экспериментам Фарадея с электромагнитной индукцией (см. гл. 12). Там электрический ток лускался по одной катушке — возникало магнитное поле, расширяющиеся силовые линии пересекали вторую катушку, индуцируя разность потенциалов, соответственно создавался электрический ток во второй катушке. Когда ток в первой катушке выключали, сокращающиеся силовые линии угасающего магнитного поля снова пересекали вторую катушку, провоцируя разность потенциалов с другим знаком, и, таким образом, появлялся ток во второй катушке, идущий в обратном направлении.

Это понятно. Но следует отметить, что, когда ток начинает идти по катушке так, что силовые магнитные линии распространяются наружу, они пересекают не только другие соседние катушки, но и каждый из витков, которые создают магнитное поле. Затем, когда ток в катушке выключается, силовые линии исчезающего магнитного поля пересекают те самые катушки, в которых только что был ток. Поскольку ток начинает и прекращает течь в катушке, индуцированный ток возникает в ней же. Это называется *самоиндукцией* или *индуктивностью*, и обнаружил ее Генри в 1832 году. (На этот раз Генри обнаружил свое изобретение, опередив Фарадея, который самостоятельно пришел к тем же выводам; Фарадей, как вы помните, таким же образом превосходил Генри в открытии электромагнитной индукции.)

Почти одновременно с Генри и Фарадеем индуктивность изучал и русский физик Генрих Фридрих Эмилий Ленц (1804—1865). Он сделал важное обобщение: индуцированная разность

потенциалов, возникающая в цепи, всегда стремится к противодействию создавшей ее силе. Это явление носит название «закон Ленца».

Следовательно, когда при замыкании цепи возникает ток, ожидается, что сила тока немедленно возрастет до предполагаемого уровня. Однако по мере возрастания она создает индуктированную разность потенциалов, которая меняет направление тока на противоположное. Это противодействие индуктивности заставляет первоначальный ток усиливаться в цепи до ожидаемого уровня сравнительно медленно.

Размыкание цепи приводит к прерыванию течения тока, при этом логично, что сила тока сразу упадет до нуля. Вместо этого выключение тока провоцирует индуктированное напряжение, которое заставляет ток продолжать течь. Интенсивность тока падает до нуля сравнительно медленно. Эту противоположную разность потенциалов, произведенную самоиндукцией, часто называют *обратным напряжением*.

При постоянном токе этот эффект противодействующей индуктивности не настолько важен, поскольку ощущается только при пуске и остановке тока, когда силовые линии двигаются наружу и внутрь. Пока ток постоянно течет в одном направлении, силовые линии не меняются, нет индуктированного тока, нет взаимодействия с первичным током.

Переменный же ток меняется постоянно, и для него это важно, поскольку магнитные силовые линии, все время двигаясь наружу и внутрь, постоянно пересекают катушки. Индуцируемая разность потенциалов здесь присутствует постоянно и постоянно противодействует основной разности потенциалов, сильно уменьшая ее. Так, если некая разность потенциалов создает сильный постоянный ток в определенной цепи, то переменный ток при ней же будет в большой степени нейтрализован индуктивностью и, следовательно, будет в такой же цепи гораздо слабее.

В честь ученого единица индуктивности получила название «генри». Когда сила тока в цепи меняется в пропорции 1 ампер в секунду и в процессе индуцирует противоположную разность потенциалов мощностью 1 вольт, цепь имеет индуктивность в 1 генри. По этому определению 1 генри равен 1 вольту на ампер в секунду или вольт-секунду на ампер (вольт-с/ампер).

Сопrotивление тока, произведенное самоиндукцией, зависит не только от значения индуктивности, как таковой, но также и от частоты переменного тока, поскольку с увеличением частоты изменение силы тока за заданное время (ампер в секунду) увеличивается. Соответственно чем больше поворотов делается

в секунду, тем большее сопротивление тока создается при одной и той индуктивности.

Представим, что индуктивность обозначается как L , а частота переменного тока как f . Сопротивление, произведенное этими факторами, называется *индуктивным сопротивлением* и обозначается как X_L . Получается, что:

$$X_L = 2\pi fL. \quad (\text{Уравнение 13.3})$$

Если L измерять в генри, то есть в вольт-секундах на ампер, а f — в обратных секундах, то размерностью X_L должны быть вольт-секунда на ампер в секунду. Секунды сокращаются, и размерность становится просто вольт на ампер, то есть ом (см. гл. 11). Другими словами, единицы измерения индуктивного сопротивления, как и обычного, — омы.

И обычное сопротивление (R), и индуктивное сопротивление (X_L) влияют на силу тока, создающуюся в цепи переменного тока при заданной разности потенциалов; вместе они создают *полное сопротивление (импеданс)* — Z . Однако оно вычисляется не простым прибавлением индуктивного сопротивления к обычному, а по следующей формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (\text{Уравнение 13.4})$$

В цепи с переменным током именно импеданс играет ту же роль, что и обычное сопротивление в цепи с постоянным током. Другими словами, эквивалентом закона Ома для цепи с переменным током будет $I Z = E$, или $I = E Z$, или $Z = I/E$.

Конденсаторы производят сопротивление несколько по-другому. Конденсатор в цепи постоянного тока играет роль воздушной пробки и при нормальных разностях потенциалов не дает току протекать. В цепи же с переменным током, однако, конденсатор не препятствует течению тока. Точнее, через воздушную пробку ток не движется, но он поочередно скапливает электроны сначала в одной пластине конденсатора, затем — в другой. Перемещаясь туда-обратно из одной пластины в другую, ток проходит через прибор, скажем электрическую лампочку, — и та начинает светиться. Нить накала реагирует на прохождение по ней тока, а вовсе не на то, что где-то, может быть, есть другой участок цепи, по которой ток не движется.

Чем больше емкость конденсатора, тем сильнее мечущийся туда-сюда ток, потому что тем больше накапливающийся то в одной, то в другой пластине заряд. Можно объяснить это и по-другому: чем больше емкость конденсатора, тем меньше про-

тивдействие току, поскольку для электронов имеется больше места в пластине, и, следовательно, меньшим является взаимное отталкивание отрицательных зарядов, противодействующее току.

Это противодействие непрерывному току называется *емкостным сопротивлением* (X_c), и оно обратно пропорционально емкости (С) конденсатора. Емкостное сопротивление также обратно пропорционально частоте тока (f), поскольку чем быстрее ток меняет направление, тем менее вероятно, что та или иная пластина конденсатора переполнится электронами в течение половины цикла, и тем меньше взаимное отталкивание отрицательных зарядов, противодействующее току. (Другими словами, повышение частоты уменьшает емкостное сопротивление, хотя и повышает сопротивление индуктивное.) Обратное отношение можно выразить следующим образом:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (\text{Уравнение 13.5})$$

Емкость (С) измеряется в фарадах, то есть в кулонах на вольт, или в ампер-секундах на вольт. Поскольку размерность частоты (f) — обратные секунды, то размерность $2\pi fC$ — ампер-секунды на вольты на секунды, то есть амперы на вольты. Размерность емкостного сопротивления (X_c) обратна этой, то есть вольты на амперы, или омы. Таким образом, ясно, что емкостное сопротивление, как и индуктивное, является формой общего сопротивления в цепи.

И емкостное сопротивление, и индуктивное сопротивление уменьшают силу тока в цепи с переменным током при заданной разности потенциалов, если присутствуют в ней поодиночке. Однако делают они это противоположным образом.

В простейшем случае сила тока и разность потенциалов переменного тока обе увеличиваются и уменьшаются по синусоиде. Нулю они равняются одновременно; одновременно же одна из них достигает максимума, а вторая — минимума. Индуктивное же сопротивление, однако, приводит к тому, что сила тока начинает «запаздывать», достигая своего максимума (или минимума, или нуля) только через какое-то время после того, как его достигла разность потенциалов. С другой стороны, емкостное сопротивление приводит к тому, что сила тока начинает «спешить», увеличиваясь и падая на какое-то время раньше, чем разность потенциалов. В любом случае сила тока и разность потенциалов теряют синхронность, и энергия теряется.

Поэтому, если в цепи присутствующее и емкостное, и индуктивное сопротивление, действие одного оказывается противоположным действию другого. «Ускорение» емкостного сопротивления накладывается на «запаздывание» сопротивления индуктивного. Общее сопротивление в этом случае будет выражаться так:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (\text{Уравнение 13.6})$$

Если цепь составлена таким образом, что емкостное сопротивление равно индуктивному сопротивлению, $X_L - X_C = 0$ и $Z = \sqrt{R^2} = R$. Общее сопротивление цепи с переменным током в этом случае не больше, чем обычное сопротивление аналогичной цепи с постоянным током. Такая цепь носит название «резонансный контур». Обратите внимание, что импеданс никогда не может быть меньше сопротивления. Если емкостное сопротивление больше, чем индуктивное, то $X_L - X_C$ является отрицательной величиной, но его квадрат — величина положительная, и если взять квадратный корень от суммы, то окончательное значение Z будет больше, чем R .

Это только самое начало усложнений, которые привносит в электрические цепи переменный ток. Большую часть полного знания о цепях переменного тока получил в начале XX века немецко-американский инженер-электрик Чарльз Протеус Штайнметц (1865—1923), и только после этого стало возможным широкое использование переменного тока.

Трансформаторы

Еще до того как Штайнметц рационализировал использование переменного тока, и несмотря на огромные трудности, которые стояли на пути электриков в отсутствие этих знаний, а также несмотря на огромное сопротивление таких людей, как, например, Эдисон и Кельвин, борьба за применение переменного тока была выиграна. Причиной тому стало соображение, что переменный ток намного превосходит постоянный в отношении передачи его на большие расстояния.

Мощность электрического тока измеряется в ваттах и равняется разности потенциалов (в вольтах), умноженной на амперы силы тока. (Строго говоря, это так только в отсутствие сопротивления. Если присутствует индуктивное сопротивление, то мощность уменьшается на специальный *фактор мощ-*

ности. Однако это уменьшение можно сократить или вообще устранить путем введения соответствующего емкостного сопротивления, поэтому нас этот вопрос беспокоить не должен.)

Это означает, что ток одной и той же мощности может порождаться различными сочетаниями вольт и амперов. Например, через некое устройство может пропускаться 1 ампер при 120 вольтах, или 2 ампера при 60 вольтах, или 5 ампер при 24 вольтах, или 12 ампер при 10 вольтах. Мощность во всех случаях будет одной и той же — 120 ватт.

В некоторых случаях выгоднее, чтобы ток заданной мощности появлялся при большом количестве вольт и малом — ампер, в других — наоборот. В последнем случае низкая разность потенциалов уменьшает риск пробоя изоляции или получения короткого замыкания.

И остается уже упомянутая проблема передачи электроэнергии на большие расстояния. Большая часть преимуществ использования электроэнергии была бы потеряна, если бы ее можно было использовать только поблизости от генератора.

Поскольку если ток посылать по проводам на далекие расстояния, то на нагрев проводов уйдет столько энергии, что либо до адресата дойдет ее слишком мало, либо потери придется сокращать за счет утолщения проводов до такой степени, что они станут слишком дорогими.

Как известно, выделение тепла пропорционально квадрату силы тока. Следовательно, если снизить силу тока до очень малой величины, увеличивая в то же время разность потенциалов для того, чтобы электрическая мощность оставалась неизменной, то на нагрев проводов будет тратиться гораздо меньше энергии.

Естественно, маловероятно, что это сочетание высокого напряжения и малой силы тока будет годиться для применения в обычных электрических устройствах. Следовательно, нам нужна ситуация, где одна и та же мощность будет при очень большом напряжении в момент передачи и при малом — в момент использования.

В случае с постоянным током совершенно нерационально пытаться изменить разность потенциалов тока — то вверх, то вниз — для сиюминутных нужд. Однако что касается переменного тока, с ним это несложно проделать с помощью *трансформатора* (устройства, трансформирующего (изменяющего) отношение силы тока к напряжению). В сущности, в 1831 году Фарадей изобрел именно трансформатор, когда, пытаясь получить индуцированный ток, принялся экспериментировать с железным кольцом и двумя катушками проволоки.

Фарадей обнаружил, что когда через одну катушку пропускают постоянный ток (который называется *током в первичной обмотке*), то во второй катушке (*во вторичной обмотке*) ток не возникает, кроме тех моментов, когда первичный ток только возникает или только заканчивается. Только тогда магнитные силовые линии просачиваются во вторичную обмотку. Однако если ток в первичной обмотке — переменный, то сила тока всегда то падает, то повышается.

И сила магнитного поля в железном кольце всегда то повышается, то падает. Силовые линии расширяются наружу и сжимаются внутрь снова и снова, а по мере того, как это происходит, они пересекают вторичную обмотку, производя переменный ток, который полностью отражает переменный ток в первичной обмотке.

Разность потенциалов индуцированного тока зависит от отношения количества витков во вторичной обмотке к количеству в первичной обмотке. Так, если ток в первичной обмотке имеет разность потенциалов в 120 вольт и если вторичная обмотка содержит в 10 раз больше витков проволоки, чем первичная, то индуцированный ток будет иметь разность потенциалов 1200 вольт. Это пример *повышающего трансформатора*.

Если производимый таким трансформатором индуцированный ток переходит в первичную обмотку другого трансформатора, вторичная обмотка которого содержит уже в 10 раз меньше витков, чем первичная, то производимый в ней ток вновь имеет 120 вольт. Этот второй трансформатор называется *понижающим*.

Этот индуцированный ток (если опустить потери на выделение тепла) должен иметь ту же мощность, что и изначальный ток. В противном случае получилось бы, что в процессе передачи появилась или пропала энергия, а этого быть не может. Это означает, что по мере увеличения разности потенциалов сила тока должна уменьшаться, и наоборот. Если ток в один ампер при 120 вольтах попадает в повышающий трансформатор, вторичная обмотка которого содержит в 100 раз больше витков, чем первичная, и индуцированный ток будет иметь разность потенциалов в 12 000 вольт и силу тока в $\frac{1}{100}$ ампера.

И в первичной, и во вторичной обмотке сила тока будет равной 120 ваттам.

Если используется генератор переменного тока, то изменение напряжения посредством трансформатора не составляет никакого труда. Повышающий трансформатор в особенности помогает поднять разность потенциалов на огромную высоту.

а силу тока свести к минимуму. Такой ток можно передавать на большие расстояния по не особенно толстым проводам, и потери на выделение тепла ввиду малой силы тока будут не очень велики. Мощность же тока благодаря высокой разности напряжений будет передаваться полностью.

Когда ток доходит до места назначения, понижающий трансформатор приведет разность его потенциалов к более низкой величине, а силу тока — к более высокой, и его можно будет использовать в бытовой и промышленной технике. Для работы некоторых устройств может требоваться более высокое или более низкое напряжение, к которому ток приводят правильно подобранные трансформаторы.

Передача переменного тока на дальние расстояния с применением высокого напряжения стала возможной вследствие работы хорватско-американского инженера-электрика Николы Теслы (1857—1943). Однако его опередил Джордж Вестингауз, выигравший в 1893 году право постройки гидроэлектростанции (электростанции, где сила падающей воды вращает турбины, которые поворачивают якоря, что производит электричество) на Ниагарском водопаде для производства и передачи переменного тока.

С тех пор переменный ток приобрел всеобщее распространение, и именно с тех пор электричество стало гибкой и легко приспособляемой формой полезной энергии.

Электромоторы

Благодаря изобретению генераторов механическая энергия может быть преобразована в электрическую, и стало возможным получение из горящего угля или падающей воды большого количества электроэнергии. Благодаря изобретению переменного тока и трансформаторов появилась возможность передавать эту электроэнергию на дальние расстояния и подводить к каждому дому или фабрике.

Однако, попав в дом или на фабрику, что должно делать там наше электричество? К счастью, к тому времени, как электричество научились в достаточном количестве производить и передавать, вопрос о его применении был уже решен.

Это решение основывалось на эффекте, обратном обесцвечиванию. Так в науке бывает часто. Если деформация кристалла приводит к появлению разности потенциалов, то применение разности потенциалов к противоположным сторонам кристалла должно будет его деформировать. Если электрический ток

создает магнитное поле, то и магнитное поле можно заставить создавать электрический ток.

Следовательно, не стоит удивляться, что если механическая энергия может быть переведена в электрическую при движении проводника и пересечении им магнитных силовых линий, то и электрическая энергия может быть переведена в механическую при движении проводника поперек магнитных силовых линий.

Представим медную проволоку между полюсами магнита, северный полюс которого находится справа, а южный — слева. Если медную проволоку двигать вверх, то из открытого Флемингом правила правой руки мы знаем, что в ней будет индуцироваться ток, идущий по направлению к нам.

Теперь представим, что проволока остается посреди поля неподвижной, так что ток в ней не индуцируется. Представим, что мы пропускаем по ней ток из батареи и этот ток движется по направлению к нам. Проволока, по которой идет ток, теперь сама создает магнитное поле. Поскольку ток движется по направлению к нам, то силовые линии движутся по кругу против часовой стрелки.

Над проволокой эти круговые силовые линии движутся в том же направлении, что и прямые силовые линии, идущие от северного к южному полюсу магнита. Действие тех и других складывается так, что магнитный поток усиливается. Под проволокой же круговые силовые линии идут в направлении, противоположном силовым линиям магнита, так что здесь они частично нейтрализуют друг друга и плотность потока уменьшается.

Поскольку над проволокой магнитный поток имеет большую плотность, а под проволокой — малую, то проволоку толкает вниз естественное стремление силовых линий «сравняться». Если ток в проволоке движется по направлению от нас так, что его силовые линии направлены по часовой стрелке, то плотность магнитного потока будет больше внизу и проволоку будет толкать вверх.

Подводя итоги, представим магнит, силовые линии которого направлены справа налево:

— если проволока без тока движется вверх, порождается ток, движущийся по направлению к нам;

— если проволока без тока движется вниз, порождается ток, движущийся по направлению от нас;

— если по проволоке идет ток, движущийся по направлению к нам, порождается движение вниз;

— если по проволоке идет ток, движущийся по направлению от нас, порождается движение вверх.

В первых двух случаях ток порождается движением, и устройство является генератором. В последних двух движение создается из тока, и устройство называется мотором. (Оба устройства воплощают один и тот же принцип, но в одном случае он работает «в одну сторону», а в другом — «в другую».)

Отметим, что в генераторе ток, движущийся по направлению к нам, связан с движением вверх, а ток, движущийся от нас, — с движением вниз.

В моторе же ток, движущийся к нам, связан с движением вниз, а ток от нас — с движением вверх. Следовательно, в определении направлений силовых линий, тока и движения по отношению к мотору следует руководствоваться принципами, прямо противоположными тем, которыми мы руководствуемся по отношению к генератору.

Для генератора мы использовали правило правой руки, а поскольку наша левая рука зеркально отражает правую, то для определения различных направлений в случае с мотором мы пользуемся *правилом левой руки* (большой, указательный и средний пальцы которой растопырены под прямыми углами друг к другу). Как и в случае применения правила правой руки, мы принимаем направление указательного пальца как направление силовых линий, то есть к южному полюсу. Средний палец в этом случае будет показывать направление тока, а большой — направление движения.

Теперь давайте перейдем к проволочной петле, находящейся между полюсами магнита. Если ей придать механическое вращение, то в петле порождается электрический ток. Следовательно, естественно ожидать, что если через петлю пропустить электрический ток из внешнего источника, то мы получим самопроизвольное механическое вращение. (Не вдаваясь в детали, скажу лишь, что такое механическое вращение достижимо при использовании как переменного, так и постоянного тока. Некоторые моторы могут работать и на том, и на другом.)

Следовательно, эти два устройства не могут быть полностью одинаковыми. Первое, используемое как генератор, будет преобразовывать тепловую энергию горящего угля в механическую энергию вращающегося якоря и из него уже получать электроэнергию. Полученная таким образом электроэнергия попадает во второе устройство — в мотор — и там преобразуется в механическую энергию вращающегося якоря. Конечно же можно сделать и большой генератор, который будет создавать достаточно энергии, чтобы от него могло работать множество небольших моторов.

Когда большие генераторы сделали возможным производство больших объемов электроэнергии, а трансформаторы сделали возможной ее транспортировку на большие расстояния, возникла необходимость в том, чтобы эта электроэнергия была подведена к миллионам моторов в домах и на фабриках¹.

Напрашивалось появление моторов, которые можно было бы использовать; однако этого ждали почти полвека, потому что первый мотор был сконструирован Генри в 1931 году.

Вращающиеся колеса с древнейших времен использовались человеком в качестве источника механической энергии, поскольку вращательное движение не только может принести пользу само по себе, но и с легкостью может быть переведено в возвратно-поступательное, если использовать правильные механические соединения. На протяжении всей истории человечества колеса вращались мышечной силой человека и животных, падающей водой и ветром. Однако мышцы слабы и быстро утомляются, вода падает не везде, а на ветер никогда нельзя полагаться.

После изобретения паровой машины колеса стала вращать струя пара. Однако механизмы, требующиеся для вращения больших колес, были громоздкими, и их можно было размещать только на фабриках или на больших машинах, таких как локомотив или корабль. Поэтому их использование было рациональным только для масштабных работ. О создании маленьких паровых машин для домашнего использования речи не шло. Кроме того, процесс первоначального запуска паровой машины занимал много времени, поскольку для этого требовалось вскипятить большое количество воды.

С созданием мотора появилась возможность отделить колесо. Генератор как источник энергии уже не надо было размещать в доме или рядом с ним. Кроме того, электрический мотор включается и выключается одним щелчком выключателя.

Моторы оказались крайне универсальными, они могли вращать колеса любого размера и силы. Были разработаны большие моторы для автомобилей или промышленных станков и крошечные для пишущих машинок, бритв и зубных щеток.

Благодаря Фарадею и Генри (и помощи Теслы и Штейнмца) жизнь населения промышленной части Земли наполнилась электрической техникой.

¹ Конечно, применение электричеству можно найти и в отсутствие моторов, как это происходит, например, в тостерах и электрических лампах, где требуется только один нагрев и никакого механического движения.

Глава 14

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Уравнения Максвелла

К середине XIX века связь между электричеством и магнетизмом была уже четко установлена и повсюду использовалась. Были изобретены генератор и мотор, и действие того и другого основывалось на взаимосвязи электричества и магнетизма.

Однако теория за практикой не успевала. Например, Фарадей, наверное самый великий изобретатель в области электричества, имел минимальные представления о математике, и поэтому его учение о силовых линиях было преподнесено в столь незамысловатой форме, где они описывались прямо-таки как резиновые жгуты¹.

В 60-х годах XIX века Максвелл, большой почитатель Фарадея, принялся за разработку математического анализа взаимосвязей электричества и магнетизма с целью придать более строгий вид нематематическим выкладкам Фарадея.

Чтобы описать, каким образом электрический ток неизбежно порождает магнитное поле, как магнит может порождать электрический ток, а оба эти явления — и электрический заряд, и магнитные полюса — порождают поля, состоящие из силовых линий, в 1864 году Максвелл разработал четыре сравнительно простых уравнения, известные с тех пор как *уравнения Максвелла*². С их использованием стало возможно просчитать природу взаимоотношений электричества и магнетизма в разных условиях.

Для того чтобы уравнения были верны, кажется, невозможно рассматривать отдельно электрическое или магнитное поле. Оба они всегда присутствуют вместе, действуя под определенным углом друг к другу, поэтому можно говорить о существовании единого *электромагнитного поля*.

Далее, рассматривая возможность применения своих уравнений, Максвелл обнаружил, что изменяющееся электрическое поле должно производить изменяющееся магнитное поле, ко-

¹ Не стоит воспринимать это как насмешку над Фарадеем, который был поистине одним из величайших ученых всех времен. Его интуиция было просто гениальной. Хотя его система воззрений выработывалась и без помощи тщательно разработанного математического анализа, она оказалась прочной. Когда в конце концов ее проверили математически, выяснилось, что Фарадей был полностью прав.

² К сожалению, это дифференциальные уравнения, в которых применяется исчисление, а в этой книге мы исчисления не затрагивали. Поэтому мы упомянем об уравнениях Максвелла, но приводить их не будем.

торое, в свою очередь, должно производить меняющееся электрическое поле, и т. д.; таким образом, они чередуются, и поле распространяется наружу во всех направлениях. Результатом этого является излучение, обладающее волновыми свойствами. Короче, Максвелл предсказал существование электромагнитных волн, имеющих частоту, равную той, с которой сжималось и расширялось электромагнитное поле.

Максвеллу удалось даже рассчитать скорость, с которой должна двигаться такая электромагнитная волна. Он сделал это, приняв во внимание отношение определенных значений в уравнениях, описывающих силы, действующие между электрическими зарядами и между магнитными полюсами. В результате он получил значение — около 300 000 километров в секунду — значение скорости света, и Максвелл не мог счесть это всего лишь совпадением. Электромагнитное излучение оказывалось не теоретическим понятием его уравнений, а реально существующим явлением. Свет и должен являться электромагнитным излучением¹.

Уравнения Максвелла послужили нескольким общим целям. Во-первых, для картины «вселенной полей» они стали тем же, чем законы Ньютона для картины «механической Вселенной». На самом деле Максвеллу его уравнения удалось даже лучше, чем Ньютону его законы. Последние оказались лишь приближенными, верными лишь для низких скоростей и коротких расстояний. Чтобы применяться более широко, им требовались уточнения, которые предоставила эйнштейновская теория относительности. Уравнения же Максвелла пережили все перемены, внесенные теорией относительности и квантовой теорией; в свете нового знания они оказались такими же верными, как и век назад, когда были выведены.

Во-вторых, уравнения Максвелла, в сочетании с позднейшим развитием квантовой теории, вроде бы наконец-то дали нам удовлетворительное объяснение природы света (именно этот вопрос занимает большую часть этой книги и является ее главной темой). Ранее (см. гл. 8) я писал, что, даже если приписать свету частицеобразные свойства, все равно у него остаются и волнообразные свойства, и задавал вопрос, что же может быть их причиной. Как мы видим теперь, эти волнооб-

¹ Однако описание того, каким образом световые волны с частотой колебаний в сотни триллионов могут производиться электромагнитно, смогло появиться только через полвека, пока квантовую теорию (о которой во времена Максвелла нельзя было и мечтать) не применили к описанию внутренней структуры атома (о которой во времена Максвелла ничего не знали). То, как это случилось, будет описано в III части этой книги.

разные свойства являются вибрацией электромагнитного поля. Электрическая и магнитная составляющие этого поля направлены под правильным углом друг к другу, а вся волна в целом движется в направлении под правильным углом к обеим составляющим.

Максвеллу, придерживавшемуся теории эфира, казалось, что к вибрации электромагнитного поля приводили волнообразные искажения эфира. Однако уравнения Максвелла превзошли даже своего творца. Теория эфира ушла в прошлое, а электромагнитные волны остались, поскольку теперь вибрацию поля можно представлять как вибрационные изменения в геометрии пространства, что не требовало присутствия материи. Больше не требовалось, чтобы для создания световых волн что-либо колебалось.

Из четырех явлений, которые со времен Ньютона считались примерами воздействия на расстоянки, как минимум три оказались благодаря уравнениям Максвелла разными гранями одного и того же явления. Электричество, магнетизм и свет были объединены в единое электромагнитное поле. Только сила гравитации не была в него включена. Учитывая важную разницу между гравитацией и электромагнетизмом, Максвелл не стал пытаться включить в свои уравнения и гравитационное поле. После его смерти такие попытки предпринимались, в частности, это делал Эйнштейн во второй половине жизни.

Однако выводы Эйнштейна в общем не были приняты физиками, и вопрос о «единой теории полей» пока остается открытым.

Максвелл считал, что процессы, приводящие к электромагнитному излучению, могут служить и для порождения волн любой частоты, а не только световых и близких к ним ультрафиолетовых и инфракрасных. Он предсказал, что электромагнитное излучение, во всем похожее на свет, может существовать на всех частотах ниже и выше световых.

К сожалению, Максвелл не дождался подтверждения своего прогноза, поскольку умер от рака в 1879 году достаточно рано — ему было 48 лет. Только 9 лет спустя, в 1888 году, немецкий физик Генрих Рудольф Герц (1857—1894) обнаружил электромагнитное излучение с очень низкой частотой — излучение, которое мы сейчас называем *радиоволнами*. Это полностью совпало с предположениями Максвелла и было принято как подтверждение его уравнений. В 1895 году другой немецкий физик, Вильгельм Конрад Рентген (1845—1923), открыл электромагнитное излучение с очень высокой частотой, мы теперь называем это *рентгеновскими лучами*.

Последние 20 лет XIX столетия оказались также временем фундаментального прогресса в изучении электричества. Электрический ток пропускали через частичный вакуум, и электроны, вместо того чтобы оставаться скрытыми в металлической проводке или привязанными к перемещающимся атомам и группам атомов в растворе, проявили себя в качестве самостоятельных частиц.

Изучение новых частиц и излучений произвело фактическую революцию в физике и технологии электричества — столь яркую, что о ней говорят как о второй научной революции (первой принято называть ту, которая началась с Галилея).

И именно о второй научной революции и пойдет речь в III части этой книги.

Часть третья ЭЛЕКТРОН, ПРОТОН И НЕЙТРОН

Глава I АТОМ

В первых частях книги я рассказывал о тех разделах физики, где можно было пренебречь внутренней структурой вещества. В частности, я говорил о гравитации. Любое небесное тело, обладающее такой же массой, как Земля, будет иметь такую же, как и у Земли, силу притяжения независимо от того, из чего это тело состоит. Более того, когда мы изучаем законы гравитационного взаимодействия тел, нам даже нужно пренебречь внутренней структурой этих тел. Например, кирпич — это единое целое, и перемещается он как единое целое, поэтому при изучении перемещения кирпича нам не важен его состав. Можно вывести очень важные законы электромагнитных волн, наблюдая за увеличением заряда на конце пробки или исследуя магнитное поле постоянного магнита, и для этого совсем не обязательно изучать внутреннюю структуру самого магнита. Даже тепло можно принять за некую невидимую жидкость¹, перетекающую от одного предмета к другому, и на основе этого выявить законы термодинамики.

Впрочем, если вы прочитали обе предыдущие части, думаю, для вас стало очевидно, что для более глубокого понимания феномена нам все же необходимо перейти на уровень микрочастиц.

Так, гораздо легче понять свойства газов, если представить газ как совокупность молекул (см. ч. I)².

¹ Температуру можно представить как среднюю кинетическую энергию всех движущихся частиц вещества (см. ч. I). А энергия, как и вещество, тоже состоит из микрочастиц (см. ч. II).

² Ссылки на части I и II настоящей книги обозначаются: см. ч. I, см. ч. II, а ссылки внутри этой части указывают на главу: см. гл. ...).

В этом третьем томе и более подробно расскажу о внутренней структуре вещества и энергии и попытаюсь показать, как человек путем физических опытов открыл целый мир мельчайших частиц, который мы не можем увидеть, и как много это открытие дало тому миру, что мы видим вокруг.

Происхождение атомизма

Понятие *атомизма* (так можно назвать теорию о том, что вся материя состоит из атомов) впервые ввели древние греки, основываясь в своих суждениях не на результатах опытов, а на философских выводах.

Наглядно подтвердить верность теории атомизма невозможно, так как для человека практически любое вещество является единым целым: мы ведь видим лист бумаги или каплю воды, а не частицы, из которых они состоят.

Но это еще ни о чем не говорит. Песок на пляже издали тоже кажется единым целым, и только на очень близком расстоянии видны мелкие кристаллики, из которых он состоит. А ведь и бумага, и вода тоже могут состоять из частиц настолько малых, что их просто невозможно увидеть.

Проверить это можно следующим способом. Например, если бы мы не видели, что песок состоит из мелких частиц, то можно было бы взять в руку горсть песка, затем разделить ее на две равные части, затем каждую получившуюся часть разделить еще на две и т. д. В конце концов останется самая маленькая доля, состоящая из одной песчинки, которую уже нельзя будет разделить. То есть суть атомизма в том, что вещество нельзя делить до бесконечности, в какой-то момент останутся лишь неделимые (по крайней мере, неделимые тем же способом) частицы.

Что касается бумаги и воды, то микрочастицы, из которых состоят эти вещества, слишком малы для человеческого глаза. Как правило, человек не может увидеть или ощутить мельчайшие частицы большинства веществ. Как же тогда люди открыли само существование микрочастиц? Только лишь силой разума?

Все началось в IV веке до н. э. с парадоксов Зенона. Зенон говорил, что с помощью разума можно прийти к заключениям, которые пойдут вразрез со здравым смыслом. Выход в подобной ситуации один: надо искать ошибку либо в умозаключениях, либо в мировосприятии. Самый знаменитый парадокс Зенона называется «Ахиллес и черепаха».

Представьте, что древнегреческий герой Ахиллес, прославившийся своим умением быстро бегать, бежит в десять раз

быстрее, чем черепаха. Черепаха получает фору в 100 метров, и забег начинается. Пока Ахиллес бежит 100 метров, черепаха пройдет 10 метров, когда Ахиллес пробежит эти 10 метров, черепаха продвинется еще на 1 метр, пока Ахиллес пробежит 1 метр, черепаха уйдет на $\frac{1}{10}$ метра и т. д. То есть если мыслить так же, как Зенон, то получается, что Ахиллес никогда черепахе не догонит: та всегда будет впереди, пусть и с очень небольшим отрывом. Однако мы понимаем, что он не только ее догонит, но и перегонит.

Современная математика дает объяснение этому парадоксу. Дело в том, что расстояние, на которое черепаха опережает Ахиллеса, стремится к пределу. Внутри предела может быть сколь угодно метров, но их общая сумма вполне конечна. Так, в случае Ахиллеса и черепахи общая сумма равна 111 и $\frac{1}{9}$ метра. То есть, как только Ахиллес пробежит 111 и $\frac{1}{9}$ метра, он догонит черепахе и начнет ее обгонять.

Однако греки ничего не знали о математических пределах, поэтому им пришлось искать другие пути соотнесения аргументов Зенона с правдой жизни. Зенон, например, делил расстояние между черепахой и Ахиллесом на все более и более мелкие части, не отдавая себе отчета в том, что в конце концов останется столь малая часть, что ее уже нельзя будет разделить.

Возможно, именно так и устроено мироздание. Возможно, существуют какие-то мельчайшие неделимые частицы. Если принять идею о том, что нельзя делить до бесконечности, то парадоксы Зенона, основанные на бесконечном делении на все более и более мелкие части, просто исчезнут.

Возможно, подобные умозаключения и привели некоторых греческих философов к идее о том, что вся Вселенная состоит из невидимых микрочастиц. Наиболее знаменитый из этих философов — Демокрит, работавший над своей теорией приблизительно в 430 году до н. э. Он назвал эти мельчайшие частицы «атомос», от греческого «atomos» («невидимый»), откуда и произошло современное слово «атом».

Демокрит продолжил развивать свои идеи и пришел к ряду довольно современных выводов, однако все они были построены исключительно на умозаключениях. Он ничем не мог подтвердить свою теорию, просто «так должно быть».

Другие греческие философы того времени, напротив, говорили «такого быть не может» и приводили свои доводы. В целом большинство философов Греции отрицали теорию атомизма, и взгляды Демокрита были похоронены. Именно по этой причине работы Демокрита практически не переписывались, и ни одна из его многотомных работ не дошла до наших дней. Все знания о

Демокрите мы почерпнули из работ других философов, но поскольку почти все они отвергали его теорию, то отзывались о его взглядах весьма пренебрежительно.

Тем не менее идеи Демокрита все же выжили. Эпикур (341—270 гг. до н. э.), начавший преподавать в Афинах в 306 году до н. э., включил атомизм Демокрита в собственную систему философских взглядов. Правда, хотя работа Эпикура и имела солидное влияние на других философов в течение нескольких последующих веков, его работы тоже не дошли до нашего времени.

К счастью, работы одного философа-«эпикурейца» все же сохранились. Римский поэт Лукреций (96—55 гг. до н. э.) написал длинное стихотворение «О природе вещей», где описал Вселенную с точки зрения атомизма. Сохранилась лишь одна копия этого произведения, которая в XV веке стала одним из первых печатных произведений античных классиков.

Таким образом, идеи эпикурейцев дошли до современной науки, и французский философ Пьер Гассенди (1592—1655) адаптировал эпикурейские взгляды Лукреция и поспособствовал популяризации доктрины атомизма.

Английский ученый Роберт Бойль (1627—1691) был одним из тех, на кого оказали сильное влияние идеи Гассенди, и именно он вывел атомизм на новую ступень развития, подкрепив идеи и домыслы опытами и наблюдениями.

Химические элементы

Р. Бойль изучал воздух и выяснил, что его можно сжимать и расширять (см. ч. I). Другими словами, можно менять объем воздуха, а его масса при этом остается неизменной. Если бы вещество было неделимо, тогда это было бы просто невозможно: когда мы растягиваем резиновый жгут, то его длина увеличивается, однако уменьшается его толщина, следовательно, объем не меняется.

Воздух больше похож на губку: ее можно сжать или, наоборот, растянуть — при этом сильно изменится объем губки, а вес останется неизменным. Пример с губкой можно объяснить наличием огромного количества пустот с воздухом внутри ее. Когда мы сжимаем губку, воздух выходит из этих полостей и губка уменьшается в размерах, а когда мы ее растягиваем, то воздух, наоборот, заходит внутрь.

Возможно, подобные полости есть в самом воздухе, и когда мы сжимаем или расширяем воздух, то сжимаются и расширяются именно эти полости. Можно представить, что воздух со-

стоит из myriad мельчайших частиц, разделенных пустотой. Во время сжатия эти частицы подвигаются ближе друг к другу, а во время расширения, наоборот, удаляются друг от друга. Таким образом, объем будет меняться, а масса, которая зависит от количества частиц, а не от расстояния между ними, останется неизменной. Другие свойства газов также удобнее объяснять с атомистической точки зрения.

Конечно же с точки зрения атомизма можно рассматривать не только газы, но и твердые вещества и жидкости, так как последние путем нагревания легко превращаются в газ и пар. Таким образом, кипящая вода, да и вода при нормальной температуре превращается в пар -- газ, плотность которого намного меньше плотности воды. С помощью конденсации пар снова можно превратить в воду. Объяснить это можно тем, что вода также состоит из атомов, но эти атомы расположены очень близко друг к другу, а поскольку для сжатия воды нужно давление гораздо большее, чем для сжатия газов, то, возможно, атомы еще и тесно между собой связаны. Когда жидкость испаряется, эти связи между молекулами разрушаются, а при конденсации они вновь восстанавливаются.

Но даже после столь подробных объяснений наука не приняла теорию атомизма, ведь она касалась микроскопических объектов, которые невозможно было обнаружить ни одним прибором того времени.

Окончательному же становлению атомизма способствовало появление все новых и новых химических доказательств. Рассказ об этом я начну с объяснения, что такое *элемент*.

Первыми о природе фундаментальной субстанции или субстанций (или элементов), из которых состоит все во Вселенной, заговорили древние греки. Их умозаключения не были основаны на реальных химических опытах, поэтому, по сути, являлись лишь догадками, но поскольку древние греки были людьми весьма умными, то и их догадки были весьма разумны.

Аристотель (384—322 гг. до н. э.) суммировал труды греческих философов в этой области, создав список четырех основных элементов мира: земля, вода, воздух и огонь, и пятый элемент, из которого состоят небеса, — эфир (см. ч. I). Если вместо названий стихий использовать родственные слова «твердый», «жидкий», «газообразный» и «энергия», то становится ясно, что в догадках действительно есть доля разумного.

Греческая идея четырех стихий просуществовала две тысячи лет, однако в 1600 году благодаря работам Галилео Галилея (1564—1642) ученые стали больше внимания уделять экспериментам, а не просто идеям. Элемент, или стихию, нужно путем

экспериментов определить как нечто способное или неспособное делать что-либо, а не как просто что-то существующее, то есть дать определение, как мы говорим сейчас, с практической точки зрения.

В 1661 году Роберт Бойль написал книгу под названием «Химик-скептик», где он объяснил суть элемента. Если все мироздание действительно состоит из элементов, то каждый элемент должен являться простейшей, неделимой субстанцией, и тогда элемент нельзя создать из еще более мелких субстанций. Если же субстанцию можно разбить на еще более мелкие субстанции, то это уже не элемент.

Землю можно легко разделить на более простые субстанции, значит, земля — не элемент. Век спустя вода и воздух были разделены на еще более мелкие частицы, значит, вода и воздух — тоже не элементы. Что касается четвертой стихии, то химики пришли к выводу, что огонь — это вообще одна из форм энергии, значит, он не принадлежит к элементам.

После Бойля химики еще долгое время вообще не могли ничего утверждать об элементах, так как опасались, что совершенствующаяся техника экспериментов могла разделить казавшиеся ранее неделимыми субстанции.

Взять, к примеру, известь. В XVIII веке известь считалась элементом, так как ни одна химическая реакция не могла разложить ее на составляющие. Однако у химиков возникло предположение, что известь состоит из какого-то металла и кислорода. И лишь в 1808 году английскому химику Гемфри Дэви (1778—1829) удалось разложить известь и выявить новый элемент — *кальций* (так по-латыни называется известь). Ученый применил для этого электрический ток — новую для того времени технологию.

Для более легкого обозначения химических элементов шведский химик Йёнс Якоб Берцелиус (1779—1848) ввел в 1814 году для каждого элемента свой *химический символ*. Естественно, проще всего было использовать для этого первую и (как правило) вторую букву латинского названия элемента. Благодаря столь логичному подходу новые обозначения легко запоминаются и после некоторой тренировки не вызывают никаких затруднений при чтении.

В XIX веке химия ушла далеко вперед в изучении природы элементов, и уже в начале этого века ученые довольно точно знали, что является элементом, а что не элемент. О том, как им удалось этого достичь, я расскажу чуть позже, а пока привожу список субстанций, которые ныне считаются химическими элементами (табл. 1).

Современная атомистическая теория

Конечно же далеко не все встречающиеся в природе вещества являются химическими элементами. Большинство субстанций состоят из двух и более элементов, причем не просто смешанных, а связанных так, что конечное вещество обладает собственными, как правило, уникальными свойствами, не имеющими ничего общего со свойствами образующих его элементов. Такие вещества, между элементами которых существует химическая связь, называются химическими соединениями.

В конце XVIII века химики стали изучать не только качества продуктов реакции. Уже было недостаточно просто записать, что «выделился газ» или «появился осадок такого-то цвета». Химики стали взвешивать количество используемых и выделившихся в процессе реакции веществ.

Самый известный химик этой «новой волны» — французский ученый Антуан Лоран Лавуазье (1743—1794). Это его называют «отцом современной химии». К 1789 году у Лавуазье накопилось достаточно опытных данных, чтобы заключить, что в закрытой системе (т. е. когда в процессе химической реакции не поступают вещества извне, а продукты реакции не покидают систему) общая масса исходных веществ равна общей массе получаемых. Этот закон получил название «закон сохранения вещества», или «закон сохранения массы».

Дальше нужно было измерить каждый элемент в составе химического соединения. Важный шаг вперед в этом направлении сделал французский химик Жозеф Луи Пруст (1754—1826). Он работал, к примеру, с неким соединением (теперь мы называем его дигидрокарбонатом меди, состоящим из трех элементов: меди, углерода и кислорода). Сначала Пруст взял образец чистого дигидрокарбоната меди, разложил его на эти три элемента и взвесил каждый из них. Он обнаружил, что все три элемента в составе вещества всегда находятся в одной и той же пропорции: 5 частей меди (по весу), 4 части кислорода и 1 часть углерода. То есть во всех образцах элементы складывались только в этой пропорции, и никак иначе.

Пруст обнаружил, что и в других соединениях элементы также находятся в определенных пропорциях, и в 1797 году он объявил о своем открытии, получившем название «закон Пруста», или «закон постоянства состава».

Именно благодаря закону постоянства состава ученые путем умозаключений исключительно химического толка вывели концепцию атомизма. Предположим, что медь состоит из

крошечных атомов меди, кислород — из атомов кислорода, углерод — из атомов углерода, а дигидрокарбонат меди образуется путем соединения одного атома меди, одного атома кислорода и одного атома углерода (на практике это немного не так, но ведь мы просто пытаемся следовать логике атомистов). Несколько связанных между собой атомов называются *молекулой* («малая масса» по-латыни). То есть представьте, что дигидрокарбонат меди состоит из множества молекул, в каждой из которых по одному атому меди, кислорода и углерода.

Теперь если предположить, что атом меди в пять раз тяжелее атома углерода, а атом кислорода в четыре раза тяжелее атома углерода, то получается, что так как дигидрокарбонат меди содержит 5 частей (по массе) меди, 4 части кислорода и 1 часть углерода, то, чтобы получить 5,1 части меди и

Таблица 1

ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЯ

| | | | |
|------------|----|-------------|----|
| Актиний | Ac | Европий | Eu |
| Алюминий | Al | Фермий | Fm |
| Америций | Am | Фтор | F |
| Сурьма | Sb | Франций | Fr |
| Аргон | Ar | Гадолиний | Gd |
| Мышьяк | As | Галлий | Ga |
| Астатин | At | Германий | Ge |
| Барий | Ba | Золото | Au |
| Беркелий | Bk | Гафний | Hf |
| Бериллий | Be | Гелий | He |
| Висмут | Bi | Гольмий | Ho |
| Бор | B | Водород | H |
| Бром | Br | Индий | In |
| Кадмий | Cd | Йод | I |
| Кальций | Ca | Иридий | Ir |
| Калифорний | Cf | Железо | Fe |
| Углерод | C | Криптон | Kr |
| Церий | Ce | Лантан | La |
| Цезий | Cs | Лауренций | Lw |
| Хлор | Cl | Свинец | Pb |
| Хром | Cr | Литий | Li |
| Кобальт | Co | Лютеций | Lu |
| Медь | Cu | Магний | Mg |
| Кюрий | Cm | Марганец | Mn |
| Диспрозий | Dy | Менделеевий | Md |
| Эйнштейний | Es | Ртуть | Hg |
| Эрбий | Er | Молибден | Mo |

3,9 части кислорода к одной части углерода, нужно будет делить атом.

Но такого никогда не происходит. Химические элементы соединяются только в строгой пропорции. Таким образом, закон Пруста доказывает не только то, что атомы существуют, но и то, что, как и говорил Демокрит еще полторы тысячи лет назад, они невидимы.

Английский химик Джон Дальтон (1766—1844) был одним из первых, кто не только принял, но и развил теорию атомизма. Опираясь на закон Пруста и подобные обобщения, он создал современную атомистическую теорию (слово «современная» используется, чтобы не путать ее с оригинальной теорией Демокрита).

Конечно же Дальтон ушел в своих изысканиях намного дальше, чем Демокрит. Он не ограничился лишь заявлением о том,

| | | | |
|----------------------|----|----------|----|
| Неодим | Nd | Скандий | Sc |
| Неон | Ne | Селен | Se |
| Нептуний | Np | Кремний | Si |
| Никель | Ni | Серебро | Ag |
| Никобий | Nb | Натрий | Na |
| Азот | N | Стронций | Sr |
| Нобелий ¹ | No | Сера | S |
| Осмий | Os | Тантал | Ta |
| Кислород | O | Технеций | Tc |
| Палладий | Pd | Теллур | Te |
| Фосфор | P | Тербий | Tb |
| Платина | Pt | Таллий | Tl |
| Плутоний | Pu | Торий | Th |
| Полоний | Po | Тулий | Tm |
| Калий | K | Олово | Sn |
| Прозеродий | Pg | Титан | Ti |
| Прометий | Pm | Вольфрам | W |
| Протактиний | Pa | Уран | U |
| Радий | Ra | Ванадий | V |
| Радон | Rn | Ксенон | Xe |
| Рений | Re | Иттербий | Yb |
| Родий | Rh | Иттрий | Y |
| Рубидий | Rb | Цинк | Zn |
| Рутений | Ru | Цирконий | Zr |
| Самарий | Sm | Рутений | Ru |

¹ Название пока не зарегистрировано.

что атомы существуют. Из закона Пруста Дальтон вывел следующее:

- 1) каждый химический элемент состоит из нескольких атомов, масса которых постоянна и одинакова;
- 2) разные элементы состоят из разных по массе атомов;
- 3) химические соединения состоят из молекул, образованных несколькими атомами¹.

Закон постоянства состава позволяет сделать выводы об относительной массе атомов разных веществ, то есть об *атомном весе*².

Например, вода состоит из водорода и кислорода, и на одну часть водорода (по массе) приходится восемь частей кислорода. Дальтон полагал, что в формировании связи принимает участие минимально возможное количество атомов и что в молекуле воды содержится по одному атому водорода и кислорода. Значит, по мнению Дальтона, атом кислорода в восемь раз тяжелее атома водорода.

Судить таким образом о реальной массе кислорода или водорода нельзя, однако сдаваться тоже не следует. Дальтон принял за единицу веса массу атома водорода, так как имел основания полагать, что атом водорода самый легкий (и здесь он оказался прав), и принял массу атома водорода равной 1. Получается, что если вес водорода равен 1, то вес кислорода равен 8.

Здесь я должен сделать поправку. Как раз когда Дальтон работал над своей теорией, ученым удалось с помощью электрического тока разложить воду на водород и кислород. И оказалось, что на каждый литр полученного кислорода приходится два литра водорода, то есть соотношение по объему кислорода и водорода в воде 1:2. На основе этого вскоре было доказано, что в одной молекуле воды содержится один атом кислорода и два атома водорода (Дальтон, однако, так с этим и не согласился).

¹ Как только ученые смогли более глубоко изучить структуру веществ, оказалось, что все эти утверждения не верны. Однако к тем веществам, с которыми в основном работали ученые в XIX веке, эти утверждения вполне применимы. Утверждения Дальтона — это «первое приближение», именно благодаря им исследователи пошли по верному пути и, собрав достаточно информации, сделали правильные выводы. В научном мире далеко не всегда важно быть абсолютно правым, да и не всегда понятно, кто прав, а кто нет. Важно быть правым для своего времени, и Дальтон для своего времени был прав.

² Не следует забывать, что вес — это не то же самое, что масса (см. ч. I), и в данном случае корректнее было бы говорить об «атомной массе», а не об «атомном весе». Однако, как это часто случается, неверное обозначение прочно вошло в научную литературу и стало настолько известным, что стало невозможно его изменить. Как ни прискорбно, но с этим придется смириться.

Молекулу можно представить в виде *химической формулы*, где каждый атом каждого химического элемента имеет соответствующий химический символ. То есть, по Дальтону, формула воды будет выглядеть как H_2O . Если же в молекуле содержится более одного атома элемента, то их количество обозначается цифрой. Сейчас считается, что молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, и формула выглядит как H_2O .

Изменились выводы, но не результаты научных экспериментов. Вода по-прежнему состоит из одной части (по весу) водорода и 8 частей кислорода. Однако, учитывая новый взгляд на состав молекулы воды, один атом кислорода должен по весу быть в 8 раз тяжелее двух атомов водорода и соответственно в 16 раз тяжелее одного атома водорода. Таким образом, если принять вес атома водорода за 1, то атомный вес кислорода будет равен 16.

По этой же системе можно вычислить относительный вес остальных элементов. Скажем, для получения углекислоты необходимы 3 части углерода и 8 частей кислорода (по весу). Молекула углекислоты содержит один атом углерода и два атома кислорода (CO_2). Это значит, что вес атома углерода — это $\frac{1}{8}$ веса двух атомов кислорода. Атомный вес кислорода равняется 16, значит, у двух атомов кислорода атомный вес 32. $\frac{1}{2}$ от 32 будет 12, значит, относительный вес одного атома углерода — 12.

Одна молекула циана (C_2N_2) содержит 6 частей углерода и 7 частей азота. Атомный вес двух атомов углерода 24, значит, вес двух атомов азота будет $\frac{7}{6}$ от 24, то есть 28. А атомный вес одного атома азота равняется 14.

Получается, что атомный вес атома любого элемента — целое число, в чем и был глубоко убежден Дальтон. Однако последующие исследования других химиков, например Берцелиуса, показали, что атомный вес некоторых элементов — дробное число. Например, атомный вес хлора равен приблизительно 35,5, а атомный вес магния — 24,3.

На самом деле если провести более точные измерения, то почти все целые числа атомных весов окажутся также дробными. Например, соотношение кислорода и водорода в воде не 8 к 1, а 7,94 к 1. Значит, если приравнять вес одного атома водорода к 1, то атомный вес кислорода будет 15,88.

Кислород легко соединяется с другими элементами. Из всех известных 19 химических элементов кислород реагировал практически со всеми. Именно это свойство — *химическая активность* — кислорода позволило ученым узнать относитель-

ный вес атомов всех остальных элементов, а использование дробного числа вместо целого привело бы к абсолютно ненужным сложным математическим расчетам. Поэтому ученые решили приравнять атомный вес кислорода к 16,0000, то есть получилось, что атомный вес водорода — 1,008.

Это удовлетворило химиков вплоть до 1920 года. Именно тогда ученые узнали кое-что новое об атомах (см. гл. 8), и число 16,0000 перестало отвечать их требованиям. Однако это число настолько прочно осело в литературе и головах ученых, что его практически невозможно было оттуда выбить. Впрочем, в 1961 году была создана новая система, где изменения были настолько малы, что большинство их приняло. В 1961 году за атомный вес кислорода было принято число 15,9994.

Из 103 известных химических элементов 83 широко представлены на поверхности земли. Все эти элементы приведены в табл. 2, где они расположены по возрастанию атомного веса. Рядом даны атомные веса этих элементов по системе, принятой в 1961 году. А об оставшихся двадцати мы поговорим в одной из следующих глав.

Периодическая таблица

В середине XIX века существовали два определения элемента. Первое — элемент не может быть разбит на два или несколько более простых субстанций (определение Бойля) и второе — элемент состоит из атомов с определенным атомным весом (определение Дальтона). Впрочем, все элементы удовлетворяли и первому и второму определению. Тем не менее определенные сомнения все-таки были, слишком уж много было химических элементов (в 1860 году было известно уже более 60 элементов).

Эти элементы обладали самыми различными свойствами: здесь были и газы, и жидкости, больше всего было твердых веществ; были и неметаллы, и легкие металлы, и тяжелые металлы, и полуметаллы; некоторые из них обладали высокой степенью активности, остальные средней, а какие-то были инертны; некоторые имели цвет, а некоторые были бесцветны.

Все это очень разочаровывало ученых. Конечно же ученые должны принимать мир таким, какой он есть, однако еще древние греки посеяли в их головах идею того, что все в природе организовано довольно просто. И если что-то на первый взгляд кажется очень сложным, то ученые пытаются найти какой-то скрытый и относительно простой порядок.

Таблица 2

АТОМНЫЕ ВЕСА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

| | | | |
|----------|----------|-----------|----------|
| Водород | 1,00797 | Рутений | 101,07 |
| Гелий | 4,0026 | Родий | 102,905 |
| Литий | 6,939 | Палладий | 105,4 |
| Бериллий | 9,0122 | Серебро | 107,870 |
| Бор | 10,811 | Кадмий | 112,40 |
| Углерод | 12,01115 | Индий | 114,82 |
| Азот | 14,0067 | Олово | 118,69 |
| Кислород | 15,9994 | Сурьма | 121,75 |
| Фтор | 18,9984 | Йод | 126,9044 |
| Неон | 20,183 | Теллур | 127,60 |
| Натрий | 22,9898 | Ксенон | 131,30 |
| Магний | 24,312 | Цезий | 132,905 |
| Алюминий | 26,9815 | Барий | 137,34 |
| Кремний | 28,086 | Лантан | 138,91 |
| Фосфор | 30,9738 | Церий | 140,12 |
| Сера | 32,064 | Празеодим | 140,907 |
| Хлор | 35,453 | Неодим | 144,24 |
| Калий | 39,102 | Самарий | 150,35 |
| Аргон | 39,948 | Европий | 151,96 |
| Кальций | 40,08 | Гадолиний | 157,25 |
| Скандий | 44,956 | Тербий | 158,924 |
| Титан | 47,90 | Диспрозий | 162,50 |
| Ванадий | 50,942 | Гольмий | 164,930 |
| Хром | 51,996 | Эрбий | 167,26 |
| Марганец | 54,9380 | Тулий | 168,934 |
| Железо | 55,847 | Иттербий | 173,04 |
| Никель | 58,71 | Лютеций | 174,97 |
| Кобальт | 58,9332 | Гафний | 178,49 |
| Медь | 63,54 | Тантал | 180,948 |
| Цинк | 65,37 | Вольфрам | 183,85 |
| Галлий | 69,72 | Рений | 186,2 |
| Германий | 72,59 | Осмий | 190,2 |
| Мышьяк | 74,9216 | Иридий | 192,2 |
| Селен | 78,96 | Платина | 195,09 |
| Бром | 79,909 | Золото | 196,967 |
| Криптон | 83,80 | Ртуть | 200,59 |
| Рубидий | 85,47 | Таллий | 204,37 |
| Стронций | 87,62 | Свинец | 207,19 |
| Иттрий | 88,905 | Висмут | 208,980 |
| Цирконий | 91,22 | Торий | 232,038 |
| Ниобий | 92,906 | Уран | 238,03 |
| Молибден | 95,94 | | |

В середине XIX века предпринимались попытки найти такой порядок среди химических элементов. Элементов становилось все больше, их атомные веса измерялись все с большей точностью, и ученым показалось логично занести элементы в таблицу в порядке увеличения их атомных весов (как в табл. 3) и посмотреть, что же из этого получится.

Таблица 3

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 Hydrogen (H) 1.008 | | | | | | | | | | |
| 3 Lithium (Li) 6.939 | 4 Beryllium (Be) 9.012 | | | | | | | | | |
| 11 Sodium (Na) 22.990 | 12 Magnesium (Mg) 24.312 | | | | | | | | | |
| 19 Potassium (K) 39.102 | 20 Calcium (Ca) 40.08 | 21 Scandium (Sc) 44.956 | 22 Titanium (Ti) 47.88 | 23 Vanadium (V) 50.942 | 24 Chromium (Cr) 51.996 | 25 Manganese (Mn) 54.938 | 26 Iron (Fe) 55.847 | 27 Cobalt (Co) 58.933 | | |
| 37 Rubidium (Rb) 85.47 | 38 Strontium (Sr) 87.62 | 39 Yttrium (Y) 88.905 | 40 Zirconium (Zr) 91.22 | 41 Niobium (Nb) 92.906 | 42 Molybdenum (Mo) 95.94 | 43* Technetium (Tc) 98.91 | 44 Ruthenium (Ru) 101.07 | 45 Rhodium (Rh) 102.905 | | |
| 55 Cesium (Cs) 132.905 | 56 Barium (Ba) 137.34 | 57 Lanthanum (La) 138.91 | 58 Cerium (Ce) 140.12 | 59 Praseodymium (Pr) 140.907 | 60 Neodymium (Nd) 144.24 | 61* Promethium (Pm) 144.91 | 62 Europium (Eu) 151.96 | 63 Gadolinium (Gd) 157.25 | 64 Terbium (Tb) 158.925 | 65 Dysprosium (Dy) 162.50 |
| | | | 72 Hafnium (Hf) 178.49 | 73 Tantalum (Ta) 180.948 | 74 Tungsten (W) 183.85 | 75 Rhenium (Re) 186.2 | 76 Osmium (Os) 192.22 | 77 Iridium (Ir) 192.22 | | |
| 87* Francium (Fr) 223 | 88* Radium (Ra) 226.075 | 89 Actinium (Ac) 227 | 90 Thorium (Th) 232.038 | 91* Protactinium (Pa) 231 | 92* Uranium (U) 238.029 | 93* Neptunium (Np) 237 | 94* Plutonium (Pu) 244 | 95* Americium (Am) 243 | 96* Curium (Cm) 247 | 97* Berkelium (Bk) 247 |
| | | | 104* Rutherfordium (Rf) 261 | 105* Dubnium (Db) 262 | | | | | | |

Было несколько попыток создать такую таблицу, но успехом увенчалась лишь одна. В 1869 году русский химик Дмитрий Иванович Менделеев (1834—1907) расположил все известные на тот момент химические элементы в таблицу по рядам и колонкам так, что элементы со сходными свойствами попадали в одну колонку (или ряд, смотря как расположить таблицу). Свойства

| | | | | | | | | | 2 |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------|
| | | | | | | | | | Helium |
| | | | | | | | | | (He) 4.003 |
| | | | | | | | | | 3 |
| | | | | | | | | | Lithium |
| | | | | | | | | | (Li) 7.000 |
| | | | | | | | | | 4 |
| | | | | | | | | | Boron |
| | | | | | | | | | (B) 10.811 |
| | | | | | | | | | 5 |
| | | | | | | | | | Carbon |
| | | | | | | | | | (C) 12.011 |
| | | | | | | | | | 6 |
| | | | | | | | | | Nitrogen |
| | | | | | | | | | (N) 14.007 |
| | | | | | | | | | 7 |
| | | | | | | | | | Oxygen |
| | | | | | | | | | (O) 15.999 |
| | | | | | | | | | 8 |
| | | | | | | | | | Fluorine |
| | | | | | | | | | (F) 18.998 |
| | | | | | | | | | 9 |
| | | | | | | | | | Neon |
| | | | | | | | | | (Ne) 20.183 |
| | | | | | | | | | 10 |
| | | | | | | | | | Sodium |
| | | | | | | | | | (Na) 22.989 |
| | | | | | | | | | 11 |
| | | | | | | | | | Magnesium |
| | | | | | | | | | (Mg) 24.305 |
| | | | | | | | | | 12 |
| | | | | | | | | | Aluminum |
| | | | | | | | | | (Al) 26.981 |
| | | | | | | | | | 13 |
| | | | | | | | | | Silicon |
| | | | | | | | | | (Si) 28.086 |
| | | | | | | | | | 14 |
| | | | | | | | | | Phosphorus |
| | | | | | | | | | (P) 30.974 |
| | | | | | | | | | 15 |
| | | | | | | | | | Sulfur |
| | | | | | | | | | (S) 32.064 |
| | | | | | | | | | 16 |
| | | | | | | | | | Chlorine |
| | | | | | | | | | (Cl) 35.453 |
| | | | | | | | | | 17 |
| | | | | | | | | | Argon |
| | | | | | | | | | (Ar) 39.948 |
| | | | | | | | | | 18 |
| | | | | | | | | | Potassium |
| | | | | | | | | | (K) 39.098 |
| | | | | | | | | | 19 |
| | | | | | | | | | Calcium |
| | | | | | | | | | (Ca) 40.078 |
| | | | | | | | | | 20 |
| | | | | | | | | | Scandium |
| | | | | | | | | | (Sc) 44.956 |
| | | | | | | | | | 21 |
| | | | | | | | | | Titanium |
| | | | | | | | | | (Ti) 47.88 |
| | | | | | | | | | 22 |
| | | | | | | | | | Vanadium |
| | | | | | | | | | (V) 50.942 |
| | | | | | | | | | 23 |
| | | | | | | | | | Chromium |
| | | | | | | | | | (Cr) 52.004 |
| | | | | | | | | | 24 |
| | | | | | | | | | Manganese |
| | | | | | | | | | (Mn) 54.938 |
| | | | | | | | | | 25 |
| | | | | | | | | | Iron |
| | | | | | | | | | (Fe) 55.847 |
| | | | | | | | | | 26 |
| | | | | | | | | | Cobalt |
| | | | | | | | | | (Co) 58.933 |
| | | | | | | | | | 27 |
| | | | | | | | | | Nickel |
| | | | | | | | | | (Ni) 58.71 |
| | | | | | | | | | 28 |
| | | | | | | | | | Copper |
| | | | | | | | | | (Cu) 63.546 |
| | | | | | | | | | 29 |
| | | | | | | | | | Zinc |
| | | | | | | | | | (Zn) 65.37 |
| | | | | | | | | | 30 |
| | | | | | | | | | Gallium |
| | | | | | | | | | (Ga) 69.723 |
| | | | | | | | | | 31 |
| | | | | | | | | | Germanium |
| | | | | | | | | | (Ge) 72.59 |
| | | | | | | | | | 32 |
| | | | | | | | | | Arsenic |
| | | | | | | | | | (As) 74.922 |
| | | | | | | | | | 33 |
| | | | | | | | | | Selenium |
| | | | | | | | | | (Se) 78.96 |
| | | | | | | | | | 34 |
| | | | | | | | | | Bromine |
| | | | | | | | | | (Br) 79.904 |
| | | | | | | | | | 35 |
| | | | | | | | | | Krypton |
| | | | | | | | | | (Kr) 83.80 |
| | | | | | | | | | 36 |
| | | | | | | | | | Rubidium |
| | | | | | | | | | (Rb) 85.468 |
| | | | | | | | | | 37 |
| | | | | | | | | | Strontium |
| | | | | | | | | | (Sr) 87.62 |
| | | | | | | | | | 38 |
| | | | | | | | | | Yttrium |
| | | | | | | | | | (Y) 88.906 |
| | | | | | | | | | 39 |
| | | | | | | | | | Zirconium |
| | | | | | | | | | (Zr) 91.224 |
| | | | | | | | | | 40 |
| | | | | | | | | | Niobium |
| | | | | | | | | | (Nb) 92.906 |
| | | | | | | | | | 41 |
| | | | | | | | | | Molybdenum |
| | | | | | | | | | (Mo) 95.94 |
| | | | | | | | | | 42 |
| | | | | | | | | | Rhodium |
| | | | | | | | | | (Rh) 101.07 |
| | | | | | | | | | 43 |
| | | | | | | | | | Palladium |
| | | | | | | | | | (Pd) 106.37 |
| | | | | | | | | | 44 |
| | | | | | | | | | Silver |
| | | | | | | | | | (Ag) 107.87 |
| | | | | | | | | | 45 |
| | | | | | | | | | Cadmium |
| | | | | | | | | | (Cd) 112.40 |
| | | | | | | | | | 46 |
| | | | | | | | | | Indium |
| | | | | | | | | | (In) 114.82 |
| | | | | | | | | | 47 |
| | | | | | | | | | Tin |
| | | | | | | | | | (Sn) 118.69 |
| | | | | | | | | | 48 |
| | | | | | | | | | Antimony |
| | | | | | | | | | (Sb) 121.75 |
| | | | | | | | | | 49 |
| | | | | | | | | | Tellurium |
| | | | | | | | | | (Te) 127.60 |
| | | | | | | | | | 50 |
| | | | | | | | | | Iodine |
| | | | | | | | | | (I) 126.904 |
| | | | | | | | | | 51 |
| | | | | | | | | | Xenon |
| | | | | | | | | | (Xe) 131.29 |
| | | | | | | | | | 52 |
| | | | | | | | | | Cesium |
| | | | | | | | | | (Cs) 132.91 |
| | | | | | | | | | 53 |
| | | | | | | | | | Barium |
| | | | | | | | | | (Ba) 137.33 |
| | | | | | | | | | 54 |
| | | | | | | | | | Lanthanum |
| | | | | | | | | | (La) 138.905 |
| | | | | | | | | | 55 |
| | | | | | | | | | Cerium |
| | | | | | | | | | (Ce) 140.12 |
| | | | | | | | | | 56 |
| | | | | | | | | | Praseodymium |
| | | | | | | | | | (Pr) 140.908 |
| | | | | | | | | | 57 |
| | | | | | | | | | Neodymium |
| | | | | | | | | | (Nd) 144.24 |
| | | | | | | | | | 58 |
| | | | | | | | | | Europium |
| | | | | | | | | | (Eu) 151.964 |
| | | | | | | | | | 59 |
| | | | | | | | | | Gadolinium |
| | | | | | | | | | (Gd) 157.25 |
| | | | | | | | | | 60 |
| | | | | | | | | | Terbium |
| | | | | | | | | | (Tb) 158.925 |
| | | | | | | | | | 61 |
| | | | | | | | | | Dysprosium |
| | | | | | | | | | (Dy) 162.50 |
| | | | | | | | | | 62 |
| | | | | | | | | | Ho |
| | | | | | | | | | (Ho) 164.930 |
| | | | | | | | | | 63 |
| | | | | | | | | | Er |
| | | | | | | | | | (Er) 167.26 |
| | | | | | | | | | 64 |
| | | | | | | | | | Thulium |
| | | | | | | | | | (Tm) 168.934 |
| | | | | | | | | | 65 |
| | | | | | | | | | Ytterbium |
| | | | | | | | | | (Yb) 173.04 |
| | | | | | | | | | 66 |
| | | | | | | | | | Lutetium |
| | | | | | | | | | (Lu) 174.967 |
| | | | | | | | | | 67 |
| | | | | | | | | | Hafnium |
| | | | | | | | | | (Hf) 178.49 |
| | | | | | | | | | 68 |
| | | | | | | | | | Tantalum |
| | | | | | | | | | (Ta) 180.948 |
| | | | | | | | | | 69 |
| | | | | | | | | | Tungsten |
| | | | | | | | | | (W) 183.84 |
| | | | | | | | | | 70 |
| | | | | | | | | | Rhenium |
| | | | | | | | | | (Re) 186.207 |
| | | | | | | | | | 71 |
| | | | | | | | | | Osmium |
| | | | | | | | | | (Os) 190.23 |
| | | | | | | | | | 72 |
| | | | | | | | | | Iridium |
| | | | | | | | | | (Ir) 192.22 |
| | | | | | | | | | 73 |
| | | | | | | | | | Platinum |
| | | | | | | | | | (Pt) 195.084 |
| | | | | | | | | | 74 |
| | | | | | | | | | Gold |
| | | | | | | | | | (Au) 196.967 |
| | | | | | | | | | 75 |
| | | | | | | | | | Mercury |
| | | | | | | | | | (Hg) 200.59 |
| | | | | | | | | | 76 |
| | | | | | | | | | Thallium |
| | | | | | | | | | (Tl) 204.37 |
| | | | | | | | | | 77 |
| | | | | | | | | | Lead |
| | | | | | | | | | (Pb) 207.19 |
| | | | | | | | | | 78 |
| | | | | | | | | | Bismuth |
| | | | | | | | | | (Bi) 208.98 |
| | | | | | | | | | 79 |
| | | | | | | | | | Polonium |
| | | | | | | | | | (Po) 209 |
| | | | | | | | | | 80 |
| | | | | | | | | | Astatine |
| | | | | | | | | | (At) 210 |
| | | | | | | | | | 81 |
| | | | | | | | | | Radium |
| | | | | | | | | | (Ra) 226 |
| | | | | | | | | | 82 |
| | | | | | | | | | Actinium |
| | | | | | | | | | (Ac) 227 |
| | | | | | | | | | 83 |
| | | | | | | | | | Francium |
| | | | | | | | | | (Fr) 223 |
| | | | | | | | | | 84 |
| | | | | | | | | | Radium A |
| | | | | | | | | | (RaA) 225 |
| | | | | | | | | | 85 |
| | | | | | | | | | Radium B |
| | | | | | | | | | (RaB) 228 |
| | | | | | | | | | 86 |
| | | | | | | | | | Radium C |
| | | | | | | | | | (RaC) 226 |
| | | | | | | | | | 87 |
| | | | | | | | | | Radium D |
| | | | | | | | | | (RaD) 228 |
| | | | | | | | | | 88 |
| | | | | | | | | | Actinium A |
| | | | | | | | | | (AcA) 227 |
| | | | | | | | | | 89 |
| | | | | | | | | | Actinium B |
| | | | | | | | | | (AcB) 227 |
| | | | | | | | | | 90 |
| | | | | | | | | | Thorium |
| | | | | | | | | | (Th) 232 |
| | | | | | | | | | 91 |
| | | | | | | | | | Protactinium |
| | | | | | | | | | (Pa) 231 |
| | | | | | | | | | 92 |
| | | | | | | | | | Uranium |
| | | | | | | | | | (U) 238 |
| | | | | | | | | | 93 |
| | | | | | | | | | Neptunium |
| | | | | | | | | | (Np) 237 |
| | | | | | | | | | 94 |
| | | | | | | | | | Plutonium |
| | | | | | | | | | (Pu) 244 |
| | | | | | | | | | 95 |
| | | | | | | | | | Americium |
| | | | | | | | | | (Am) 243 |
| | | | | | | | | | 96 |
| | | | | | | | | | Curium |
| | | | | | | | | | (Cm) 247 |
| | | | | | | | | | 97 |
| | | | | | | | | | Berkelium |
| | | | | | | | | | (Bk) 247 |
| | | | | | | | | | 98 |
| | | | | | | | | | Californium |
| | | | | | | | | | (Cf) 251 |
| | | | | | | | | | 99 |
| | | | | | | | | | Einsteinium |
| | | | | | | | | | (Es) 252 |
| | | | | | | | | | 100 |
| | | | | | | | | | Fermium |
| | | | | | | | | | (Fm) 257 |
| | | | | | | | | | 101 |
| | | | | | | | | | Mendelevium |
| | | | | | | | | | (Md) 258 |
| | | | | | | | | | 102 |
| | | | | | | | | | Nobelium |
| | | | | | | | | | (No) 259 |
| | | | | | | | | | 103 |
| | | | | | | | | | Lawrencium |
| | | | | | | | | | (Lr) 260 |

элементов одной колонки повторялись с определенной периодичностью, поэтому таблица получила название *периодическая*.

Сложности возникли из-за того, что науке были известны далеко не все химические элементы. Когда Менделеев заносил элементы в колонки своей таблицы согласно их свойствам, ему пришлось оставлять пустые клетки. В 1871 году он объявил, что в этих клетках должны быть еще неоткрытые элементы, и, приводя средние значения элементов сверху и снизу пустой клетки, довольно точно предсказал свойства неизвестных элементов.

В течение 15 лет были открыты все три обозначенных Менделеевым элемента, и их свойства в точности совпадали с его предсказаниями. В результате в 1880 году периодическая таблица Менделеева была принята в качестве путеводаителя по неизведанному миру химических элементов, и до сих пор от нее никто не собирается отказываться. Открытия более поздних лет (см. гл. 4) лишь один раз подтвердили верность периодической системы. Д.И. Менделеев пришел к своему открытию эмпирическим путем, то есть стало понятно, что периодическая таблица верна и работает, но никто не знал, почему она работает. Ответ был найден в XX веке.

Таблица 3 и есть общепринятая современная периодическая система. Элементы расположены в порядке возрастания атомного веса (есть, правда, три исключения, которые я поясню чуть ниже), и каждый элемент имеет свой порядковый номер — от 1 до 103. Значение этого «атомного номера» мы обсудим чуть ниже.

Сравнивая табл. 3 и табл. 2, можно заметить следующее. Для того чтобы поместить все элементы в нужные ряды, придется поставить три элемента не по порядку. У элемента 18 (аргон) порядковый номер ниже, чем у элемента 19 (калий), несмотря на то что атомный вес у аргона больше. Точно так же у элемента 27 (кобальт) атомный вес больше, чем у элемента 28 (никель), и у элемента 52 (теллур) атомный вес выше, чем у элемента 53 (йод). Поскольку разница в весе очень мала, то ученые в XIX веке не обращали особого внимания на несколько незначительных исключений из общего правила. Однако ученые XX века выяснили, что эти исключения крайне важны (см. ниже).

В периодической системе есть несколько семейств тесно между собой связанных и обладающих схожими свойствами элементов. Например, элементы 2, 10, 18, 36, 54 и 86 (гелий, неон, аргон, криптон, ксенон и радон) являются *инертными газами*. Своё название эти газы получили из-за того, что практически не реагируют с другими веществами. До 1962 года ученые были уверены, что эти газы вообще не вступают в химические реакции. Однако в 1962 году стало ясно, что по крайней мере три из них — криптон, ксенон и радон — могут вступать в реакцию с фтором.

Элементы 9, 17, 35, 53 и 85 (фтор, хлор, бром, йод и астатин) являются галогенами (что в переводе с греческого означает «образующий соль»). Эти активные неметаллы свое название получили потому, что при реакции хлора с натрием образуется обыкновенная поваренная соль, а при реакции остальных элементов этой группы с натрием также образуются вещества, очень похожие на соль.

Элементы 3, 11, 19, 37, 55 и 87 (литий, натрий, калий, рубидий, цезий и франций) — мягкие, легкоплавкие и очень активные *щелочные металлы*. Слово «щелочь» по-арабски значит «пепел». Именно из пепла некоторых растений люди получили соду (углекислый натрий) и поташ (углекислый калий). Впоследствии Дэви выделил из них два первых щелочных металла — натрий и калий.

Элементы 4, 12, 20, 38, 56 и 88 (бериллий, магний, кальций, стронций, барий и радий) являются более твердыми, тугоплавкими и менее активными, чем щелочные металлы. Это *щелочноземельные металлы*. Название «земельные» они получили потому, что их оксиды не растворяются в воде и являются тугоплавкими. Однако оксиды двух из них — известь и жженая магнезия — обладали некоторыми свойствами соды и поташа, поэтому их называли «щелочноземельными». Из извести и жженой магнезии Дэви выделил два первых щелочноземельных металла — кальций и магний.

Элементы 57—71 — семейство очень схожих по свойствам *редкоземельных металлов*, теперь их называют *лантаноидами* по названию первого элемента этой группы (лантан). Элементы 89—103 — это *актиниды*, по названию первого элемента группы (актиний).

Есть и другие семейства элементов, но названные выше наиболее широко известны, и очень часто их называют по имени группы.

Существование атомов

Теперь, когда у нас есть атомный вес, довольно просто понять, что называется *молекулярным весом*. Молекулярный вес — это сумма атомных весов всех атомов в молекуле. Давайте начнем, сложим, с кислорода (атомный вес 16) и водорода (атомный вес 1)¹.

¹ В большинстве случаев удобно округлять значение атомного веса до целого или до десятков. Когда нужны более точные измерения, используются более точные цифры.

Химические опыты показывают, что при нормальных условиях атомарный кислород и водород практически не встречаются в природе, а наоборот, два атома стремятся соединиться друг с другом, чтобы образовать устойчивую молекулу. Молекулы газов кислорода и водорода состоят из двух атомов. Таким образом, химические формулы этих газов выглядят как O_2 и H_2 . Если нижний индекс отсутствует, значит, речь идет об отдельных атомах кислорода и водорода. Получается, что молекулярный вес молекулы кислорода — 32, а водорода — 2.

Озон состоит из 3 атомов кислорода, значит, его молекулярная масса равна 48. Молекулярная масса воды (H_2O) равна 18, а так как мы знаем, что атомный вес углерода 12, то молекулярная масса молекулы углекислоты (CO_2) равна 44.

Удобно использовать количество вещества в граммах, равное его молекулярному весу. Например, удобно использовать 2 грамма водорода, 32 грамма кислорода, 18 граммов воды или 44 грамма углекислоты. Это называется *грамм-молекулярным весом*, или *моль*. То есть масса одного моля углекислоты равна 44 граммам, а одного моля озона — 48 граммам.

Впрочем, иногда встречаются вещества, состоящие из одного атома, например инертные газы гелий и аргон. Некоторые твердые элементы, такие как углерод и натрий, для удобства принимаются за одноатомные. Это уже называется *грамм-атомным весом*. Атомный вес гелий равняется 4, а натрия — 23, значит, их грамм-атомный вес 4 и 23 грамма соответственно. Как правило, моль подразумевает и грамм-молекулярный, и грамм-атомный вес.

Впервые об удобстве использования моля заговорил в 1811 году итальянский химик Амедео Авогадро (1776—1856). Его гипотеза получила название *гипотезы Авогадро*. В современной интерпретации она звучит так: равные объемы любых газов при одинаковой температуре и давлении содержат равное количество молекул.

Впоследствии гипотеза Авогадро подтвердилась.

Объем одного моля водорода (2 грамма) при нормальном давлении и температуре $0^\circ C$ равен приблизительно 22,4 литра. Один моль кислорода (32 грамма) в 16 раз тяжелее одного моля водорода, но и каждая молекула кислорода в 16 раз тяжелее одной молекулы водорода. Значит, в одном моле кислорода содержится столько же молекул, сколько и в одном моле водорода. По гипотезе Авогадро, 32 грамма кислорода занимают такой же объем (22,4 литра), как и один моль водорода. Так и есть. Это правило верно и для других газов.

Короче говоря, один моль любого газа занимает один и тот же объем. Число молекул в одном моле любого газа называется числом *Авогадро*.

Один и тот же объем занимает один моль только лишь у газов. Однако гипотеза Авогадро нашла куда более широкое применение. В одном моле любого твердого, жидкого и газообразного вещества содержится одно и то же число молекул — число Авогадро. (Когда речь идет об одноатомных веществах, таких как гелий, то это число молекул в общем-то содержится в одном грамм-атоме, а не в одном моле, ну да это детали.)

Если бы только химики знали точное значение числа Авогадро, то они смогли бы раз и навсегда определить массу одной молекулы и лишней раз подтвердить существование атомов. А пока к атомам относились как к невидимым для глаза частичкам, которые просто удобно использовать для объяснения химических реакций. Но если определить точную массу одной молекулы, посчитать точное количество молекул в стакане воды или в грамме железа, тогда уже никто не усомнится в существовании атомов.

К несчастью, только полвека спустя ученые смогли выяснить значение числа Авогадро, да и то лишь приблизительно. До этого химики могли утверждать лишь то, что оно очень велико.

Все произошло в 1865 году. Шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) совместно с австрийским физиком Людвигом Больцманом выявил свойства газов на основе математического анализа беспорядочного движения атомов и молекул газа (см. ч. I). С помощью формул, разработанных Максвеллом и Больцманом, можно было хотя бы приблизительно подсчитать число молекул. По расчетам немецкого химика Лошмида, число Авогадро равнялось приблизительно 600 миллиардам триллионов молекул. Действительно, немало.

Более точные расчеты были проведены в XX веке. Оказалось, что Лошмидт был недалек от истины: принятое в наше время значение числа Авогадро равняется 602 300 000 000 000 000 000, или $6,023 \times 10^{23}$.

Если один моль кислорода весит 32 грамма и содержит $6,023 \times 10^{23}$ молекул, то масса одной молекулы кислорода будет равна $32/6,023 \times 10^{23}$, или примерно $5,3 \times 10^{22}$ г. Но так как одна молекула кислорода состоит из двух атомов, то масса одного атома равна примерно $2,65 \times 10^{22}$ г. Зная массу одного атома кислорода, по атомному весу остальных элементов таблицы можно вычислить массу их атомов.

Например, атомный вес водорода равен $1/16$ атомного веса кислорода, значит, масса одного атома водорода должна быть равна $1/16$ массы атома кислорода. Сегодня за массу одного ато-

Более тяжелые молекулы гелия реже сбиваются с курса при столкновениях с молекулами газа, и изображение получается гораздо более четкое. Такой микроскоп называется *цоллиым*. На экране видно, что атомы кончика иглы идеально круглые и находятся в определенном порядке. В микроскопе можно применять лишь некоторые легкоплавкие металлы, но, тем не менее, он делает атомы «видимыми», то есть доказывает их существование. Несколько таких фотографий атомов уже стали классикой науки.

Глава 2 ИОНЫ И ИЗЛУЧЕНИЕ

Электролиз

Итак, известны 103 элемента и соответственно 103 разных атома. Достаточно причин для беспокойства. Конечно, периодическая таблица приводит все эти элементы в определенный порядок, но, может быть, существует и какой-то другой порядок?

Почему элементов так много? Почему незначительная разница в массе атомов приводит к столь большим различиям свойств веществ? Например, разница между атомным весом аргона (39,9) и калия (39,1) небольшая, однако первый — очень инертный газ, а второй — весьма активный металл.

Чтобы понять это, нужно изучить сам атом. Быть может, у атомов тоже есть структура и именно она объясняет их свойства.

Первые попытки изучить атом были предприняты еще в 1816 году английским физиком Уильямом Праутом (1785—1850). В то время атомная теория была еще очень молодой, и ученым были известны лишь атомные веса элементов и масса атомов некоторых элементов, крайне приблизительно определенная Дальтоном. Все атомные веса являлись кратными целыми атомному весу водорода (1).

Для Праута это не было просто совпадением. Если массы атомов всех элементов были кратны массе атома водорода, то не логично ли, что атомы более тяжелых элементов состоят из атомов водорода? Например, атомный вес водорода 16, так, может быть, атом кислорода состоит из 16 тесно между собой связанных атомов водорода?

Праут опубликовал свою теорию анонимно, но вскоре выяснилось, что он был автором работы, и она получила название *гипотезы Праута*.

Столетие спустя многие химики произвели точные расчеты атомных весов элементов, в том числе и для того, чтобы проверить, являются ли они кратными целыми атомного веса водорода. Оказалось, что нет. Как я писал выше, атомный вес кислорода не в 16, а в 15,88 раза больше атомного веса водорода. Атомный вес никеля в 58,24 раза больше атомного веса водорода и т. д.

Гипотеза Прута несколько раз опровергалась, однако все равно не давала покоя химикам, так как атомные веса более чем у половины элементов оказались очень близкими к целым числам. Это не могло быть просто совпадением, это должно было иметь какое-то значение.

Значение было, и в конце концов его удалось определить с помощью электрического тока¹.

В 1807—1808 годах Гемфри Дэви удалось получить несколько элементов (натрий, калий, кальций, магний, стронций и барий), пропуская электричество через химические соединения, молекулы которых содержат атомы этих веществ. Работу продолжил английский химик Майкл Фарадей (1791—1867), который в молодости был ассистентом и протеже Дэви.

Представьте себе два металлических стрежня, подключенных к разным полюсам электрической батареи. Эти стержни получили название *электроды* (от греч., означает «путь электричества»). Фарадей назвал электрод, подключенный к плюсу, *катодом* («верхний путь»), а к минусу — *анодом* (нижний путь). (В те времена считалось, что электричество течет от плюса к минусу, как вода, сверху вниз.)

Если электроды соединить, то по ним потечет электричество. Однако если между электродами находится воздух, то цепь разрывается и электричество не течет. Если же оба электрода погрузить в жидкость, то электричество может течь, а может и не течь в зависимости от того, что это за жидкость. Например, раствор серной кислоты или хлорида натрия пропускают электричество, т. е. является проводником, *электролитом*, а дистиллированная вода или раствор сахара — не пропускают, т. е. являются изоляторами, или *неэлектролитами*.

Прохождение электричества через электролит сопровождается химическими реакциями. Как правило, это реакции распада некоторых молекул раствора на химические элементы (*электролиз*). Именно с помощью электролиза Дэви удалось выделить из химических соединений отдельные металлы.

¹ Электричество более подробно описано во II части.

Элементы скапливаются возле электродов, газы тут же улетучиваются, а металлы «прилипают» к электродам (*гальванопластика*).

Элементы образуются и возле анода, и возле катода. Если электричество проходит через раствор серной кислоты, то водород скапливается возле катода, а кислород — возле анода. Когда электричество проходит через раствор хлорида натрия, то натрий образуется возле катода, а газообразный хлор — возле анода.

Фарадей не знал, как именно атомы распространяются внутри электролита. Некоторые называли такие атомы «дрейфующими», однако атомистическая теория тогда все еще была в новинку, и Фарадей относился к ней с недоверием, поэтому назвал их *ионами* (что в переводе с греческого означает «бродяга»), ничего не говоря об их природе.

Те ионы, что образуются у катода (например, ионы натрия и водорода) называются *катионами*, а те, что образуются возле анода (ионы кислорода и хлора), получили названия *анионы*.

Фарадей тщательно измерил массу элементов, образующихся под действием электрического тока, и в 1832—1833 годах написал работу, которая впоследствии получила название *законы электролиза Фарадея*.

Первый закон электролиза гласит: масса элементов, образующихся в результате электролиза, прямо пропорциональна количеству пропускаемого через электролит электричества. Единицей количества электричества в системе МКС является 1 кулон (см. ч. II). Если пропустить заряд в 1 кулон через серебросодержащее химическое соединение, то образуется 0,001118 г серебра. Согласно первому закону Фарадея, под действием заряда в два кулона образуется $0,001118 \times 2$ г серебра, а под действием заряда в X кулон — $0,001118 \times X$ г.

Один грамм-атом серебра равняется 107,87 г серебра. Какое количество электричества необходимо для получения 107,87 г серебра? Составляем уравнение $0,001118 \times X = 107,87$. Решением уравнения является $X = 96,5$ кулона, или 1 фарадей. 1 фарадей — это количество электричества, необходимое для получения 1 грамм-атома серебра из серебросодержащего химического соединения.

Перед тем как перейти ко второму закону Фарадея, необходимо понять, что такое *эквивалентная масса*.

Молекула хлористого водорода (HCl) состоит из одного атома хлора и одного атома водорода, и, чтобы получить один грамм-атом хлористого водорода, необходимо соединить один грамм-атом хлора (35,5 г) и один грамм-атом водорода (1 г). Точно так

же из одного грамм-атома натрия (23 г) и одного грамм-атома хлора получается один грамм-атом хлорида натрия (NaCl).

Однако один грамм-атом хлорида кальция (CaCl_2) получается из одного грамм-атома хлора и лишь половины грамм-атома кальция. Это происходит потому, что один атом кальция присоединяет два атома хлора, а для реакции нужна лишь половина атома кальция. Один грамм-атом кальция равен 40 г, то есть половина грамм-атома кальция равна 20 г. Значит, эквивалентная масса кальция по отношению к хлору (как и к водороду и натрию) при образовании химических соединений равна 20 г (впрочем, обычно эквивалентная масса берется по отношению к водороду).

Или, например, для образования одного грамм-атома хлорида магния (MgCl_2) необходимо соединить один грамм-атом хлора с половиной грамм-атома магния, а для получения одного грамм-атома хлорида алюминия (AlCl_3) необходимы один грамм-атом хлора и одна треть грамм-атома алюминия, значит, эквивалентной массой магния будет 12 г, т. е. атомный вес магния (24), разделенный на два, а алюминия — 9 г (27 разделить на 3).

Итак, в упрощенном виде второй закон Фарадея звучит так: если пропустить заряд в 1 фарадей через химическое соединение, то получаемые элементы будут иметь массу, равную их эквивалентной массе.

Под действием заряда в 1 фарадей образуется 108 г серебра, или 23 г натрия, или 35,5 г хлора, или 1 г водорода (т. е. масса образовавшихся элементов будет равна их атомному весу), или же 20 г кальция и 12 г магния (т. е. масса равна половине атомного веса элемента), или 9 г алюминия (треть атомного веса).

Электрические частицы

Изучив законы электролиза, ученые задались вопросом: а вдруг электричество, как и любое вещество, тоже состоит из частиц?

Давайте представим, что эти частицы действительно существуют, причем существуют они в двух вариантах: положительно заряженные частицы, которые притягиваются к отрицательно заряженному катоду, и отрицательно заряженные, притягивающиеся к положительно заряженному аноду. (Разноименные заряды притягиваются — см. ч. II). Эти заряды можно обозначить как «+» и «-». Так, заряды со знаком «+» переносят атомы водорода и натрия к катоду, а со знаком «-» — атомы кислорода и хлора к аноду.

Итак, если атом водорода переносится к катоду положительными заряженными частицами, то такой атом можно обозначить H^+ . То есть Фарадей назвал бы его *ионом водорода*. Точно так же можно обозначить ион натрия — Na^+ , а ион калия — K^+ . Все эти ионы являются *положительными заряженными* (т. е. *катионами*).

Можно сказать, что 1 фарадей содержит равное числу Авогадро количество электрических частиц. Если одна частица переносит один атом, то электрический заряд в 1 фарадей перенесет к катоду равное числу Авогадро количество атомов водорода, то есть один грамм-атом. Точно так же под действием заряда в 1 фарадей на электроде образуется один грамм-атом натрия, или один грамм-атом серебра.

Так как под действием заряда в 1 фарадей всегда образуется один грамм-атом вещества, то вполне логично было предположить, что частица, переносящая один атом вещества, является мельчайшей.

Так как атомы хлора образуются возле анода — электрода с положительным зарядом, то их должны переносить отрицательно заряженные частицы. *Ион хлора* обозначается как Cl^- . Под действием заряда в 1 фарадей образуется один грамм-атом хлора, значит, количество и размер этих отрицательно заряженных частиц равны количеству и размеру положительно заряженных.

А как тогда быть с кальцием? Ведь под действием заряда в 1 фарадей образуется лишь половина грамм-атома кальция. Самый простым объяснением будет то, что для переноски одного атома кальция необходимы два катиона. То есть заряд в 1 фарадей перенесет в два раза меньше ионов кальция, чем, скажем, ионов натрия. Поэтому *ион кальция* обозначается как Ca^{++} , *ион магния* — Mg^{++} , *ион бария* — Ba^{++} , а *ион алюминия* — Al^{+++} и т. д.

Первым, кто предположил, что на самом деле ионы Фарадея — это всего лишь положительно или отрицательно заряженные атомы, стал шведский химик Сванте Август Аррениус (1859—1927). В своих взглядах он опирался не только на работы Фарадея, но и на наблюдения других химиков.

По Аррениусу, под действием электричества молекула расплавленного хлорида натрия ($NaCl$) распадается не на атомы, а на заряженные ионы натрия (Cl^-) и хлора (Na^+). Затем ионы натрия устремляются к катоду, а хлора — к аноду. (Эта теория получила название *теория диссоциации Аррениуса*.)¹ У катода и

¹ Как выяснилось позже, Аррениус ошибался, полагая, что ионы образуются под влиянием электричества. Например, атомы хлорида натрия постоянно существуют в форме ионов. Тем не менее Аррениус, как и Дальтон, был прав для своего времени.

анода ионы разряжаются и образуются незаряженные атомы: натрий у катода и газообразный хлор у анода.

Как правильно предположил Аррениус, заряженные атомы совсем не обязательно должны обладать теми же свойствами, что и незаряженные. Например, атомы натрия бурно реагируют с водой, а ионы натрия — не реагируют. Атомы хлора образуют молекулы хлора и улетучиваются, а ионы хлора — не улетучиваются.

Из исследования Аррениуса вытекало, что отдельные атомы и их группы могут нести электрический заряд. Например, хлорид аммония (NH_4Cl) распадается на NH_4^+ и Cl^- — *ионы аммония*, нитрат натрия (NaNO_3) распадается на Na^+ и NO_3^- — ионы нитрата. Такие, состоящие из нескольких атомов, ионы называются *сложными (составными)*. Сложными ионами являются, например, гидроксил (OH^-), сульфат (SO_4^{--}), карбонат (CO_3^{--}), фосфат (PO_4^{--}).

Идея невидимой электрической частицы стала настолько популярной, что в своей работе, опубликованной в 1881 году, ирландский физик Джордж Джонстон Стоуни (1826—1911) назвал ее *электроном*.

Оглядываясь на прошлое, теория Аррениуса кажется вполне логичной, однако приняли ее далеко не сразу. Прошло несколько сот лет, прежде чем ученые убедились в существовании невидимых и бесструктурных атомов, о которых говорил еще Демокрит, а уж о том, чтобы поверить в то, что они еще и несут электрический заряд, без доказательств не могло быть и речи.

Доказательства появились лишь через несколько лет после смерти Аррениуса, но первые правильные шаги в этом направлении были сделаны еще при его жизни и даже раньше.

Основной сложностью при обнаружении электрических частиц являлось то, что, если даже электроны и существуют, они легко могут затеряться среди других, более крупных частиц на пути электричества.

Становилось ясно, что если пропустить электрический заряд через вакуум, то будет возможно увидеть «неприкрытые» электроны. Первым, кто в 1838 году пропустил электричество через вакуум, был сам Фарадей. Однако его наблюдения были не очень точными, так как в вакууме присутствовали посторонние частицы.

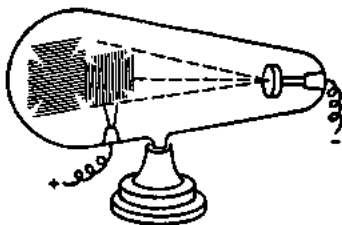
В 1854 году немецкий стеклодув Генрих Гейслер (1814—1879) изобрел гораздо более совершенный способ получения вакуума и изготовил *гейслеровы трубы* с этим «чистым» вакуумом. Немецкий физик Юлиус Плюкер (1801—1868) применял подобные гейслеровы трубы, куда были вплавлены электроды.

Пропуская заряд через вакуум, Плюкер заметил, что вокруг катода появляется зеленоватое свечение. Независимо от того, из какого металла были изготовлены электроды, свечение всегда было зеленым. На швэг не влияли и остатки газов, так или иначе присутствовавших в вакууме. Значит, это свечение было исключительно свойством электрического заряда, а не химических элементов.

Плюкер также выяснил, что если к трубе поднести магнит, то свечение отталкивается от одного его полюса и притягивается к другому. Это тоже указывало на электрическую природу свечения, так как электричество и магнетизм очень тесно взаимосвязаны (см. ч. II).

Вскоре стало очевидным, что феномен не только возникает лишь возле катода, но и что-то перемещается от анода к катоду, причем по прямой. Когда анод помещали в другое место внутри трубки, это «что-то» не попадало в него, удалялось от стекла, и в месте удара возникало зеленое свечение.

Два исследователя, немецкий физик Иоганн Вильгельм Гитторф (1824—1914) и английский физик Уильям Крукс (1832—1919), независимо друг от друга показали, что если в такую трубку поместить какой-либо объект, то на стекле появится его тень. Гитторф опубликовал свою работу первым — в 1869 году.



Круксова труба

Стало ясно, что физики столкнулись с какой-то формой излучения, распространяющегося по прямой и отбрасывающего четкие тени. Немецкий физик Эуген Гольдштейн (1850—1930), посвятивший всю свою жизнь изучению лишь этого излучения, в 1876 году назвал его *катодными лучами*. Большинство ученых приняли это наименование.

Тут возник спор о природе этого излучения. С одной стороны, катодные лучи всегда распространялись по прямой, а значит, не были подвержены силе притяжения. Но с другой стороны, излучение можно было легко отклонить с помощью магнита, в то время как световые лучи (или любое другое световое излучение) не отклоняются магнитом.

Одним из предположений было то, что катодные лучи являлись электрически заряженными частицами — «атомами электричества», поэтому на них и влияло магнитное поле. А сила гравитации на них не действовала, вернее, действовала, но очень незначительно из-за их крайне малого веса.

Спектр излучения

Спорщики разделились чуть ли не по национальному признаку: большинство немецких физиков утверждали, что эти излучения являются волной, а английские физики уверяли, что это поток заряженных частиц.

Впрочем, такое разделение было вполне обоснованно, так как именно в Германии в конце XIX века были обнаружены новые виды волн, несмотря на то что первое такое открытие было сделано англичанином Джеймсом Клерком Максвеллом.

Изучая феномен электрического и магнитного излучения, Максвелл пришел к выводу, что благодаря тесной связи между двумя явлениями можно говорить о электромагнетизме. В дальнейшем он выявил, что переменный электрический заряд приводит к появлению волнообразного электромагнитного излучения, распространяющегося со скоростью света. А раз скорость распространения такого излучения равняется огромной скорости распространения света, то получается, что сам свет является всего лишь частным случаем электромагнитного излучения.

Но если Максвелл прав, то человек, изменяя частоту переменного тока, может сам вызывать различные электромагнитные излучения. Для получения света необходим квадрильон колебаний в секунду. На практике невозможно достичь такой частоты, однако, согласно Максвеллу, теоретически никаких ограничений не существовало. Например, колебания электрического тока довольно низкой частоты — 1000 раз в секунду — порождают 1000 электромагнитных волн в секунду. Если цуг волн распространяется со скоростью 300 000 километров в секунду, то каждая волна будет иметь длину 300 километров (что значительно превышает длину световой волны), но тем не менее существовать такие волны будут.

Первые попытки генерировать длинноволновое излучение были предприняты в 1997 году немецким физиком Генрихом Рудольфом Герцем (1857—1894). Он создал электромагнитную цепь, где сквозь небольшой воздушный промежуток проходила электрическая искра, которая и являлась тем вызывающим излучение переменным зарядом, о котором говорит Максвелл. Чтобы обнаружить, существует излучение или нет, Герц использовал специальный «приемник» — маленький прямоугольный кусок проволоки с небольшим разрывом на одной из сторон. Электромагнитное излучение, проходящее сквозь проволоку, должно было вызывать в ней электрический ток, под действием которого в воздушном промежутке должна была появиться электрическая искра.

И она появилась. Герц знал, что он обнаружил предсказанное Максвеллом электромагнитное излучение и тем самым доказал его теорию. Сначала излучение назвали волнами Герца, однако впоследствии его стали называть *радиоволнами* («волны, которые излучают»).

Открытие радиоволн показало физикам, насколько широк спектр электромагнитного излучения. Длина волны видимого спектра колеблется от 380 до 760 миллимикрон, т. е. одна октава. (Один миллимикрон — это миллиардная часть метра, а длина волны внутри одной октавы удваивается.)

В 1800 году немецкий астроном Уильям Гершель (1738—1822) открыл волны за пределами видимого спектра. Он изучал спектр солнечного света с помощью термометра и обнаружил, что наиболее сильно термометр нагревается лучами, находящимися ниже красного спектра. Гершель абсолютно верно заключил, что человеческий глаз не в состоянии увидеть весь спектр солнечного света.

Вначале лучи, столь быстро поднимающие столбик термометра, получили название «тепловые», но затем ученые стали использовать более научный термин *инфракрасное излучение* (т. е. «выше красного»). С развитием волновой теории света (см. ч. II) стало ясно, что волны этого излучения длиннее, чем волны видимого света.

Сегодня за нижнюю границу инфракрасного спектра принята точка в 760 миллимикрон, а за верхнюю — произвольная точка в 3 000 000 миллимикрон. Впрочем, для инфракрасного излучения удобнее пользоваться еще одной счетной единицей — микроном ($\mu\text{к} = 1000$ миллимикрон). Таким образом, границами спектра инфракрасного излучения являются 0,76 и 3000 микрон, т. е. около 12 октав.

Далее начинаются уже *радиоволны*. Сразу за отметкой в 3000 мк начинаются ставшие «известными» в последние годы *микроволны*

(«микро» — означает «среди радиоволн»), их спектр — от 3000 до 300 000 мк. Здесь уже удобнее пользоваться миллиметрами (в миллиметре — 1000 микрон). То есть спектр микроволн — от 3 до 300 мм (30 см).

За микроволнами начинаются уже «настоящие» радиоволны. Верхней границы у радиоволн нет. Можно генерировать радиоволны все более и более высокой частоты, пока уровень их энергии не станет настолько низким, что их просто нельзя будет обнаружить современными средствами. (Чем больше длина волны, тем меньше ее энергия. См. «Квантовая теория», ч. П.) В технике используются радиоволны длиной до 30 000 000 мм, то есть можно сказать, что спектр полезного радиоволнового излучения — от 300 до 30 000 000 мм (или 0,3—30 000 м).

Длина электромагнитных волн выходит и за пределы фиолетовой части видимого спектра. Впервые это обнаружил немецкий физик Иоганн Вильгельм Риттер (1776—1810) в 1801 году. Он занимался изучением влияния света на нитрат серебра. Нитрат серебра белого цвета, однако под влиянием света из него высвобождаются частицы серебра черного цвета, вследствие чего сам нитрат приобретает сероватый оттенок. Эффект наиболее ярко выражен в тех участках, куда попадают короткие световые волны. (Впрочем, для современных ученых это вовсе не удивительно, так как известно, что короткие волны передают больше энергии, соответственно энергопотребляющая реакция протекает интенсивнее.) Риттер также обнаружил, что реакция идет еще быстрее под действием невидимого излучения, спектр которого лежит ниже фиолетовой части видимого спектра.

Как и Гершель, Риттер сделал вывод о том, что существует невидимое излучение, которое, вследствие своего действия на нитрат серебра, сначала получило название «химические лучи», но потом все чаще и чаще его стали называть *ультрафиолетовым* («ниже фиолетового»). Позже ученые определили, что длина волн у этого излучения была короче, чем у видимого света.

Сегодня любое излучение называется ультрафиолетовым, если длина его волны колеблется от 360 до 1 миллимикрона (чуть более 8 октав). Как выяснилось в 1890-х годах, общая длина электромагнитного спектра от ультрафиолетового излучения до радиоволн составляет 44 октавы, из которых лишь одна является спектром видимого света.

Тем не менее в электромагнитном спектре еще оставались «белые пятна». Следующий шаг на пути изучения электромагнитных волн сделал немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген (1845—1923). Он занимался изучением катодных лучей, и в

частности свечения, которое возникало под воздействием этих лучей на определенные химические соединения.

Это свечение очень слабое, поэтому для наблюдения за ним Рентген затемнил комнату и поместил трубку в коробку из тонкого картона черного цвета. 5 ноября 1895 года ученый заметил в комнате свет, исходящий не из коробки с трубкой. На некотором расстоянии от прибора находился листок бумаги, покрытый цианоплатинитом бария (веществом, которое под действием электромагнитного излучения светится). Если бы трубка не была полностью закрыта картоном, то ученый вряд ли бы уделил свечению бумаги особое внимание.

Рентген выключил трубку, и свечение прекратилось. Он снова включил аппарат, и бумага вновь начала светиться. Тогда он занавесил окна в соседней комнате и положил листок туда. При включенной трубке листок продолжал светиться.

Рентген решил, что катодная трубка испускала какие-то лучи, которые ударялись о картон, и при столкновении этих лучей с твердым материалом их кинетическая энергия преобразовывалась в новую форму излучения. Это излучение было настолько сильным, что могло проникать сквозь толстую бумагу и даже сквозь тонкие листы металла. Свой первый отчет об этом Рентген опубликовал 28 декабря 1895 года.

Это излучение называют рентгеновским, по имени открывателя, однако сам Рентген называл его X-лучами (X — знак неизвестности в математике, а Рентген ничего не знал о природе этого излучения). Хотя сегодня природа лучей, открытых Рентгеном, не представляет никакой загадки, определенного названия они так и не получили. (В русском языке используются наименования «рентгеновы лучи», «рентгеновские лучи» и «рентгеновское излучение». — *Пер.*)

Я так подробно описываю опыты Рентгена, потому что открытие рентгеновского излучения ознаменовало начало второй научной революции (первая началась с экспериментов Галилея — см. ч. 1).

В принципе такое название слишком драматично, поскольку опыты Рентгена не привели к перелому в ходе развития науки. Многие физики того времени занимались изучением катодного излучения, а Крукс и Герц обнаружили новое излучение даже раньше, чем Рентген, хотя и не смогли правильно оценить значение своего открытия, так что открытие рентгеновского излучения были лишь делом времени. Если бы его не открыл Рентген, то открыл бы еще кто-нибудь, может быть, даже в течение нескольких недель. Более того, существование рентгеновского излучения подразумевалось еще в теории Макс-

велла. Восемью годами ранее были обнаружены радиоволны, и именно это важное открытие подтвердило верность теории Максвелла.

Тем не менее оба ученых приступили к изучению рентгеновского излучения с огромным энтузиазмом, способность рентгеновских лучей проникать сквозь материю просто заворожала их. 23 января 1896 года Рентген во время лекции сделал рентгеновский снимок руки добровольца — немецкого биолога Рудольфа Альберта фон Кёлликера (1817—1905). На снимке были четко видны кости, поскольку они, в отличие от плоти и крови, задерживали рентгеновские лучи. То есть там, где была плоть, рентгеновские лучи засвечивали пленку, расположенную под рукой, а там, где были кости, — нет. Поэтому на снимки кости были белыми, а все остальное — серым.

Полезьа рентгеновского излучения для медицины и стоматологии была очевидна. В этих областях рентгеновские лучи используются и по сей день. (О том, что эти лучи вызывают рак, ученые узнали лишь спустя несколько лет.) За открытием последовала целая волна экспериментов, с помощью которых человек смог лучше понять природу и Вселенную. Это действительно стало настоящей научной революцией.

Глава 3 ЭЛЕКТРОН

Открытие электрона

Так как все известные излучения, включая радиоволны, являлись волнами, ученые предполагали, что и рентгеновские лучи — тоже волны (окончательно это было доказано в 1912 году, см. гл. 4). Значит, и катодные лучи — тоже волны.

С одной стороны, опыты Герца еще в 1892 году показали, что катодные лучи проходят сквозь тонкие листы железа — довольно странное свойство для частиц. Однако открытие рентгеновского излучения несколькими годами позднее подтвердило, что волны действительно обладают подобным свойством. Ассистент Герца, немецкий физик Филипп Ленард (1862—1947), даже построил специальную катодно-лучевую трубку с небольшим «окошком» из тонкого металла. Катодные лучи, ударяясь о металл, проникали сквозь него и вылетали «через окно» наружу. Впоследствии такие лучи стали называть *линаровыми*. (В русской литературе вместо словосочетания «линаровы лучи» используется название «катодные лучи». — *Пер.*)

Но если катодные лучи являются потоком заряженных частиц, то тогда их можно отклонить не только магнитным, но и электростатическим полем. Герц пропустил поток катодных лучей между двумя отрицательно и положительно заряженными пластинками, но не зафиксировал никаких отклонений курса и сделал вывод, что катодные лучи являются волнами.

Это стало пиком развития теории волн. На научной сцене появился еще один экспериментатор — английский физик Джозеф Джон Томсон (1856—1940). Он заявил, что для успешного проведения эксперимента с электростатическим полем его необходимо проводить в вакууме, иначе содержащиеся в воздухе частицы газа не дадут лучам отклониться. В 1897 году Томсон повторил эксперимент Герца, но на этот раз уже с использованием вакуума и обнаружил отклонение лучей.

Это стало последней тростинкой, перевесившей чашу весов. Если катодные лучи отклоняются под воздействием и электростатического, и магнитного полей, значит, эти лучи являются потоком частиц, и, судя по направлению отклонения, они несут отрицательный заряд.

Стало ясно, что это и есть электрические частицы, может быть, те самые невидимые частицы, о которых говорил один из физиков (см. гл. 2). Они вошли в научный мир под именем, которое им дал Стоун, — *электроны*, а 1897 год вошел в историю как год открытия электрона.

Но Томсон не только открыл электрон, но и определил самые важные его свойства.

Под действием магнитного поля прямолинейная траектория движения электрона меняется на криволинейную. (Так, например, Луна под действием гравитационного поля Земли изменяет свое движение с прямолинейного на криволинейное вокруг Земли.)

Траектория движения электрона отклоняется под действием магнитной силы. Величина этой силы прямо пропорциональна силе магнитного поля (H), величине электрического заряда (e) и скорости движения (v) электрона. Именно эта скорость и определяет, сколько линий магнитного поля электрон пересечет. (На электрон в состоянии покоя или двигающийся параллельно этим линиям магнитное поле не действует.) Таким образом, отклоняющая сила равна Hev .

При криволинейной траектории полета электрона на него также действует центробежная сила. Ее величина вычисляется по формуле $m v^2 / r$, где m — масса электрона, v — его скорость, а r — радиус кривой, по которой он перемещается.

При криволинейной траектории движения электрона между силой магнитного поля и центробежной силой существует ба-

ланс. Если же баланса нет, то траектория будет увеличиваться и уменьшаться, пока электрон не найдет траекторию, где силы находятся в равновесии. Для реальной траектории справедлива следующая формула:

$$Hev = \frac{mv^2}{r}. \quad (\text{Уравнение 3.1})$$

Формулу можно упростить и представить в виде:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Hr}. \quad (\text{Уравнение 3.2})$$

Сила магнитного поля известна, радиус кривизны частиц катодного луча можно легко определить по изменению положения светящегося пятна на стенке катодно-лучевой трубки. Теперь осталось лишь определить величину скорости v , чтобы вычислить отношение заряда электрона к его массе e/m .

Подвергнув катодные лучи воздействию и магнитного и электростатического полей одновременно, Томпсону удалось определить скорость движения электрона. Дело в том, что эти поля отклоняют катодный луч в противоположных направлениях и таким образом уравновешивают друг друга. Степень отклонения, возникающего под действием электростатического поля, зависит от силы поля (F) и величины заряда электрона (e) и не зависит от скорости электрона, так как разноименно заряженные частицы притягивают друг друга даже в состоянии покоя.

Таким образом, приравняв действие на электрон одного поля к действию другого, получим:

$$Hev = Fe \quad (\text{Уравнение 3.3})$$

или

$$v = \frac{F}{H}. \quad (\text{Уравнение 3.4})$$

Силы полей ученые определили довольно легко и получили, что v равна приблизительно 30 000 км/с, то есть примерно одной десятой скорости света. Скорость электрона была самой большой скоростью материального объекта из измеренных учеными на тот период, и именно огромная скорость частиц, вылетающих из катодной трубки, объяснила, почему гравитационное поле на катодные лучи практически не действует.

Зная v , Томпсон по формуле 3.2 определил соотношение e/m . Как ни удивительно, но значение e/m электрона оказалось намного больше, чем у иона (ионы ведь тоже заряженные частицы).

Возьмем ионы H^+ , Na^+ и K^+ . Размер заряда у всех трех одинаков, так как для получения одного грамм-атома каждого из этих элементов достаточно тока в 1 фарадей. Но масса иона калия в 39 раз больше, чем водорода, а масса атома натрия в 23 больше массы атома водорода. Если значение e одинаково, то чем меньше m , тем больше значение e/m . Т. е. у H^+ значение e/m будет в 23 раза больше, чем у Na^+ , и в 39 раз больше, чем у K^+ .

Действительно, так как ион водорода — самый легкий из всех известных элементов, то соотношение e/m у него должно быть самое большое. И тем не менее значение соотношения e/m иона водорода (по современным данным) в 1836 раз меньше, чем значение e/m электрона.

Так как ион водорода несет самый маленький электрический заряд, логично предположить, что и электрон несет самый маленький заряд. А раз соотношение e/m у электрона в 1836 раз больше, чем у иона, значит, все дело в массе, то есть масса электрона в 1836 раз меньше, чем масса иона водорода.

Масса атома водорода известна, а масса иона лишь ненамного меньше массы атома, и можно вычислить массу электрона. По современным подсчетам, масса электрона $9,1091 \times 10^{-28}$ г, или 0,00000000000000000000000091091 г.

Получается, что атомы, которые со времен Демокрита считались мельчайшими частицами, по сравнению с электронами являются просто гигантами. Электроны настолько малы, что могут свободно проходить сквозь промежутки между атомами. Только так можно объяснить то, что электроны свободно проникают сквозь тонкие металлические листы, и именно поэтому медные провода легко проводят электрические заряды.

Таким образом, Томпсон открыл не только электроны, но и целый новый мир — мир *субатомных частиц*.

Заряд электрона

Даже имея точные размеры электрона, физики вовсе не сразу смогли определить величину его заряда. Конечно же можно было сказать, что заряд электрона равен заряду иона хлора или же заряду иона водорода, но имеет противоположный знак. Но в начале XX века ученые не знали точной величины заряда ни одного из ионов.

В 1911 году американский физик Роберт Эндрюс Милликен (1868—1953) провел серию экспериментов и сумел определить величину заряда электрона.

Милликен использовал две пластины, расположенные горизонтально на расстоянии в 1,6 см друг от друга в сосуде с пониженным давлением. В верхней пластине, подключенной к положительному полюсу батареи, были проделаны несколько мельчайших отверстий. Над пластинами Милликен распрыснул немного не содержащего эфир масла. Когда капля масла падала на верхнюю пластину, то через отверстие она попадала в промежуток между пластинами. Чтобы каплю было лучше видно, Милликен направлял на нее пучок света с помощью увеличительного стекла.

Под действием гравитации капля медленно падала на нижнюю пластину. Скорость падения зависит от массы капли и сопротивления воздуха (а оно является существенным для столь малого объекта). По формуле английского физика Джорджа Габриэля Стокса (1819—1903) Милликен определил массу капли.

Затем направил на сосуд пучок рентгеновских лучей, под действием которых внутри его образовались ионы (см. гл. 7). Ионы «прилипали» к каплям, и если ион нес положительный заряд, то капля, отталкиваясь от верхней положительно заряженной пластины, устремлялась к нижней со скоростью, большей скорости падения под действием гравитации. Если же ион обладал отрицательным зарядом, то капля, притягиваясь к верхней пластине, летела вверх против силы притяжения.

Изменение скорости падения капли зависело от силы электромагнитного поля и заряда капли. Зная силу поля, Милликен смог вычислить заряд.

Милликен выяснил, что заряд капли зависел от природы и количества адсорбируемых ею ионов. Однако величина всех зарядов сводилась к одному числу, которое можно было принять за минимальный заряд иона, а следовательно, и электрона. Милликену довольно точно удалось рассчитать этот заряд. Принятая сегодня величина минимального заряда электрона равняется $4,80298 \times 10^{-10}$, или 0,000000000480298 электростатических единиц (см. ч. II).

Современная наука утверждает, что любой электрический заряд равен $4,80298 \times 10^{-10}$ электростатических единиц и может быть как положительным, так и отрицательным. Давайте для простоты представим минимальный заряд как e и разделим все частицы на три группы:

1) частицы, заряд которых равен 0, то есть атомы и молекулы;

2) частицы, заряд которых либо равен -1 , либо кратен -1 . Это отрицательно заряженные ионы и конечно же электрон;

3) частицы с зарядом, равным или кратным $+1$, то есть положительно заряженные ионы.

Науке пока не известны частицы с зарядом $+0,5$ или $-1,3$, да и вообще с нецелочисленным зарядом. Возможно, такие частицы и будут открыты в будущем.

Электроника

Открытие электронов и субатомных частиц в целом сильно повлияло на таблицу химических элементов. Но прежде чем говорить об этом, давайте сначала посмотрим, как используется поток электронов в вакууме. (Наука о поведении этих электронов и о механизмах их контроля и управления ими получила название *электроника*.)

В 1883 году американский изобретатель Томас Эдисон (1847—1931) наблюдал за потоком электронов в вакууме при весьма необычных обстоятельствах. Четырьмя годами ранее Эдисон изобрел лампочку и теперь продолжал работу над ее совершенствованием. Первая лампочка состояла из угольной нити накала, помещенной в колбу с откачанным воздухом. (Под действием электрического тока нить накаляется добела и в случае присутствия воздуха тут же перегорает.)

Постепенно на внутренней стороне колбы образовывался темный нагар, и, как полагал Эдисон, это происходило потому, что из нити часть углерода улетучивалась и оседала на стенках. Все это приводило к истончению нити и помутнению стекла, и Эдисон начал принимать «контрмеры». Для начала он попробовал поместить рядом с нитью небольшую металлическую пластинку в надежде, что углерод станет оседать на металле, а не на стекле.

Этого, однако, не произошло, но Эдисон обнаружил странный эффект. Если подключить эту металлическую пластинку к «плюсу» батареи, то по ней начинал течь электрический ток, несмотря на то что пластинка и нить не соприкасались. Если же подключить пластинку к «минусу», то цепь не замыкалась. Эдисон не знал, какую пользу можно извлечь из этого феномена (в русской номенклатуре получил название термоэлектронная эмиссия. — *Пер.*), и поэтому продолжал изучать его дальше.

Как только ученые более глубоко изучили природу катодных лучей, термоэлектронная эмиссия перестала быть загад-

кой. Горячая нить отдает свои электроны, грубо говоря, они «испаряются» с ее поверхности, и вокруг нити образуется небольшое облако из электронов.

Если же рядом поместить пластину, несущую положительный электрический заряд, то электроны начнут к ней притягиваться. Таким образом, электроны передавались от горячей нити к пластине, т. е. образовывалась замкнутая электрическая цепь, а когда пластину подключали к минусу, то отрицательно заряженные электроны от нее отталкивались, и цепь оставалась разомкнутой.

Англичанин Джон Амброс Флеминг (1849—1945), электротехник по профессии, в 1880-х годах консультировал Эдисона и много лет спустя, в 1904 году, вспомнил об эксперименте Эдисона. Предположим, что металлическая пластинка подключена к источнику переменного тока (см. ч. II), то есть заряд пластины будет меняться с положительного на отрицательный 60 раз в секунду (в сети переменного тока 60 Гц), и цепь будет замыкаться только тогда, когда заряд будет положительным.

Таким образом, ток будет течь лишь половину времени, когда цепь замкнута, все остальное время он течь не будет.

Благодаря термоэлектрической эмиссии стало возможным разрывать электрическую цепь простой переменной полярности. Переменный электрический ток, проходя через такую «модернизированную» лампочку, становится постоянным. Конечно, будут присутствовать колебания электрического тока, однако он всегда будет течь лишь в одном направлении. Устройство получило название *выпрямитель электрического тока*.

Флеминг назвал свое устройство «вентилем», по аналогии с обычным водопроводным, так как оно перекрывало поток электрического тока. В США прижилось гораздо менее говорящее название *электровакуумная трубка*. Однако лучшим названием является *диод* («два электрода»), так как углеродная нить и металлическая полоска являются двумя электродами, запаянными в колбу.

Двумя годами позже, в 1906 году, американский изобретатель Ли Де Форест (1873—1961) добавил в трубку еще один электрод, состоящий из нескольких тонких проводков, и получился *триод*. Проводки являются *модулятором*.

С помощью модулятора можно управлять потоком электронов с гораздо большей точностью. Диод может либо открывать, либо закрывать поток, как и его водопроводный аналог. Само наличие модулятора не влияет на работу прибора, так как практически все электроны свободно пролетают сквозь зазоры между проводками, и лишь некоторые электроны останавливаются, столкнувшись непосредственно с самим проводом.

Однако если подключить модулятор к отдельной электрической цепи и пропустить сквозь него небольшой отрицательный заряд, то каждый проводок начнет отталкивать электроны. То есть за счет электрического поля каждый проводок станет, грубо говоря, «толще», заполняя промежутки между проводами, и большинство электронов не смогут долететь до металлической пластины. С увеличением отрицательного заряда модулятора эффект будет лишь усиливаться. И небольшого заряда модулятора достаточно, чтобы полностью разорвать электрическую цепь даже при сравнительно большом заряде пластины, при этом сам «ventиль» будет оставаться открытым.

Этот эффект можно применять для усиления слабых переменных токов. Если цепь со слабым током подключить к модулятору, то лишь небольшие изменения отрицательного потенциала модулятора приведут к большим изменениям напряжения в цепи пластина—нить. Однако эти изменения будут в точности соответствовать изменениям потенциала в цепи модулятора. То есть «сильный» ток по своим характеристикам будет в точности соответствовать «слабому». Так устроен простейший усилитель.

У изобретателей появился способ вместо «рычагов» и «шестеренок» управлять крохотными, практически невесомыми электронами. Раз электроны обладают столь малой массой, значит, они обладают такой же малой инерцией, и поэтому скорость их движения можно изменять за доли секунды. Даже самые быстрые механические устройства не могут сравниться по скорости своей работы со стремительными электронными собратьями.

Радио

Появление диодов, триодов (или электронных ламп) и их более сложных потомков привело к рождению совершенно потрясающего устройства.

Еще Герц, открывший радиоволны, сделал прототип первого передатчика и приемника. Понятно, что если увеличить мощность передатчика и чувствительность приемника, то расстояние между ними можно увеличить до нескольких метров, а то и километров. Следовательно, если передавать радиоволны длинными и короткими вспышками, имитируя азбуку Морзе, то появится новый способ связи. Радиоволны смогут заменить линии телеграфа (см. ч. II).

В результате получится «беспроводной телеграф». Англичане так его и называют, а американцы называют его «радиотелеграф», или просто *радио*.

В 1894 году итальянский радиотехник Гульельмо Маркони (1874—1937), ознакомившись с опытами Герца, сделал радиосвязь реальностью. Радиоволны генерировались по методу Герца, а принимались специальным устройством, когерером. Когерер состоял из емкости с металлической стружкой. Под действием радиоволн когерер начинает проводить электричество, превращая радиоволны в электрический ток.

Маркони усложнил конструкцию приемника и передатчика и в 1895 году смог передать сигнал на 1 км, в 1896 году — на 10, в 1897 году — на 12, а в 1898 году — уже на 20 км. Маркони даже организовал коммерческую компанию по передаче «маркони-грамм».

Здесь возник один парадокс. Радиоволны, как и любая другая форма электромагнитного излучения, передаются только по прямой, а поскольку Земля круглая, то по идее передача радиоволн на большие расстояния просто невозможна.

Маркони заметил, что радиоволны «оггибают» землю. Объяснения этому эффекту коммерсант дать не смог, что не мешало ему вовсе его использовать. 12 декабря 1901 года Маркони удалось послать сигнал через Атлантический океан из юго-западной части Англии на Ньюфаундленд. Эта дата считается датой изобретения радио.

Спустя год два английских ученых — электротехник Артур Эдвин Кеннелли (1861—1939) и физик Оливер Хевисайд (1850—1925), работая независимо друг от друга, смогли дать объяснение описанному выше эффекту. Все дело в том, что в верхних слоях атмосферы существуют зоны с высоким содержанием заряженных частиц. Радиоволны, отражаясь от этих частиц, летят по прямой, отражаются еще раз и так далее; таким образом пересекают Атлантику, а вовсе не «оггибают Землю».

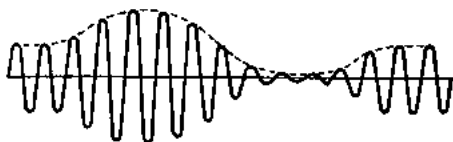
Эти зоны были обнаружены в 1924 году английским физиком Эдуардом Виктором Эпштоном (1892—1965). Они получили название «зоны E». Частицы являются конечно же ионами, и поэтому эта часть атмосферы получила название *ионосфера*.

Но использование радиоволн не ограничилось лишь беспроводным телеграфом. Ведь для того чтобы передавать не просто импульсы, а сами звуки, достаточно лишь подключить мембрану на входе передатчика и выходе приемника.

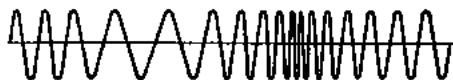
На первый взгляд передавать звуковые волны казалось непрактичным. Дело в том, что частота радиоволн хотя и ниже частоты световых, однако она в несколько раз выше, чем у звуковых. В среднем частота радиоволн составляет 1 000 000 колебаний в секунду, и поэтому подключать мембрану к радиоприемнику бессмысленно: человеческое ухо физически не сможет распознать

звуки столь высокой частоты. Человек слышит звуки в диапазоне частот от 20 до 20 000 колебаний в секунду. Такие частоты называются *звуковыми*. Радиоволны столь низкой частоты обладают ничтожной энергией, и передать их на значительное расстояние просто невозможно.

Тогда ученые пошли другим путем. Частота радиоволны оставалась неизменной, а сама волна стала так называемой *несущей (волной)*. Задачей несущей радиоволны являлась лишь непосредственная передача сообщения. Снимаемые микрофоном звуковые колебания преобразовывались в электрические импульсы, как и в случае с телефонным микрофоном (см. ч. II), и в зависимости от изменения звуковых колебаний изменялся и уровень энергии несущей волны.



Амплитудная модуляция



Частотная модуляция

Изменение несущей волны называется *модуляцией*. Амплитудной *модуляцией* называется изменение амплитуды волны согласно звуковым колебаниям.

Приемник «обрезает» нижнюю часть несущей волны, а верхнюю передает на мембрану, где создается переменное магнитное поле (как в случае с телефонной трубкой). Мембрана реагирует лишь на низкочастотные изменения амплитуды несущей волны, а не на высокочастотные колебания самой волны. Таким образом, мембрана приемника в точности воспроизводит передаваемые передатчиком звуковые волны.

В 1906 году канадский физик Реджинальд Обри Фессенден (1866—1932) впервые передал музыку с помощью радио. Отныне человечество получило возможность передавать по радио не

только телеграммы, но и звук, и именно электронные лампы позволили осуществить передачу информации по радио.

Каждая радиостанция использует несущую волну определенной частоты, а слушатели должны поворотом ручки переменного конденсатора (см. ч. II) настроить свои приемники на эту волну. Однако когда радио только появилось, для точной настройки приемника требовалась длительная тренировка и навыки ювелира.

Во время Второй мировой войны американский электротехник Эдвин Хоуард Армстронг (1890—1954) изобрел так называемый *супергетеродин*. Армстронг занимался разработкой системы обнаружения вражеских самолетов по электромагнитным колебаниям, излучаемым системой зажигания. Дело усложнялось слишком высокой частотой этих колебаний. Тогда Армстронг прибегнул к использованию вспомогательной радиоволны. Обе волны складывались и, как и звуковые волны (см. ч. I), создавали колебания гораздо более низкой частоты, а обнаружить их гораздо проще.

Первая мировая закончилась, и Армстронг так и не довел свое устройство до совершенства. Однако применение гетеродина в радиоприемниках заметно упростило процесс настройки на радиостанции, и в домах стали появляться первые радиоприемники.

В дальнейшем Армстронг занялся и другой проблемой радио — электростатическим «треском». Автомобильные системы зажигания, щетки электромоторов, термостаты и прочие электроприборы, а также грозные молнии порождают электростатическое излучение. Это излучение мешает передаче радиоволн, и из приемника начинает доноситься весьма неприятный шум и треск.

Армстронг изобрел новый тип модуляции — *частотный*. При частотной модуляции изменяется не амплитуда несущей волны, а ее частота. При частотной модуляции внешние электромагнитные излучения практически не влияют на качество принимаемого сигнала, кроме того, частотная модуляция позволяет качественно передавать более широкий диапазон звуковых волн.

Телевидение и радиолокация

А сама катодно-лучевая трубка постепенно переродилась в устройство, полностью затмившее радиоприемники в сердцах людей. Все началось тогда, когда физики, используя низ-

кую инерцию электронов, научились быстро отклонять их поток.

Представим, что анод катодно-лучевой трубки выполнен в виде полого цилиндра. Стремящийся к аноду пучок электронов пролетит сквозь цилиндр и ударится о стенку трубки, выполненную из покрытого люминофором квадратного куска стекла. В точке, куда попадет пучок, возникнет яркое свечение.

Если на пути пучка электронов поместить два электрода и подать на один из них положительный заряд, то электроны начнут к нему притягиваться, и светящаяся точка появится уже в углу экрана.

Если понижать положительный заряд постепенно, то точка медленно поползет обратно к центру экрана. Когда же заряд станет равен нулю, точка опять будет в середине экрана. Если же подать на этот же электрод отрицательный заряд, а на второй — положительный, то точка начнет двигаться в противоположную сторону. Если снова подать максимальный заряд на первый электрод, то точка снова окажется на своем прежнем месте.

Это можно повторять до бесконечности. Если же чередовать заряды электродов достаточно быстро, то точка превратится в горизонтальную линию, так как глаз не сможет уловить ее перемещение. (Нечто подобное происходит и в кино. Если прокручивать кадры пленки, сделанные последовательно, на большой скорости, то картинка «оживает».)

Теперь добавим еще одну пару электродов, на этот раз расположенных горизонтально. С их помощью можно заставить светящуюся точку прочертить вертикальную линию.

Наибольший эффект достигается при использовании сразу двух пар электродов. Например, если заставить одну пару рисовать горизонтальную линию, а вторую подключить к источнику переменного тока, то на экране появится изображение синусоиды.

Если подключить вторую пару электродов к источнику электрических звуковых волн, то на экране появится кривая, отображающая параметры звуковой волны (впрочем, продольная звуковая волна на экране будет выглядеть аналогично поперечной, см. ч. 1). Именно поэтому немецкий изобретатель Карл Фердинанд Браун (1850—1918) и назвал свое устройство *осциллографом* («рисующий волны»).

Электронно-лучевой осциллограф способен на гораздо большее. Представим, что напряжение второй пары электродов изменяется пошагово. Тогда, нарисовав на экране горизонталь-

ную линию, электронный луч чуть поднимется и нарисует еще одну, потом еще и так далее. Таким образом, экран можно разделить на несколько сотен линий, и чем быстрее меняется напряжение, тем быстрее «бегает» электронный луч, то есть в секунду луч может пробежать по экрану несколько раз. Однако человеческий глаз будет видеть светящийся квадрат, хотя если придвинуться к экрану вплотную, то можно разглядеть, что квадрат состоит из многих горизонтальных линий, разделенных тонкими темными полосками. Эти полоски и отображают шаг изменения напряжения поднимающих электронный луч электродов.

По сути, это и есть *телевизионная трубка*. Чтобы на экране такой трубки появилась «картинка», нужно каким-либо способом регулировать интенсивность пуска электрона. Тогда на экране станут появляться более темные или более светлые точки, которые и формируют изображение.

Первым такой способ придумал русский физик Владимир Кузьмич Зворыкин (1888—1982). В 1938 году он изобрел *иконоскоп* (от греч., означает «картинка» и «смотреть»). Это устройство похоже на обычный фотоаппарат, только здесь вместо пленки используется пластина с большим количеством нанесенных на нее капель сплава цезия и серебра. Под действием света цезий отдает электроны, причем интенсивность электронной эмиссии прямо пропорциональна интенсивности светового излучения, чем выше интенсивность, тем меньше электронов, и наоборот. Таким образом, на пластине остается «электронный» рисунок попадающего через линзу изображения.

Этот рисунок можно воссоздать на экране лучевой трубки: чем больше электронов осталось в одной точке пластины, тем ярче эта точка будет светиться на экране. Если же изображение на экране сменяется достаточно быстро, то создается эффект движущейся картинки.

Электронно-лучевой осциллограф также является частью устройства, использующего электромагнитные волны для определения расстояния до каких-либо объектов (аналогично применению звуковых волн в эхолокации).

Электромагнитные волны распространяются с точно известной скоростью — 300 000 километров в секунду. Если же электромагнитный импульс столкнется с преградой, то он, отражаясь от нее, вернется назад к источнику электромагнитного излучения. Остается лишь регулировать частоту волны: для проникновения сквозь туман, дождь и облачность необходимы волны более низкой частоты, а для более эффективного отра-

жения от препятствий — более высокой. Идеальной является волна микроволнового диапазона, длиной от 0,5 до 100 см.

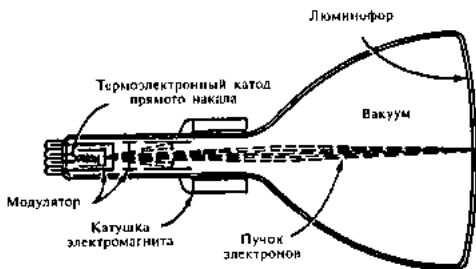
Зная скорость распространения волны и время, за которое сигнал долетел до препятствия и вернулся назад, можно определить расстояние до объекта. А по самому сильному отраженному сигналу можно определить направление.

Над разработкой подобного устройства работало сразу несколько ученых, но создать его первым удалось шотландскому физiku Роберту Александру Ватсон-Ватту (1922—1972). Благодаря его прибору уже в 1935 году стало возможным отслеживать движение самолета по отражению микроволновых волн от его обшивки. Система получила название «радиообнаружение и определение дальности». По-английски система сокращенно называется *radar*.

Микроволновый импульс радара отклоняет луч осциллографа так, что на экране вместо горизонтальной линии появляется «клин» — эхо-сигнал, мощности намного меньшей мощности изначального импульса, так как возвращается лишь часть отраженных электронов, остальные разлетаются в разные стороны, отображается в виде меньшего по размерам клина. Так как электронный луч перемещается из стороны в сторону с огромной скоростью, то даже за те доли миллисекунды, которые необходимы для возвращения сигнала, между импульсом и эхо-сигналом образуется зазор. Именно по величине этого зазора возможно судить о расстоянии до объекта.

Можно поступить иначе, сконструировав специальную вращающуюся вокруг своей оси радарную антенну. Антенна будет принимать и усиливать слабые эхо-сигналы, а электронный луч вслед за вращением антенны рисовать на экране осциллографа линию от центра к краю экрана. Появляющиеся на экране яркие точки и будут отраженными от объектов эхо-сигналами. Тогда по расстоянию от точки до центра экрана можно будет судить о расстоянии до объекта, а по местоположению точки на экране — определить направление. При следующем обороте антенны вращающаяся линия «сотрет» все точки на экране и отобразит новые. Если использовать люминофор с более длительным свечением, то на экране появится грубое схематическое изображение длинных объектов. А если установить такой радар на самолет, то на экране появится приблизительная карта местности, так как электромагнитные волны отражает и земля, и вода, и листья, и бетон.

Впрочем, с помощью электронных приборов можно обнаруживать не только лишь созданные человеком высокочастотные излучения. Все небесные тела излучают широкий спектр элек-



Телевизионная электронно-лучевая трубка

ромагнитных волн. Однако практически все из них не способны пробиться сквозь атмосферу Земли. Исключением является, например, видимый свет, составляющий довольно обширную часть спектра солнечного излучения.

Существуют и другие излучения, легко проникающие сквозь земную атмосферу.

В 1932 году американский радионженер Карл Янский (1905—1950) занимался определением источников электростатического излучения. Устранив все известные источники, ученый смог обнаружить присутствие слабого электростатического излучения. Янский не смог определить источник этого излучения. Источник находился где-то сверху и медленно изменял свое местоположение в течение дня. Сначала Янский предположил, что источник движется вместе с Солнцем, но затем заметил, что его движение ускоряется и за день источник «обгоняет» Солнце на 4 минуты. Именно так изменяется положение звезд по отношению к Солнцу, а значит, источник излучения находится где-то за пределами Солнечной системы.

К 1932 году Янскому удалось определить, что самое сильное излучение идет со стороны созвездия Стрельца, где, по мнению астрономов, находится центр нашей Галактики.

Хотя центр Галактики и скрыт от глаз облаками пыли, полностью поглощающими свет, его все-таки можно разглядеть с помощью микроволнового излучения. После Второй мировой войны развитие радаров привело к появлению *радиотелескопов*. Радиотелескопы способны усиливать даже самые слабые сигналы. Началась новая эра — эра *радиоастрономии*.

Глава 4

ЭЛЕКТРОНЫ В АТОМАХ

Фотоэлектрический эффект

Какое-то время ученых вполне устраивала идея о том, что все во Вселенной состоит по меньшей мере из двух типов никак между собой не связанных микрочастиц: различных видов относительно тяжелых атомов элементов и одинаковых электронов, составляющих электрический ток.

Но так ли уж они между собой не связаны? Вольт еще за столетие до открытия электронов использовал для получения электрического тока устройство, состоявшее из помещенных в химический раствор металлических пластин. С тех пор химические источники тока претердели большие изменения и превратились в современные батарейки и аккумуляторы.

Если несколько обладающих нейтральным зарядом химических элементов вместе способны давать состоящий из огромного количества электронов электрический ток, значит, связь между атомами и электронами все-таки существует. Теперь нужно выяснить, образуются ли электроны в процессе соединения и разъединения атомов, или же они всегда присутствуют в веществах, а во время реакции просто-напросто высвобождаются.

И у того и у другого взгляда были свои недостатки. Образование электронов, согласно закону сохранения массы (см. ч. II), а в 90-х годах XIX века ученые свято ему верили, просто невозможно. С другой стороны, если электроны в химических элементах существовали всегда, то почему тогда они никак себя не проявляли и почему заряд химических элементов остается нейтральным?

Масло в огонь подливал и следующий феномен, известный еще до открытия электрона.

Когда в 80-х годах XIX века Герц экспериментировал с радиоволнами, то обнаружил, что гораздо проще получить искру между металлическими иглами его устройства для обнаружения радиоволн, если на иглы падает свет. То есть под действием света в металле возникает электрический ток. Герц дал феномену название *фотоэлектрический эффект*.

В 1888 году немецкий физик Вильгельм Гальвакс (1859—1922) обнаружил, что свет действует на разноименные электрические заряды по-разному. Под действием ультрафиолета отрицательно заряженная цинковая пластина отдаст свой заряд, а положительно заряженная — не отдает.

Объяснение появилось сразу после открытия электрона. Под действием света из металла высвобождались электроны, благодаря которым и появлялась искра. Отрицательно заряженная цинковая пластина содержит избыток электронов, который и высвобождается под действием ультрафиолета, в то время как в положительно заряженной пластине избытка электронов, понятное дело, нет.

В 1899 году Томсон доказал это утверждение, сравнив соотношение e/m электронов катодного луча и частиц, высвобождающихся под действием света, и оказалось, что соотношения эти равны друг другу, и с тех пор эти частицы также считаются электронами.

Снова встал тот же вопрос. Появляются ли электроны в металле под действием света, или же они присутствуют в нем всегда? В 1905 году Эйнштейн, доказав, что существовавшая в XIX веке формулировка закона сохранения массы является неполной. На самом деле энергия может переходить в массу, и наоборот, поэтому следует говорить скорее о законе сохранения массы и энергии. Тем не менее энергии света, пусть даже и ультрафиолетового, просто недостаточно для образования электронов.

Значит, электроны присутствуют в самом металле. Тогда возникает еще один вопрос. Существуют ли электроны сами по себе, или же они находятся внутри атомов? Согласиться с последним оказалось не так-то просто: ведь тогда получается, что атом вовсе не та целостная, неделимая микрочастица, о которой говорили Демокрит и Дальтон и в существование которой научный мир поверил с таким трудом.

Доказательством верности второго утверждения стал следующий феномен. Филипп Ленард обнаружил, что энергия, с которой высвобождаются электроны, зависит от длины световой волны и электроны высвобождаются под действием света только с длиной волны меньше определенного значения (*пороговая величина*). Зарождающаяся в начале XX века квантовая теория (см. ч. II) смогла объяснить причину этого феномена. Дело в том, что свет состоит из фотонов, и чем меньше длина волны, тем выше энергия фотонов.

Энергии света с пороговым значением длины волны достаточно для того, чтобы разорвать связи, удерживающие электроны внутри вещества. У каких-то химических элементов эти связи сильнее, а у каких-то — слабее. Скажем, для выделения электронов из одних металлов необходим обладающий высокой энергией ультрафиолетовый свет, а для других достаточно и «слабого» красного. Если электроны «привязаны» внутри вещества, значит, между атомами и электронами существуют связи, и сила этих свя-

зей зависит от веса и размеров конкретного атома. А если электроны удерживаются внутри атома определенными силами, то логично предположить, что они являются частью атомов.

Новая теория помогла ученым лучше понять структуру атомов. Дело в том, что атомов существует великое множество, а электроны-то все одинаковые (исследования показали, что электроны, выделяющиеся под действием света из различных металлов, абсолютно идентичны), и, может быть, существование всего этого разнообразия атомов можно объяснить различным количеством электронов внутри атома, их местоположением, величиной удерживающей их силы и т. д. Появлялась возможность еще больше упорядочить элементы периодической таблицы, расставленные только лишь на основании умозаключений. Новая теория похоронила идею Демокрита о неделимости атома.

Действительно, поведение химических элементов вполне соответствует их месту в периодической системе. Например, наиболее интенсивно под действием света электроны отдают щелочные металлы, причем интенсивность растет с ростом атомного веса, т. е. чем ниже элемент находится в таблице, тем легче он отдает электроны. Таким образом, проще всего выделить электроны из цезия¹ — встречающегося в природе щелочного металла с самым большим атомным весом. Именно поэтому Зворыкин для своего иконоскопа использовал именно цезий.

Это еще раз доказывает, что Менделеев опередил свое время, ведь ученому ничего не было известно о фотоэлектрическом эффекте. Впрочем, настоящий ученый и должен быть впереди своего времени, создавая то, что порой невозможно объяснить, пользуясь уже существующими знаниями.

Фотоэлектрическому эффекту можно найти массу применений. Можно, например, изготовить электровакуумный прибор без применения нити накаливания, достаточно просто поместить в трубку спираль из металла, в котором под действием света будет возникать электрический ток. Такая трубка называется *фотоэлементом*.

Фотоэлемент можно подключить, например, к электромагниту, удерживающему дверь. С одной стороны от двери устанавливается фотоэлемент, а с другой — источник направленного света. Пока свет попадает на фотоэлемент, в цепи присутствует электрический ток и дверь закрыта. Подходя к двери, человек загораживает источник света, напряжение в цепи падает, электромагнит отключается, а дверь открывается.

¹ Франций, щелочной металл с еще большим, чем у цезия, атомным весом, в природе практически не встречается.

Атомное ядро

Открытие в атоме электронов подняло еще целый ряд непросьтых вопросов.

Известно, что заряд атомов нейтрален, значит, если внутри атома есть отрицательно заряженные электроны, то должен быть и носитель компенсирующего положительного заряда. Что же является носителем этого заряда и почему легкие положительно заряженные частицы не выделяются под действием света? Почему существуют только катодные, а не анодные лучи?

Ответ на вопрос дал Томсон. В 1898 году он сделал предположение, что атом — это твердая положительно заряженная сфера, внутри которой, как изюм в булочке, находятся электроны, благодаря которым заряд атома и остается нейтральным.

Это предположение многое объясняло, и теория Томсона оказалась ученой общественности крайне привлекательной. Свет конечно же мог освободить несколько крошечных электронов, но вряд ли мог сдвинуть с места огромный положительно заряженный атом. В вакууме электроны действительно будут испаряться с нити накаливания, однако атом останется нетронутым: согласно кинетической теории (см. ч. I) при повышении температуры атомы начнут лишь сильнее колебаться, в то время как электроны просто «сорвутся» со своих мест. Это объясняет, почему положительно заряженные частицы никогда и нигде не были обнаружены.

Кроме того, теория Томсона объясняла и происхождение ионов. Когда атом теряет свои электроны, у него все равно остается положительный заряд, величина которого зависит от количества потерянных электронов. Например, ион водорода (H^+) и ион натрия (Na^+) — это атомы водорода и натрия, потерявшие единственный электрон. Ион кальция (Ca^{++}) — это потерявший оба электрона атом кальция, а ион алюминия (Al^{+++}) — это атом алюминия без трех электронов.

А что произойдет, если, наоборот, добавить атому пару электронов? Ион хлора (Cl^-) — это атом с хлора с «лишним» электроном. Если же добавить сульфату два, а фосфату — три электрона, то образуются сульфат (SO_4^{--}) и фосфат (PO_4^{---}) ионы.

Таким образом, по Томсону, отрицательно заряженные электроны являются единственными субатомными частицами, но с их помощью можно объяснить существование и отрицательно, и положительно заряженных ионов.

Но у такой привлекательной на первый взгляд теории Томсона был один серьезный недостаток. Ленард обнаружил, что состоящие из электронов катодные лучи могут проникать сквозь

различные предметы. Тогда если атом, как утверждал Томсон, является твердой сферой, то электронам, хотя они и крайне малы, все равно приходится буквально протискиваться между атомами других веществ. В этом случае после столкновения с преградой катодный луч должен рассеиваться, однако этого не происходит. Пройдя сквозь препятствие, пучок электронов остается таким же «кучным». Получается, что электроны проходят мимо атомов, не встречая особого сопротивления.

В 1903 году Ленард предположил, что атом на самом деле вовсе не твердое тело, а, по сути, пустота. По мнению ученого, атом состоял из электронов и равного им количества положительно заряженных частиц, благодаря которым заряд атома и оставался нейтральным.

Но почему тогда не существует анодных лучей?

Новозеландский физик Эрнест Резерфорд (1871—1937) прикинул взгляды Ленарда и Томсона. Начиная с 1906 года он провел серию экспериментов, в ходе которых облучал тонкие золотые листы альфа-частицами¹. Под листами находилась фотопластинка.

Поток альфа-частиц с легкостью «пробивал» лист золота, словно того и вовсе не было, и засвечивал фотопластинку. Хотя толщина листа всего лишь $\frac{1}{30000}$ см, это все равно 20 000 атомов. Тот факт, что альфа-частицы с легкостью проходили сквозь 20 000 атомов, был доводом в пользу «пустого» атома Ленарда, то есть атома, состоящего лишь из нескольких легких частиц, разделенных пустотами.

Но самое интересное заключалось в том, что не все альфа-частицы проходили сквозь золотой лист беспрепятственно. Если альфа-луч не встречает на своем пути преград, то на фотопластинке остается четкий отпечаток. Однако если между источником альфа-излучения и фотопластинкой поместить лист золота, то контур отпечатка становится размытым. Проходя сквозь металл, альфа-частицы отклоняются от своей траектории на несколько градусов, а каждая восьмидесятичная частица — на 90° и более!

Но почему? Почему практически все альфа-частицы легко проходят сквозь золото нетронутыми и лишь небольшая их часть так сильно меняет траекторию своего полета? Ведь масса альфа-частицы в 7350 раз больше массы электрона и в 4 раза больше массы атома водорода. Так что даже если альфа-частица столкнется с электроном, то она просто сметет его. Траек-

¹ Альфа-частицы — это тяжелые, передвигающиеся с огромной скоростью частицы радиоактивных веществ, чья проникающая способность гораздо выше, чем у электронов.

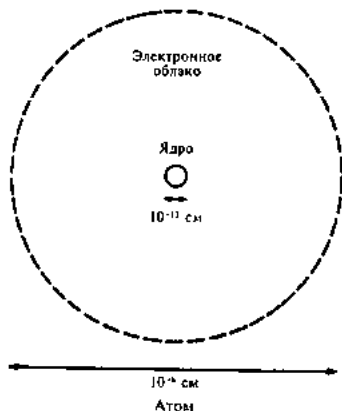
тория изменится только в случае столкновения с объектом, масса которого приближается к массе атома. А поскольку лишь некоторые частицы встречают преграды на своем пути, размеры этого объекта должны быть крайне малы.

Это как мыльный пузырь, в центре которого находится свинцовый шарик. Если стрельнуть по такому пузырю дробью, то большинство дробинок пройдет сквозь него беспрепятственно, но некоторые попадут в шарик и отскочат от него. Зная частотность рикошетов, можно высчитать приблизительные размеры пузыря и шарика.

Но этот пример не совсем точно отображает суть происходящего. Альфа-частицы не сталкиваются с объектом внутри атома физически. Резерфорд доказал: взаимодействие между ними имеет электрическую природу. Дело в том, что альфа-частицы обладают положительным зарядом (+2), а объект в центре атома также несет положительный заряд, поэтому альфа-частица просто-напросто отталкивается от объекта.

В 1911 году Резерфорд представил миру свою модель атома. Атом состоит из электронов и *атомного ядра*, которое обладает огромной массой, однако размеры его гораздо меньше, чем предполагал Томсон.

Концепция *ядерного атома* Резерфорда ныне принята во всем мире.



Судя по тому, как альфа-частицы отклоняются от своих траекторий, размеры ядра атома должны быть действительно крайне малы — от 10^{-10} до 10^{-12} см в диаметре, что составляет $\frac{1}{100\,000}$ или $\frac{1}{10\,000}$ от диаметра самого атома. Объем атомного ядра составляет одну триллионную ($\frac{1}{1\,000\,000\,000\,000}$) часть объема атома.

По сути, практически вся масса атома сконцентрирована в его ядре. Даже ядро самого легкого атома — атома водорода — в 1836 раз тяжелее электрона, а то время как масса ядра атомов более тяжелых элементов может превосходить массу электрона почти в 500 000 раз. Естественно, тяжелое ядро намного менее подвижно, чем практически невесомый электрон, и именно поэтому под действием света и высокой температуры освобождаются только лишь электроны.

У Резерфорда, как и у Ленарда, атом также «пустой». Пространство за пределами ядра занимают электроны. Масса электронов крайне мала, и они не являются препятствием для катодных и альфа-лучей.

Происхождение ионов с точки зрения модели атома Резерфорда объясняется присоединением и потерей электронов, как и у Томсона.

Модель атома Резерфорда полностью удовлетворяла ученых, оставалось лишь доработать некоторые детали.

Особенности рентгеновского излучения

Теперь физики увидели атом как небольшое, но обладающее большой массой атомное ядро, окруженное электронами. Поскольку практически всю массу атома составляет ядро, то с увеличением атомного веса должна увеличиваться и масса ядра.

Логично предположить, что чем больше масса атомного ядра, тем выше его положительный заряд и тем больше электронов необходимо для того, чтобы заряд всего атома оставался нейтральным. А раз так, то постепенно становится ясным, в чем заключается различие между атомами различных химических элементов, и различие это вовсе не в массе, как считал Дальтон и остальные ученые XIX века. Различие имеет совершенно новую, электрическую природу. Атомы различных химических элементов отличаются зарядом ядра атома и количеством электронов за пределами ядра.

Эти два аспекта электрического различия атомов тесно связаны между собой, однако заряд — величина более постоянная, чем количество электронов. Под действием света и тепла

электроны могут покинуть атом, превратив его в положительно заряженный ион, а появление в атоме дополнительных электронов приводит к образованию отрицательно заряженного иона. Несмотря на то что свойства иона разительно отличаются от свойств атома, от которого он образован, все-таки ион не является новым элементом. Другими словами, даже несмотря на то, что ион натрия по свойствам сильно отличается от атома натрия, даже физики и химики XIX века могли легко превратить его обратно в атом натрия, и хотя превратить ион калия в атом калия и наоборот они уже не могли, но в принципе это возможно. Значит, количество электронов не является ключевым отличием атома одного элемента от атома другого.

А вот изменить заряд ядра атома ученые того времени не могли. Заряд ядра атома остается постоянным независимо от количества электронов. Таким образом, все разнообразие атомов и соответственно химических элементов удобнее всего характеризовать по разности зарядов их атомных ядер.

Но как определить точную величину заряда атомного ядра? Ответ подсказали рентгеновские лучи.

Рентген получил свои лучи, направив катодный луч на стекло стенки катодной трубки. Электроны, проникая сквозь какой-либо объект, замедляются, и при достаточной толщине объекта они могут остановиться полностью. Согласно теории электромагнетизма Максвелла понижение скорости заряженных частиц приводит к возникновению электромагнитного излучения, в данном случае — рентгеновских лучей.

Понятно, что вещество, состоящее из более тяжелых атомов, будет эффективнее задерживать электроны, а рентгеновское излучение будет более интенсивным. Именно поэтому физики стали помещать металлическую пластину внутри катодной трубки непосредственно перед катодом. Электроны, попадая на эту пластину — *антикатод* («напротив катода»), тормозятся, и появляется мощное рентгеновское излучение. Такая трубка получила название *рентгеновская*.

В 1911 году английский физик Чарлз Баркла (1877—1944) обнаружил, что свойства получаемых рентгеновских лучей зависят от материала, из которого сделан антикатод, то есть определенный материал производил определенные группы лучей. Баркла мог судить о различиях этих групп лишь по их проникающей способности. Лучи одной группы могли проходить сквозь толстый материал, другой — сквозь более тонкие и т. д. Чем жестче рентгеновский луч, тем выше его проникающая способность. Впоследствии самые жесткие лучи стали

называть лучами группы К, менее жесткие — группы L, M и т. д. Определенные материалы производят определенное, т. е. *уникальное рентгеновское, излучение.*

Жесткость лучей уникального излучения зависит от металла, из которого сделан антикатод. Чем выше атомный вес металла, тем «тверже» производимые им рентгеновские лучи. Стало очевидным, что если точно измерить их «твердость», то можно узнать много интересного об атомном ядре.

К сожалению, результаты измерения жесткости рентгеновских лучей по их проникающей способности были весьма приблизительными, нужно было что-то более точное. Ученые давно предполагали, что рентгеновские лучи являются частным случаем электромагнитного излучения (впрочем, когда Баркла анализировал результаты своих экспериментов, это еще не было доказано). Если это так, тогда чем короче длина рентгеновского луча, тем выше его энергия и проникающая способность. Таким образом, измерения длины волны (т. е. частоты) рентгеновских лучей дают возможность точно определить степень их жесткости.

Но как измерить длину волны? По идее для этого нужно использовать дифракционную решетку (см. ч. II). Дифракционная решетка — это экран с большим количеством параллельных щелей. Ширина щелей должна быть равна длине измеряемой волны. Длина рентгеновского луча намного меньше длины ультрафиолетового излучения, поэтому создать такую решетку практически невозможно.

В 1912 году немецкий физик Макс Лауэ (1879—1960) предложил для измерения длины волны рентгеновского излучения использовать кристаллы. Структура кристалла представляет собой расположенные рядами атомы, иначе говоря, кристалл является естественной дифракционной решеткой. Ни одна дифракционная решетка, созданная человеком, не обладает столь малой шириной щелей.

Расстояние между атомными ядрами, которые и будут разлагать пучки рентгеновских лучей в спектр так же, как щели обычной дифракционной решетки разлагают в спектр обычный свет, составляет около 10^{-8} см, что приблизительно и равно длине волны рентгеновского луча.

В опытах Лауэ пучок рентгеновских лучей, проходя сквозь кристалл сульфида цинка, падал на фотопластинку, оставляя вместо четкого отпечатка узор из нескольких точек. Значит, дифракция рентгеновских лучей действительно имела место, что и послужило доказательством волновой природы рентгеновского излучения.

В том же году два английских физика, Уильям Генри Брэгг и его сын, Уильям Лоренс Брэгг, развили идею Лауэ. Проанализировав поведение проходящих через кристалл рентгеновских лучей, они пришли к выводу, что угол отклонения лучей зависит от расстояния между атомами кристалла и от длины волны. Зная расстояние между атомами, можно определить длину волны.

Метод позволял высчитать длину волны рентгеновского луча с достаточной точностью. Спектр рентгеновского излучения, появляющегося при столкновении электронов с преградой, колеблется от 1 (нижняя граница диапазона ультрафиолетового излучения) до 0,01 миллимикрона (7 октав).

Атомные числа

Использование метода Брэгга давало возможность изучить уникальные рентгеновские излучения, о которых говорил Баркла, что и было сделано в 1913 году английским физиком Генри Гвином Джефрисом Мозли (1897—1915).

Мозли изучал рентгеновские лучи группы К применительно к 12 следующим друг за другом элементам периодической системы и обнаружил, что длина волны уменьшалась (то есть частота повышалась) с увеличением атомного веса, причем квадратный корень длины волны увеличивался пошагово.

Мозли предположил, что причиной этому является пошаговое увеличение заряда ядра атома. Ученый пришел к выводу, что ядро простейшего атома несет заряд +1, заряд следующего +2, еще следующего +3 и т. д. Мозли назвал величину этого заряда *атомным числом*.

Ученый оказался прав. Сегодня за атомный вес водорода принято число 1, гелия — 2, лития — 3 и т. д. В настоящее время определены атомные числа всех известных элементов. В табл. 3 элементы представлены в порядке увеличения их атомных чисел от 1 до 103.

Для периодической системы атомные числа имеют гораздо более важное значение, чем атомные веса. Для того чтобы в таблице все элементы одного семейства были на своих местах, Менделееву пришлось поставить некоторые более тяжелые элементы перед более легкими. Так, кобальт с атомным весом 58,93 стоит перед никелем с атомным весом 58,71.

Мозли выяснил, что кобальт, несмотря на больший атомный вес, производит рентгеновские лучи более низкой, чем никель, частоты. Поэтому у атомное число у кобальта (27) меньше, чем

у никеля (28). Хотя Менделееву ничего не было известно о рентгеновских лучах, интуиция химика не подвела его.

Таким образом, если рассматривать те пары элементов, что стоят в периодической системе не по порядку возрастания их атомных весов (аргон—калий, кобальт—никель, теллур—йод), а с точки зрения возрастания атомных чисел, то все становится на свои места.

Кроме того, благодаря открытию атомных чисел у периодической таблицы появляется еще одно свойство. Теперь с ее помощью можно не только предсказывать существование пока еще неизвестных элементов (что Менделеев и сделал), но и их несуществование.

Пока на вооружении ученых были лишь атомные веса, нельзя было сказать наверняка, что в будущем не будут открыты целые семейства новых элементов. Например, в 1890 году было открыто семейство инертных газов (гелий, неон, аргон, криптон и ксенон), и в таблицу тут же добавили новую колонку, ранее о существовании которой даже и не подозревали. Столетие спустя были открыты лантаноиды, и их тоже включили в таблицу. До Моэли никто не мог точно сказать, сколько еще оставалось неизвестных элементов. Десятки? Сотни? Тысячи?

Атомные числа не оставили места для подобных сомнений. Подразумевая, что атомное ядро не может нести дробный заряд, можно с уверенностью заявить, что между водородом (атомное число 1) и гелием (2) или, скажем, фосфором (15) и серой (16) никаких элементов нет.

Впервые химики могли сказать, сколько еще элементов предстояло открыть. Первым элементом в таблице является водород (атомное число 1), других элементов перед ним нет. Во времена Моэли самым тяжелым из известных элементов был уран (92). Между ними были лишь 7 неизвестных элементов с атомными числами 43, 91, 72, 75, 85, 87 и 91.

Рентгенографический анализ можно также использовать для проверки новых элементов. Например, в 1911 году французский химик Жорж Урбен (1872—1938) выделил, как ему показалось, новый элемент и дал ему название «кельтий». Когда Моэли опубликовал свой труд, Урбен решил, что кельтий — это как раз и есть неизвестный элемент с атомным числом 72, и привез образец на проверку к Моэли. Проанализировав уникальное рентгеновское излучение «нового» элемента, Моэли выяснил, что кельтий был на самом деле смесью двух уже известных элементов — иттербия и лютеция (атомные числа 70 и 71). Химические испытания это подтвердили, и потерянный

увиденным Урбен впоследствии сделал много для популяризации концепции атомных чисел.

В течение последующих 12 лет были заполнены 3 пустые клетки таблицы. В 1917 году был открыт протактиний (91), в 1923 году — гафний (72), в 1925 году — рений (75). Еще через 10 лет были заполнены оставшиеся четыре клетки (43, 61, 85, 87). Эти элементы мы рассмотрим ниже.

Зная заряд ядра атома элемента, можно судить и о количестве электронов в атоме. Конечно же атом может потерять или присоединить электроны и превратиться в положительно или отрицательно заряженный ион, но в атоме с нейтральным зарядом количество электронов должно соответствовать заряду ядра. Так, в атоме кислорода с зарядом ядра +18, для того чтобы заряд атома оставался нейтральным, должно присутствовать 18 электронов. То есть количество электронов в атоме равно атомному числу этого элемента. Таким образом, у атома водорода один электрон, у натрия — 11, а у урана — 92.

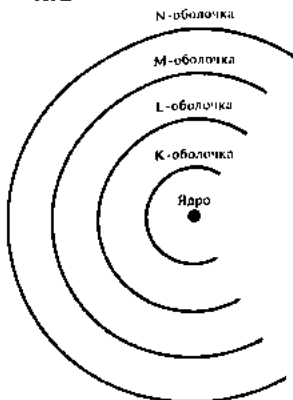
Электронные оболочки

Теперь возник еще один вопрос: как все эти электроны расположены в атоме? Томсон с его моделью атома в виде булочки с изюмом предположил, что электроны внутри атома расположены по кругам. Чем больше электронов — тем больше кругов.

И хотя модель атома Томсона и была вытеснена моделью атома с ядром Резерфорда, идея о том, что электроны находятся за пределами ядра, казалась вполне вероятной, а существование уникального рентгеновского излучения лишь подтверждало ее. Возможно, что каждая из групп лучей испускалась определенной группой электронов вокруг ядра. Электроны, находящиеся в непосредственной близости от ядра, удерживаются им сильнее, значит, они и производят самое жесткое излучение группы К. Электроны, находящиеся чуть дальше от ядра, будут производить излучения группы L и т. д. Приведенный ниже рисунок наглядно это иллюстрирует.

А почему, например, благородные газы (гелий, неон, аргон, криптон, ксенон и радон) практически не вступают в химические реакции? (На самом деле долгое время считалось, что они вообще ни с чем не реагируют, и только в 1962 году выяснилось, что с некоторыми элементами они все же реагируют.)

Одной из причин является то, что любая химическая реакция включает в себя в том числе и взаимодействие электронов



Электронные оболочки

внутри атома. Например, хлорид натрия состоит из ионов натрия и газообразного хлора. В процессе реакции атом натрия теряет один электрон и становится положительно заряженным ионом Na^+ , а атом хлора присоединяет один электрон и становится отрицательно заряженным ионом Cl^- .

Возможно, благородные газы не вступают в химические реакции потому, что уже обладают жесткой электронной структурой, а присоединение или потеря электронов приведет к потере этой структурной устойчивости.

Логично предположить, что эта устойчивость достигается полным заполнением одной из электронных оболочек.

Например, атомное число гелия равно 2, и гелий является благородным газом. Если атом гелия содержит два электрона, значит, ему необходимы лишь два электрона для полного заполнения внутренней электронной оболочки К. Атом следующего благородного газа — неона — в нейтральном состоянии обладает 10 электронами, 2 из которых заполняют оболочку К, а оставшиеся 8 — оболочку L. В каждом атоме аргона (атомное число 18) уже по 18 электронов, 2 из которых заполняют оболочку К, еще

8 — L, а оставшиеся 8 — оболочку M. В табл. 4 показано, как электроны по электронным оболочкам распределены у первых 20 элементов. (У элементов с большим атомным числом распределение становится уже более сложным, см. гл. 5.)

Вскоре после опубликования Мозли своих работ были сделаны первые попытки рассмотреть химические реакции с точки зрения распределения электронов по электронным оболочкам. Успехом увенчались попытки работавших независимо друг от друга американских химиков Гилберта Ньютона Льюиса (1875—1946) и Ирвинга Ленгмюра (1881—1957). Суть их теории кратко заключается в том, что в процессе любой химической реакции элементы стараются потерять или присоединить электроны, чтобы перейти в такое же, как и у благородных газов, устойчивое состояние.

Так, натрий с распределением электронов по оболочкам 2/8/1 проявляет тенденцию отдать один электрон, чтобы превратиться в ион натрия (Na^+) с распределением электронов 2/8, как у атома неона. Конечно же ион натрия не превращается в атом неона, так как заряд ядра (уникальный для каждого элемента) иона натрия остается +11, а заряд ядра атома неона равняется +10. То же можно сказать и о хлоре. Атом хлора с распределением электронов 2/8/7 проявляет тенденцию присоединить еще один электрон и стать ионом хлора (Cl^-) с распределением электронов 2/8/8, как у атома аргона.

Легкость, с которой натрий и хлор реагируют друг с другом, объясняется их обоюдным желанием отдать и присоединить электрон. Атом хлора присоединяет «лишний» электрон натрия, после чего элементы превращаются в ионы с разноименным зарядом и притягиваются друг к другу.

Точно так же кальций (2/8/8/2) легко отдает 2 электрона и становится ионом кальция (Ca^{++}) с распределением электронов по аргону (2/8/8), а кислород (2/6) присоединяет эти 2 электрона и становится оксид-ионом (O^{--}) с распределением по неону (2/8). Вместе эти ионы образуют оксид кальция (CaO).

Или кальций может отдать один электрон одному атому хлора, а второй — другому, и тогда образуется хлорид кальция (CaCl_2), то есть один грамм-атом хлора соединяется с половиной грамм-атома кальция. Таким образом, с точки зрения электронов можно объяснить существование эквивалентных масс.

Но как же тогда образуется молекула хлора? Ведь атом хлора проявляет тенденцию присоединить, но никак не отдать электрон. Льюис и Ленгмюр предположили, что если два атома хлора находятся в непосредственной близости, то их внешние электронные оболочки соприкасаются и заполняются электро-

Таблица 4

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

| Элемент | Атомное число | Число электронов на оболочке | | | |
|----------|------------------|------------------------------|---|---|---|
| | | K | L | M | N |
| Водород | 1 | 1 | — | — | — |
| Гелий | 2 | 2 | — | — | — |
| Литий | 3 | 2 | 1 | — | — |
| Бериллий | 4 | 2 | 2 | — | — |
| Бор | 5 | 2 | 3 | — | — |
| Углерод | 6 | 2 | 4 | — | — |
| Азот | 7 | 2 | 5 | — | — |
| Кислород | 8 | 2 | 6 | — | — |
| Фтор | 9 | 2 | 7 | — | — |
| Неон | 10 | 2 | 8 | — | — |
| Натрий | 11 | 2 | 8 | 1 | — |
| Магний | 12 | 2 | 8 | 2 | — |
| Алюминий | 13 | 2 | 8 | 3 | — |
| Кремний | 14 | 2 | 8 | 4 | — |
| Фосфор | 15 | 2 | 8 | 5 | — |
| Сера | 16 | 2 | 8 | 6 | — |
| Хлор | 17 | 2 | 8 | 7 | — |
| Аргон | 18 | 2 | 8 | 8 | — |
| Калий | 19 | 2 | 8 | 8 | 1 |
| Кальций | 20 | 2 | 8 | 8 | 2 |

нами друг друга, и общее число электронов каждого атома становится таким же, как и аргона, — 2/8/8.

Понятно, что любая попытка удалить атомы хлора друг от друга ставит под угрозу существование общей электронной оболочки, и именно поэтому молекула хлора чрезвычайно устойчива. Для разложения ее на отдельные атомы необходимо достаточно большое количество энергии.

По той же причине молекулы фтора, водорода, кислорода и азота также состоят из двух атомов.

Распределение атомов внутри атома углерода — 2/4. Значит, один атом углерода может образовать общие электронные оболочки с четырьмя атомами водорода. Таким образом, с помощью четырех атомов водорода атом углерода заполняет внешнюю электронную оболочку по неону (2/8), как у атома неона, каждый атом водорода с помощью одного атома углерода заполняет свою электронную оболочку по гелию (2), а молекула метана (CH_4) становится устойчивой.

Действительно, теория Льюиса—Ленгмюра о переходящих и обших электронах объясняет, как образуются молекулы большинства простейших химических соединений. Более того, эта теория объясняет, почему периодическая таблица и является, собственно говоря, периодической (сам Менделеев конечно же не мог этого объяснить). Начнем с того, что в атомах благородных газов электроны распределены таким образом, чтобы придавать атомам максимальную устойчивость. Благородные газы являются инертными химическими веществами и выделяются в отдельное семейство обладающих естественной устойчивостью и очень похожих друг на друга элементов.

Каждый из щелочных металлов следует за одним из инертных газов, следовательно, их атомное число на единицу больше, чем у одного из инертных газов. У лития (следующий за гелием) электроны распределены как 2/1; у натрия (следующий за неоном) — 2/8/1; у калия (следующий за аргоном) — 2/8/8/1 и т. д. У каждого из щелочных металлов на внешней оболочке по одному электрону, и все они проявляют тенденцию отдать его для приобретения естественной устойчивости.

У каждого из образующих щелочноземельное семейство металлов по 2 электрона на внешней оболочке: 2/2 у бериллия, 2/8/2 у магния, 2/8/8/2 у кальция и т. д.

Атомное число галогенов на единицу меньше, чем у благородных газов: 2/7 у фтора, 2/8/7 у хлора и т. д. Все элементы этого семейства проявляют тенденцию присоединить один электрон для достижения естественной устойчивости.

Таким образом, с помощью электронов и электронных оболочек периодическая таблица получила наконец рациональное объяснение спустя полвека после своего появления.

Глава 5

ЭЛЕКТРОНЫ И КВАНТЫ

Спектральный ряд

Однако как ни хороша теория Льюиса—Ленгмюра, она объясняет структуру лишь простейших химических соединений. С ее помощью невозможно объяснить, например, структуру гидрида бора (соединения бора и водорода) или свойства бензола (C_6H_6). Также невозможно объяснить и поведение элементов с атомными числами меньше, чем у кальция, или почему так схожи свойства лантаноидов, хотя их атомные числа разнятся от 57 до 71.

Слабым местом во взглядах Льюиса и Ленгмюра является то, что ученые рассматривали электроны как неподвижные частицы, занимающие внутри атома строго определенные места. Действительно, на рисунках того времени электроны оболочек L и M располагались по восьми углам куба, а молекулы простейших соединений состояли из нескольких таких кубов, соединенных вместе.

Конечно же такое представление удобно с химической точки зрения, но абсолютно неприемлемо с физической. Ведь если отрицательно заряженный электрон висит над положительно заряженным ядром неподвижно, то он должен просто-напросто упасть на ядро. (Точно так же Земля упала бы на Солнце, если бы не вращалась вокруг него.)

Постепенно физики пришли к выводу, что электрон, чтобы не упасть на ядро, вращается вокруг него с огромной скоростью. В 1904 году японский физик Хантаро Нагаока предположил, в частности, что электроны движутся вокруг ядра так же, как планеты движутся по своим орбитам вокруг Солнца¹.

Впрочем, все модели атомов, где электроны вращались вокруг ядра, сталкивались с одной и той же проблемой. Вращающийся вокруг ядра электрон постоянно испытывает центростремительное ускорение, а согласно теории Максвелла постоянно ускоряющийся заряд должен постоянно испускать электромагнитное излучение.

Именно такую модель и создал Нагаока. Электрон, двигающийся вокруг ядра, и является этим зарядом и должен испускать излучение определенной частоты (как и в случае с искрами у Герца, см. гл. 2). Если электрон в минуту совершает 500 триллионов оборотов вокруг ядра (а это всего лишь 150 километров в секунду), то частота его излучения будет 500 триллионов Гц, а это в пределах видимой части спектра, ведь свет — это тоже электромагнитное излучение.

Предположение, конечно, красивое, но разрушить его все-таки придется. Если вращающийся электрон будет испускать излучение постоянно, то он будет терять энергию, а единственной энергией, которой обладает электрон, является кинетическая (т. е. энергия движения). Соответственно движение

¹ Эта картина атома стала весьма популярной в обществе, может быть, потому, что делала атом похожим на что-то уже известное. Несмотря на то что на смену планетарной модели атома приходили все более и более сложные, она прочно обосновалась в умах далеких от физики людей. В частности, было написано огромное количество научно-фантастических рассказов, где атомы воспринимались как крошечные солнечные системы: ядро являлось солнцем, электроны — планетами, иногда даже населенными человеческими существами.

электрона вокруг ядра должно постепенно замедляться, а сам электрон будет по спирали приближаться к ядру, пока не остановится окончательно и не притянется ядром¹.

Но раз электроны на ядро не падают, нужно создавать какую-то другую модель. Новая модель должна отражать тот факт, что атомы не только излучают (и поглощают) свет, но излучают и поглощают свет лишь определенной частоты. Для создания модели атома следует изучить взаимосвязи между этими уникальными световыми волнами, а отталкиваться нужно от водорода, поскольку водород излучает волны самого простого и упорядоченного спектра.

Длина волн, образующих самые четкие линии спектра водорода, составляет 656,21 миллимикрона, 486,08 миллимикрона, 434,01 миллимикрона, 396,81 миллимикрона и так далее. Расстояние между линиями уменьшается пошагово, значит, здесь определено должна быть какая-то закономерность.

В 1885 году немецкий математик Иоганн Якоб Бальмер (1825—1898) вывел простую формулу, по которой можно рассчитать длину этих волн:

$$\lambda = \frac{364,56m^2}{m^2 - 4}, \quad (\text{Уравнение 5.1})$$

где m может быть любым целым числом начиная с 3. Если $m = 3$, то l будет равна 656,21 миллимикрона, т. е. длине первой волны водородного спектра. Если подставлять вместо m числа 4, 5, 6, то l будет равна длине второй, третьей и четвертой линии водородного спектра. Эти линии получили название *серия Бальмера*.

С возрастом значения m значения $m^2 - 4$ знаменателя будет практически равно значению m^2 числителя, и дробь сократится. В этом случае l будет равно 364,56 миллимикрона (*постоянная Бальмера*). Именно к этому значению длины волны стремятся все линии серии Бальмера.

Через несколько лет шведский физик Юханнес Роберт Ридберг (1854—1919), преобразовав формулу Бальмера, сделал ее более удобной. Сначала он написал обратное уравнение:

¹ По аналогии вращающаяся вокруг Солнца Земля также должна постоянно испускать «гравитационное излучение». Однако сила притяжения настолько слабее электромагнитной (см. ч. II), что потери энергии в результате гравитационного излучения крайне малы. Пройдут многие триллионы лет, прежде чем Земля потеряет хоть сколь-нибудь заметную часть своей кинетической энергии. Электрон же находится под влиянием силы, во много раз превосходящей гравитацию, и поэтому ядро притянет его крайне быстро.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m^2 - 4}{364,56m^2}. \quad (\text{Уравнение 5.2})$$

Затем, умножив знаменатель и числитель дроби в правой части формулы 5.2 на 4, получил:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{4(m^2 - 4)}{364,56(4m^2)} = \frac{4}{364,56} \left(\frac{m^2 - 4}{4m^2} \right) = 0,0109 \left(\frac{m^2 - 4}{4m^2} \right). \quad (\text{Уравнение 5.3})$$

Давайте рассмотрим каждый член правой части формулы 5.3 по отдельности. Число 0,0109 получается делением 4 на балмерову константу. Это значение в миллимикронах. Ридберг предпочел использовать сантиметры, а раз в одном сантиметре 10 000 000 миллимикрон, то значение в сантиметрах будет $0,0109 \times 10\,000\,000 = 109$ (современные измерения дают значение 109 737 31). Это число получило название *постоянная Ридберга* и обозначается как *R*. Таким образом, в пересчете на сантиметры формула 5.3 будет выглядеть так:

$$\frac{1}{\lambda} = 109,73731 \left(\frac{m^2 - 4}{4m^2} \right) = R \left(\frac{m^2 - 4}{4m^2} \right). \quad (\text{Уравнение 5.4})$$

Получаем значение λ в сантиметрах, т. е. длина основной волны равна 0,000065621 см.

Теперь разложим $(m^2 - 4) / 4m^2$ на $m^2/4m^2 - 4/4m^2$ и сократим до $1/4 - 1/m^2$. Для симметрии представим 4 как $1/2^2 - 1/m^2$, тогда формула 5.4 приобретает вид:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (\text{Уравнение 5.5})$$

где m — любое целое число, равное и большее 3.

Формулы оставшихся линий будут выглядеть аналогично:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (\text{Уравнение 5.6})$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (\text{Уравнение 5.7})$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (\text{Уравнение 5.8})$$

и так далее. Значением m для формулы 5.6 должно быть любое целое число больше 1, для формулы 5.7 — больше 3, для формулы 5.8 — больше 4.

Формула 5.6 описывает волны ультрафиолетового спектра. Эти волны короче волн серии Бальмера. Они были открыты в 1906 году американским физиком Теодором Лайманом и получили название *волны серии Лаймана*.

Формула 5.7 описывает волны инфракрасного спектра. Они длиннее волн серии Бальмера. Они были открыты в 1908 году немецким физиком Фридрихом Пашеном и получили название *серия Пашена*. Формула 5.8 описывает еще более длинные волны, открытые американским физиком Фредериком Брэкеттом и получившие названия *серия Брэкетта*. Существуют также и другие серии волн.

Атом Бора

Итак, электроны атома водорода не только не падают на ядро, но еще и испускают волны определенной частоты, которые можно определить по простым формулам Ридберга. Нужна была новая модель атома, которая бы все это отражала.

Такую модель создал в 1913 году датский физик Нильс Бор (1885—1962). Он предложил использовать для решения задачи только в то время появляющуюся квантовую теорию (см. ч. II).

Согласно квантовой теории, любой преобразовывающий кинетическую энергию в излучение объект теряет эту энергию. Так, например, Земля постепенно теряет кинетическую энергию за счет вращения вокруг Солнца, однако эти потери настолько малы, что даже самые точные измерения не смогут зафиксировать какое-либо изменение в скорости вращения планеты.



Но с электронами дело обстоит иначе. Общая кинетическая энергия электрона немного превышает энергию одного кванта видимого света, то есть для излучения одного кванта света электрону потребуется мгновенно потратить всю свою энергию. Однако вместо того, чтобы медленно приближаться к ядру во время вращения (как это себе представляли физики «доквантовой» эры), электрон просто «перепрыгнет» на более близкую к ядру орбиту. С другой стороны, если электрон также еще и поглощает свет, значит, он сразу поглотит целый квант света и на этот раз перепрыгнет уже на более высокую орбиту.

Бор предположил, что электрон в основном состоянии обладает минимумом энергии и находится на ближайшей к ядру орбите. Такой электрон не выделяет энергию (истинная причина этого открылась лишь 10 лет спустя, см. гл. 6). После поглощения энергии электрон переходит в возбужденное состояние и в зависимости от количества этой энергии занимает одну из более удаленных от ядра орбит.

Бор определил несколько орбит электрона в атоме водорода в зависимости от величины кинетического момента. Используя постоянную Планка (см. ч. II), Бор вывел следующую формулу:

$$p = \frac{n\hbar}{2\pi}, \quad (\text{Уравнение 5.9})$$

где p — кинетический момент электрона, \hbar — постоянная Планка, π — это конечно же известная нам постоянная длины окружности; n — любое положительное целое. Теперь введем в формулу значение постоянной Планка, предположим, что электрон может двигаться только по определенным орбитам, применит за n любое целое число и получим *квантованный атом*.

В связанных с квантованным атомом вычислениях выражение $\hbar/2\pi$ используется часто, поэтому его обычно сокращают до \hbar . Так как значение \hbar приблизительно $6,6256 \times 10^{-27}$ эрг-с, значение π приблизительно 3,14159, то \hbar приблизительно равно $1,0545 \times 10^{-27}$ эрг-с.

Таким образом, формула 5.9 приобретает вид:

$$p = n (1,0545 \times 10^{-27}), \quad (\text{Уравнение 5.10})$$

Иногда n называют еще *главным квантовым числом* (кроме главного, существуют и другие квантовые числа). Это число обозначает орбиту, на которой находится электрон: $n = 1$ для ближайшей к ядру орбите; 2, 3, 4 и так далее — для более высоких.

Когда единственный электрон атома водорода опускается с орбиты 2 на орбиту 1, он выделяет один квант (определенного размера) энергии, т. е. излучение определенной частоты, и в определенном месте спектра появится яркая линия. (А когда единственный электрон атома водорода поднимается с орбиты 1 на орбиту 2, он поглощает один квант (того же определенного размера), и на месте яркой спектральной линии появится еще и темная.)

Если единственный электрон атома водорода опустится с орбиты 3 на орбиту 1, то энергии при этом выделится больше, и частота излучаемого света будет выше. При перемещении с орбиты 3 (4, 5) на орбиту 1 частота будет еще выше.

Серия перемещений с различных орбит на орбиту 1 приведет к излучению света последовательно повышающейся частоты (или последовательно понижающейся длины волны), то есть серии волн Лаймана. Серия перемещений с более высоких орбит на орбиту 2 приведет к появлению серии Бальмера, на орбиту 3 — серии Пашена и т. д.

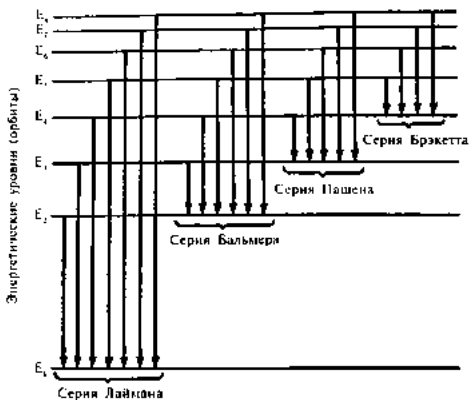
В описывающих длины волн спектральных линий различных серий формулах (5.5, 5.6, 5.7, 5.8) первое число знаменателя правой части и будет главным квантовым числом орбиты, куда опускается (или с которой поднимается) электрон.

Заряд ядра атомов более сложной, чем у водорода, структуры с несколькими электронами больше, следовательно, электроны на внутренней орбите удерживаются сильнее.

Поэтому для перемещения на более высокую орбиту электрону требуется больше энергии, а значит, и при переходе на более низкую орбиту энергии также освобождается больше. Самые короткие излучаемые водородом волны находятся в ультрафиолетовой части спектра (серия Лаймана), а более сложные атомы могут излучать и сверхкороткие рентгеновские лучи. Мозель обнаружил, что длина волн рентгеновского излучения уменьшается с возрастанием атомного числа элемента.

Дальше — хуже. Модель атома Бора вполне подходила для атомов водорода, чей спектр состоит из прямых линий. Однако более точный спектральный анализ показал, что спектральные линии водорода имеют тонкую структуру, состоящую из многих мелких линий, будто электрон при перемещении на другую орбиту «промахивается» и попадает на соседнюю.

Это едва не поставило крест на квантовой модели атома. Положение спас в 1916 году немецкий физик Арнольд Зоммерфельд (1868—1951), предложивший следующее объяснение: дело в том, что, по мнению Бора, электронные орбиты имели четкую форму круга, однако Зоммерфельд предположил, что она



Атом Бора

может быть и эллиптической. Квантовая модель атома допускала существование орбит с небольшим эксцентриситетом эллипса, а главное квантовое число — группы орбит, состоящих из одной круговой и нескольких эллиптических, так как изменения кинетического момента были незначительными.

Для эллиптических орбит Зоммерфельд ввел понятие *орбитального квантового числа*, получившего обозначение L^1 . Орбитальное квантовое число может принимать любое значение в пределах от 0 до $n - 1$, то есть при $n = 1$ $L = 0$; при $n = 2$ $L = 0$ или 1; при $n = 3$ $L = 0, 1$ или 2 и т. д.

Но спектральные линии под действием магнитного поля расходятся еще больше. Ученые приняли это во внимание и ввели *магнитное квантовое число* (m).

С появлением магнитного атомного числа атом стали рассматривать уже в трех измерениях. Теперь варьировалась не только форма орбиты электрона, но и ее наклон относительно

¹ Вообще-то это число принято обозначать строчной латинской «l», но начертание строчной буквы схоже с начертанием цифры «1», поэтому, во избежание путаницы, я и использую прописную «L».

основной. Для m справедливы все значения L , кроме того, к положительным значениям добавились еще и отрицательные. То есть если для $n = 2$ $L = 1$ или 0 , а $m = 0, 1$ и -1 ; для $n = 3$ $L = 0, 1$ или 2 , а $m = 0, 1, 2, -1$ или -2 и т. д.

Последнее квантовое число — *число спина электрона* (s). Оно обозначает спин, т. е. направление вращения электрона вокруг своей оси, а поскольку таких направлений всего два — по часовой стрелке и против часовой, то и квантовое число может принимать лишь два значения: $1/2$ и $-1/2$.

Электронные подболочки

Электроны могут находиться лишь на описанных квантовыми числами орбитах. Когда электронов несколько (а у всех элементов, кроме водорода, их по два и более), они распределяются по орбитам, причем первой заполняется ближняя к ядру орбита.

Но сколько электронов могут находиться на одной и той же орбите одновременно? В 1925 году австрийский физик Вольфганг Паули (1900—1958) предположил, что, раз спектр каждого элемента уникален, значит, внутри каждого атома не могут существовать электроны с идентичными квантовыми числами, хотя бы одно из четырех должно отличаться. То есть на произвольной орбите, будь то круговая, эллиптическая или наклоненная, могут вращаться максимум 2 электрона, причем один из них по часовой стрелке, а второй — против. Этот принцип существования двух электронов с противоположными спинами называется *принцип исключения Паули*.

Теперь мы можем определить количество электронов на каждой представленной соответствующим квантовым числом группе орбит.

Пусть $n = 1$, тогда $L = 0$ и $m = 0$, т. е. характеристики единственной орбиты — $1/0/0$. На такой орбите могут находиться два электрона с противоположными спинами. Общим числом электронов первой группы орбит ($n = 1$) является 2.

Теперь предположим, что $n = 2$, тогда $L = 0$ или 1 , а $m = 0, 1$ или -1 ; при $L = 0$ и $m = 0$. Тогда для $n = 2$ существуют 4 возможные орбиты: $2/0/0$, $2/1/0$, $2/1/1$ и $2/1/-1$. На каждой из этих орбит могут находиться по два электрона с противоположными спинами, следовательно, общее число электронов второй группы орбит — 8.

Таким же образом можно определить, что общее число электронов следующей группы орбит ($n = 3$) равняется 18. То

есть максимальное количество электронов группы орбит n можно вычислить по формуле $2n^2$. Отсюда для группы орбит 4 ($n = 4$) общим числом электронов является 32, для $n = 5 — 50$ и т. д.

В физике группы орбит, представленные главным квантовым числом n , соответствуют электронным оболочкам в химии, представленным в модели атома Льюиса—Ленгмюра.

Общее количество электронов группы орбит можно согласно значению L разделить на подоболочки. Например, если $n = 1$, то $L = 0$, значит, первая электронная оболочка состоит всего лишь из одной подоболочки, где могут находиться 2 электрона.

Если $n = 2$, то $L = 0$ и 1. При $L = 0$ орбита всего одна ($2/0/0$), соответственно электронов максимум 2; но при $L = 1$ орбит уже 3 ($2/1/0$, $2/1/1$, $2/1/-1$) и максимальное количество электронов — 6. Итого на второй оболочке 8 электронов, составляющих две подоболочки: на одной 2 электрона, на второй — 6.

Точно так же 18 электронов третьей оболочки можно разделить на 3 подоболочки по 2, 6 и 8 электронов. Вообще электроны оболочки с главным квантовым числом n можно разделить на n подоболочек: первая подоболочка будет содержать 2 электрона, а каждая последующая — на 4 электрона больше, чем предыдущая (то есть 6, 10, 14, 18 и т. д.).

Эти подгруппы обозначаются латинскими s , p , d , f , g , h и i . То есть первая оболочка состоит из $1s$ подоболочки, вторая — из $2s$ и $2p$ подоболочек и т. д.

Теперь давайте попробуем применить все это собственно к химическим элементам. Первые два никаких трудностей не вызывают. У водорода 1 электрон, у гелия — 2, и все они находятся на единственной подоболочке первой электронной оболочки.

| Элемент | Количество электронов на $1s$ | Атомное число |
|---------|-------------------------------|---------------|
| Водород | 1 | 1 |
| Гелий | 2 | 2 |

У всех элементов с атомным числом больше 2 на первой оболочке по 2 электрона. Оставшиеся электроны распределяются по внешним оболочкам. Следующие восемь элементов распределяют эти электроны на второй электронной оболочке, состоящей из $2s$ подоболочки (вмещает 2 электрона) и $2p$ подоболочки (вмещает 6 электронов).

| Элемент | Количество электронов на | | | Атомное число |
|----------|--------------------------|----|----|---------------|
| | 1s | 2s | 2p | |
| Литий | 2 | 1 | — | 3 |
| Бериллий | 2 | 2 | — | 4 |
| Бор | 2 | 2 | 1 | 5 |
| Углерод | 2 | 2 | 2 | 6 |
| Азот | 2 | 2 | 3 | 7 |
| Кислород | 2 | 2 | 4 | 8 |
| Фтор | 2 | 2 | 5 | 9 |
| Неон | 2 | 2 | 6 | 10 |

У атома неона вторая электронная оболочка заполнена, и в атомах следующих элементов заполняется уже третья электронная оболочка. Эта оболочка состоит уже из 3 подоболочек: 3s (2 электрона), 3p (6 электронов), 3d (до 10 электронов).

| Элемент | Количество электронов на | | | | | Атомное число |
|----------|--------------------------|----------|----|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s | 3p | 3d | |
| Натрий | 2 | 8 | 1 | — | — | 11 |
| Магний | 2 | 8 | 2 | — | — | 12 |
| Алюминий | 2 | 8 | 2 | 1 | — | 13 |
| Кремний | 2 | 8 | 2 | 2 | — | 14 |
| Фосфор | 2 | 8 | 2 | 3 | — | 15 |
| Сера | 2 | 8 | 2 | 4 | — | 16 |
| Хлор | 2 | 8 | 2 | 5 | — | 17 |
| Аргон | 2 | 8 | 2 | 6 | — | 18 |

Обратите внимание на сходство заполнения оболочек этих элементов и элементов предыдущего списка. Одинаково заполнены 2s2p атома лития и 3s3p натрия; 2s2p бериллия и 3s3p магния; 2s2p бора и 3s3p алюминия и т. д. Вот почему таблица химических элементов является периодической.

У атома аргона на 3s и 3p подоболочках по 2 и 6 электронов соответственно — столько же, сколько и у неона на 2s и 2p. Оба этих элемента относятся к благородным газам. В то же время 3d подоболочка атома аргона не заполнена полностью — там есть место для 10 электронов. Значит, инертность благородных газов определяется полным заполнением s и p подоболочек внешней электронной оболочки их атомов, содержащих в общей сложности 8 электронов. Таким образом, наличие этого количества электронов на внешней оболочке является признаком благородного газа. Единственное исключение составляет гелий, у которого всего одна подоболочка (1s), которая также полностью заполнена.

Вы, возможно, предполагаете, что в атомах следующих за аргоном элементов заполнена подоболочка $3d$. Однако это не так. Дело в том, что каждому электрону, условно говоря, требуется место, а каждая оболочка атома содержит все больше и больше электронных подоболочек, и в конце концов внешние подоболочки одной электронной оболочки начинают перекрывать внутренние подоболочки другой. В данном случае подоболочка $3d$ перекрывает подоболочку $4s$. То есть заполняется подоболочка $4s$, а не $3d$.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | Атомное число |
|---------|--------------------------|--------------|--------------|------|------|---------------|
| | $1s$ | $2s$ $2p$ | $3s$ $3p$ | $3d$ | $4s$ | |
| Калий | 2 | 8 | 8 | — | 1 | 19 |
| Кальций | 2 | 8 | 8 | — | 2 | 20 |

У кальция 1 электрон на подоболочке $4s$, как у натрия на $3s$ и лития на $2s$. Подобную аналогию можно провести между кальцием, магнием и бериллием.

Переходные элементы

Если бы у атома скандия, следующего за кальцием элементом, на $4p$ подоболочке был 1 электрон, то его s и p подоболочки были бы заполнены так же, как у алюминия (2 и 1 электрон). Этого, однако, не происходит. На $4s$ подоболочке атомов следующих за кальцием элементов 2 электрона (как у и кальция), а остальные электроны заполняют подоболочку $3d$:

| Элемент | Количество электронов на | | | | | Атомное число |
|----------|--------------------------|--------------|--------------|------|------|---------------|
| | $1s$ | $2s$ $2p$ | $3s$ $3p$ | $3d$ | $4s$ | |
| Скандий | 2 | 8 | 8 | 1 | 2 | 21 |
| Титан | 2 | 8 | 8 | 2 | 2 | 22 |
| Ванадий | 2 | 8 | 8 | 3 | 2 | 23 |
| Хром | 2 | 8 | 8 | 5 | 1 | 24 |
| Марганец | 2 | 8 | 8 | 5 | 2 | 25 |
| Железо | 2 | 8 | 8 | 6 | 2 | 26 |
| Кобальт | 2 | 8 | 8 | 7 | 2 | 27 |
| Никель | 2 | 8 | 8 | 8 | 2 | 28 |
| Медь | 2 | 8 | 8 | 10 | 1 | 29 |
| Цинк | 2 | 8 | 8 | 10 | 2 | 30 |

Подоболочки $3d$ и $4s$ перекрывают друг друга достаточно нечетко, поэтому количество электронов на $3d/4s$ можно представить и как $5/1$, и как $4/2$, или, скажем, и как $10/1$, и как $9/2$. Впрочем, в случае с хромом и медью принято считать, что у них по одному электрону на $4s$, ну да это не столь важно.

А важно то, что различия между этими десятью элементами (от скандия до цинка) заключаются в количестве электронов на подоболочке $3d$, и то время как на внешней $4s$ подоболочке у всех (или почти у всех) количество электронов одинаково. Эти элементы называются *переходными элементами*. Они мало отличаются друг от друга по свойствам, и то время как разница между элементами от водорода до кальция (у которых по-разному заполняется именно внешняя подоболочка) очевидна.

Кобальт, железо и никель настолько похожи друг на друга, что ученые объединяют их в одно семейство элементов.

Однако модель атома Льюиса—Ленгмюра не допускает изменения количества электронов на внутренних оболочках и поэтому неприменима к переходным элементам, а ведь $\frac{1}{3}$ всех элементов являются именно переходными.

У цинка третья электронная оболочка (18) и подоболочка $4s$ (6) заполнены полностью, поэтому в атомах элементов с большим атомным числом заполняется подоболочка $4p$.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | Атомное число |
|----------|--------------------------|----------|----------------|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s | 4p | |
| Галлий | 2 | 8 | 18 | 2 | 1 | 31 |
| Германий | 2 | 8 | 18 | 2 | 2 | 32 |
| Мышьяк | 2 | 8 | 18 | 2 | 3 | 33 |
| Селен | 2 | 8 | 18 | 2 | 4 | 34 |
| Бром | 2 | 8 | 18 | 2 | 5 | 35 |
| Криптон | 2 | 8 | 18 | 2 | 6 | 36 |

У этих шести элементов подоболочки s и p заполнены так же, как у соответствующих элементов от алюминия до аргона и от бора до неона, поэтому галлий обладает свойствами, схожими с алюминием и бором, германий — с углеродом и кремнием и т. д. У криптона на $4s$ два электрона, а на $4p$ — 6 электронов, значит, криптон является благородным газом.

$4d$ (10 электронов) и $4f$ (14 электронов) подоболочки четвертой электронной оболочки перекрывают внутреннюю $5s$ подоболочку пятой электронной оболочки.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | Атомное число |
|----------|--------------------------|----------|----------------|----------|----|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p | 4d | 4f | 5s | |
| Рубидий | 2 | 8 | 18 | 8 | — | — | 1 | 37 |
| Стронций | 2 | 8 | 18 | 8 | — | — | 2 | 38 |

У следующих элементов заполняется 4d подоболочка, значит, они так же, как и элементы от скандия до цинка, являются переходными.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | Атомное число |
|----------|--------------------------|----------|----------------|----------|----|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p | 4d | 4f | 5s | |
| Иттрий | 2 | 8 | 18 | 8 | 1 | — | 2 | 39 |
| Цирконий | 2 | 8 | 18 | 8 | 2 | — | 2 | 40 |
| Ниобий | 2 | 8 | 18 | 8 | 4 | — | 1 | 41 |
| Молибден | 2 | 8 | 18 | 8 | 5 | — | 1 | 42 |
| Технеций | 2 | 8 | 18 | 8 | 5 | — | 2 | 43 |
| Рутений | 2 | 8 | 18 | 8 | 7 | — | 1 | 44 |
| Родий | 2 | 8 | 18 | 8 | 8 | — | 1 | 45 |
| Палладий | 2 | 8 | 18 | 8 | 10 | — | — | 46 |
| Серебро | 2 | 8 | 18 | 8 | 10 | — | 1 | 47 |
| Кадмий | 2 | 8 | 18 | 8 | 10 | — | 2 | 48 |

У следующих шести элементов заполняется 5p подоболочка, они не являются переходными, а соотношение электронов на s и p у них такое же, как и группы элементов от бора до неона.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | Атомное число |
|---------|--------------------------|----------|----------------|----------------|----|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p 4d | 4f | 5s | 5p | |
| Индий | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 2 | 1 | 49 |
| Олово | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 2 | 2 | 50 |
| Сурьма | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 2 | 3 | 51 |
| Теллур | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 2 | 4 | 52 |
| Йод | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 2 | 5 | 53 |
| Ксенон | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 2 | 6 | 54 |

Ксенон также является благородным газом.

Оставшиеся подоболочки 4f (14 электронов), 5d (10), 5f (14) и 5g (18) перекрывают подоболочку 6s.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | | | | Атомное число |
|---------|--------------------------|----------|----------------|----------------|----|----------|----|----|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p 4d | 4f | 5s 5p | 5d | 5f | 5g | 6s | |
| Цезий | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 8 | — | — | — | 1 | 55 |
| Барий | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 8 | — | — | — | 2 | 56 |

У элементов начиная с лантана электроны появляются на подоболочках $4f$ и $5d$, и эти элементы представляют собой уже несколько иную группу переходных элементов. Если у предыдущих групп переходных элементов (от скандия до цинка и от иттрия до кадмия) заполняемая электронная подоболочка перекрывалась лишь одним или двумя электронами следующей оболочки, то $4f$ подоболочка лантаноидов перекрывается не только двумя электронами $5s$ подоболочки, но и шестью электронами $5p$ и двумя электронами $6s$. То есть у лантаноидов, в отличие от других переходных элементов, заполняется «более глубокая» подоболочка атома, которая сильнее перекрывается другими подоболочками. Именно поэтому лантаноиды настолько между собой похожи.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | | | | Атомное число |
|-----------|--------------------------|----------|----------------|----------------|----|----------|----|----|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p 4d | 4f | 5s 5p | 5d | 5f | 5g | 6s | |
| Лантан | 2 | 8 | 18 | 18 | — | 8 | 1 | — | — | 2 | 57 |
| Церий | 2 | 8 | 18 | 18 | 1 | 8 | 1 | — | — | 2 | 58 |
| Прозеодим | 2 | 8 | 18 | 18 | 3 | 8 | — | — | — | 2 | 59 |
| Неодим | 2 | 8 | 18 | 18 | 4 | 8 | — | — | — | 2 | 60 |
| Прометий | 2 | 8 | 18 | 18 | 5 | 8 | — | — | — | 2 | 61 |
| Самарий | 2 | 8 | 18 | 18 | 6 | 8 | — | — | — | 2 | 62 |
| Европий | 2 | 8 | 18 | 18 | 7 | 8 | — | — | — | 2 | 63 |
| Гадолиний | 2 | 8 | 18 | 18 | 7 | 8 | 1 | — | — | 2 | 64 |
| Тербий | 2 | 8 | 18 | 18 | 8 | 8 | 1 | — | — | 2 | 65 |
| Диспрозий | 2 | 8 | 18 | 18 | 9 | 8 | 1 | — | — | 2 | 66 |
| Гольмий | 2 | 8 | 18 | 18 | 10 | 8 | 1 | — | — | 2 | 67 |
| Эрбий | 2 | 8 | 18 | 18 | 11 | 8 | 1 | — | — | 2 | 68 |
| Тулий | 2 | 8 | 18 | 18 | 13 | 8 | — | — | — | 2 | 69 |
| Иттербий | 2 | 8 | 18 | 18 | 14 | 8 | — | — | — | 2 | 70 |
| Лютеций | 2 | 8 | 18 | 18 | 14 | 8 | 1 | — | — | 2 | 71 |

У лютеция и последующих элементов заполняется подоболочка $5d$ (до 10 электронов). Электроны этой подоболочки перекрываются двумя электронами подоболочки $6s$, т. е. эти элементы являются обычными переходными элементами.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | | | Атомное число |
|----------|--------------------------|----------|----------------|----------------------|----------|----|----|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p 4d 4f | 5s 5p | 5d | 5f | 5g | 6s | |
| Гафний | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 2 | — | — | 2 | 72 |
| Тантал | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 3 | — | — | 2 | 73 |
| Вольфрам | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 4 | — | — | 2 | 74 |
| Рений | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 5 | — | — | 2 | 75 |
| Осмий | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 6 | — | — | 2 | 76 |
| Иридий | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 7 | — | — | 2 | 77 |
| Платина | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 9 | — | — | 1 | 78 |
| Золото | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 10 | — | — | 1 | 79 |
| Ртуть | 2 | 8 | 18 | 32 | 8 | 10 | — | — | 2 | 80 |

У элементов начиная со ртути подоболочка $5d$ заполнена, подоболочки $5f$ и $5g$ остаются нетронутыми, а заполняется подоболочка $6p$. Налицо такое же, как у элементов от бора до неона, соотношение электронов на s и p .

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | | | Атомное число |
|---------|--------------------------|----------|----------------|----------------------|----------------|----|----|----|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p 4d 4f | 5s 5p 5d | 5f | 5g | 6s | 6p | |
| Таллий | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 2 | 1 | 81 |
| Свинец | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 2 | 2 | 82 |
| Висмут | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 2 | 3 | 83 |
| Полоний | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 2 | 4 | 84 |
| Астатин | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 2 | 5 | 85 |
| Радон | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 2 | 6 | 86 |

Радон является благородным газом.

Остаются еще подоболочки $5f$ (14 электронов), $5g$ (18), $6d$ (10), $6f$ (14), $6g$ (18) и $6h$ (22). Все они перекрывают подоболочку $7s$.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | | | | | Атомное число | | |
|---------|--------------------------|----------|----------------|----------------------|----------------|----|----|----------|----|----|----|---------------|----|----|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p 4d 4f | 5s 5p 5d | 5f | 5g | 6s 6p | 6d | 6f | 6g | | 6h | 7s |
| Франций | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 8 | — | — | — | — | 1 | 87 |
| Радий | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 8 | — | — | — | — | 2 | 88 |

У следующих элементов электронные подоболочки заполняются так же, как и у лантаноидов.

| Элемент | Количество электронов на | | | | | | | | | | | Атомное число |
|-------------|--------------------------|----------|----------------|----------------------|----------------|----|----|----------|----|----------------|----|---------------|
| | 1s | 2s 2p | 3s 3p 3d | 4s 4p 4d 4f | 5s 5p 5d | 5f | 5g | 6s 6p | 6d | 6f 6g 6h | 7s | |
| Актиний | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 8 | 1 | — | 2 | 89 |
| Торий | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | — | — | 8 | 2 | — | 2 | 90 |
| Протактиний | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 2 | — | 8 | 1 | — | 2 | 91 |
| Уран | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 3 | — | 8 | 1 | — | 2 | 92 |
| Нептуний | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 4 | — | 8 | 1 | — | 2 | 93 |
| Плутоний | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 5 | — | 8 | 1 | — | 2 | 94 |
| Америкум | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 7 | — | 8 | — | — | 2 | 95 |
| Кюрий | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 7 | — | 8 | 1 | — | 2 | 96 |
| Беркелий | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 8 | — | 8 | 1 | — | 2 | 97 |
| Калифорний | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 9 | — | 8 | 1 | — | 2 | 98 |
| Эйхштейний | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 10 | — | 8 | 1 | — | 2 | 99 |
| Фермий | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 11 | — | 8 | 1 | — | 2 | 100 |
| Менделевий | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 12 | — | 8 | 1 | — | 2 | 101 |
| Нобелий | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 13 | — | 8 | 1 | — | 2 | 102 |
| Лавренций | 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 14 | — | 8 | 1 | — | 2 | 103 |

Элементы от актиния до лавренция называются актиноидами. Хотя элемент с атомным числом 104 пока не открыт, у ученых есть все основания полагать, что его 104-й электрон займет подоболочку *6d*, а химические свойства самого элемента будут схожи с гафнием.

Теперь становится очевидным, что в периодической таблице элементы расположены согласно размещению электронов на электронных оболочках их атомов.

Глава 6

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ

Полупроводники

Итак, теория электронных оболочек и подоболочек объяснила феномен периодической системы и свойства лантаноидов, однако модель атома Бора, даже модифицированную Зоммерфельдом, она спасти не смогла. Попытка ученых представить атом в виде совокупности ядра и вращающихся вокруг него по

орбитам электронов (пусть даже и гораздо более сложным, чем у космических тел) окончилась полным провалом.

В начале 1920-х годов понятие орбиты было заменено понятием *энергетического уровня*. Электроны переходят с одного энергетического уровня на другой, а разница между энергетическими уровнями определяет размер выделяемого или поглощаемого кванта (в данном случае частоту излучения).

В 1925 году немецкий физик Вернер Гейзенберг (1901–1976) разработал систему численного обозначения энергетических уровней. Все числа были внесены в матрицы, что дало возможность применять к ним правила матричной алгебры. Для точного расчета спектральных линий достаточно было лишь внести в матрицу данные об атоме (*матричная механика*). При таком подходе атом становился лишь набором цифр, и поэтому никакая модель атома вообще была не нужна.

Энергетические уровни простого атома можно изобразить несколькими простыми линиями на определенном расстоянии от схематического рисунка атомного ядра. Два электрона с противоположными спинами могут занимать любой энергетический уровень, а также переходить на любой другой свободный или частично свободный энергетический уровень, однако в промежутках между линиями электроны находиться не могут. Эти промежутки получили название *запрещенная энергетическая зона*. Конечно же размеры линий и промежутков для каждого элемента уникальны.

Все становится сложнее, когда два атома элемента располагаются в непосредственной близости. В этом случае внешние электронные уровни этих атомов сливаются в один. Соответственно относительно каждого атома количество электронов на внешнем уровне удваивается. Но так как на одном электронном уровне электроны с одинаковыми спинами находиться не могут, то внешние энергетические уровни этих атомов вместе со своими электронами немного отодвигаются друг от друга: один становится выше, другой — ниже.

Такой процесс особенно характерен для твердых веществ, где практически все атомы расположены близко друг к другу, то есть энергетические уровни твердых веществ — это уже не простые линии, а тесное скопление нескольких чуть отличных друг от друга линий. Это уже не энергетический уровень, а *энергетическая зона*. Электроны могут переходить из одной зоны в другую, но они не могут находиться в запрещенных энергетических зонах.

Если внешние энергетические уровни атомов твердых элементов заполнены полностью, то заполнена и энергетическая

зона. В этом случае электроны не могут переходить из одного атома в другой, так как внешние энергетические уровни соседних атомов также заполнены. Такие вещества с фиксированным положением электронов в атомах не проводят электрический ток. Абсолютно не проводят ток, например, сера и кварц.

Если же внешние энергетические уровни заполнены не полностью, то энергетическая зона также заполнена не полностью, и электроны могут легко путешествовать из одного атома в другой по этим энергетическим уровням, а посредством этих свободных электронов такие вещества могут проводить электрический ток. Это свойство наиболее ярко выражено у серебра и меди.

Однако электрический ток проводят и некоторые вещества с полностью заполненной энергетической зоной. Дело в том, что над заполненной энергетической зоной существует еще одна, совершенно пустая зона, и под действием поглощаемой энергии электроны могут переходить из заполненной энергетической зоны в пустую. Здесь существует одно ограничение: ширина запрещенной энергетической зоны должна быть небольшой. Если же расстояние между энергетическими зонами велико, то вещество проводником не является.

У атомов некоторых элементов (например, кремния и германия) ширина запрещенной зоны относительно мала, что делает возможным переход электрона из одной зоны в другую. Такие элементы называются *полупроводниками*. С повышением температуры, то есть с увеличением количества энергии, возрастает и вероятность перехода электронов на зону выше. Таким образом, сопротивление полупроводника с повышением температуры падает (в отличие от металлов, так как в металлах с повышением температуры увеличивается частота колебаний атомов, что затрудняет переход электронов из одного атома в другой, то есть электрическое сопротивление металлов с ростом температуры повышается).

После некоторых изменений структуры этих элементов химические и физические свойства полупроводников оказались крайне полезными для человека.

Например, у германия, как и углерода, на внешней оболочке 4 электрона, каждый из которых может образовать общую электронную оболочку с одним электроном другого атома, таким образом образуются группы из четырех атомов. В этом случае все электроны закреплены на своих орбитах, поэтому германий практически не проводит ток.

Все это справедливо только в случае плотного прилегания атомов друг к другу. Но если кристалл германия неидеален, то

отдельные атомы уже не могут образовывать общие электронные оболочки, и свободные электроны этих атомов способны проводить электрический ток.

Впрочем, практически все кристаллы германия содержат примеси. Если же специально добавить примесь, скажем, мышьяка, то полупроводниковые свойства германия возрастают. У атома мышьяка 5 электронов на внешней электронной оболочке, поэтому при соединении с германием только 4 из этих пяти электронов формируют общие орбиты с атомами германия, а оставшийся как раз и становится свободным электроном.

Под действием электрического тока свободные электроны внутри кристалла перемещаются от отрицательного электрода к положительному, так как электроны — отрицательно заряженные частицы. Такой полупроводник называется *электроным*, или *полупроводником n-типа*.

Теперь рассмотрим кристалл германия с примесью бора. У атома бора на внешней оболочке 3 электрона, каждый из которых формирует общие электронные оболочки с 3 атомами бора, а у четвертого на внешней электронной оболочке вместо электрона будет «дырка».

Под действием электрического тока в эту дырку попадает электрон, отталкиваемый отрицательным и притягиваемый положительным электродом. Заняв следующую дырку, электрон освобождает предыдущую, и получается, что сама дырка перемещается от положительного электрода к отрицательному, то есть движение дрейфующей дырки можно сравнить с поведением положительно заряженной частицы. Такой полупроводник называется *дырочным полупроводником*, или *полупроводником p-типа*.

Полупроводниковые устройства

Контролируя дрейф электронов внутри полупроводников, можно заменить устройствами на их основе вакуумные приборы. Так как в таких *полупроводниковых устройствах* вместо вакуума используются твердые вещества, их еще иногда называют *твердотельными*.

Представьте себе кристалл, одна часть которого имеет *n-тип* и подключена к «минусу» батареи, а вторая — *p-тип* и подключена к «плюсу». Когда цепь замкнута, электроны первой части отталкиваются от отрицательного электрода и устремляются к месту перехода между двумя половинами, а дырки второй части отталкиваются от положительного электрода и также устрем-



ляются к месту перехода. Там электроны нейтрализуют дырки и, отталкиваясь от положительного электрода, создают новые. Таким образом, все время, пока замкнута электрическая цепь, в кристалле течет ток.

А теперь представьте, что кристалл подключен к батарее наоборот: половина n -типа — к «плюсу», а p -типа — к «минусу». В этом случае электроны притягиваются к положительному электроду, дырки — к отрицательному, и сначала в месте перехода, а затем и во всем кристалле не остается ни дырок, ни свободных электронов, то есть кристалл перестает проводить ток.

Короче говоря, в таком n - p -кристалле ток течет лишь в одном направлении. Такой n - p -кристалл может выпрямлять переменный ток. Кроме того, его часть n -типа может заменить нить вакуумной трубки, а часть p -типа — пластину, а сам кристалл будет работать как диод. Такое устройство называется *диодом на p - n -переходе*.

Полупроводниковые аналоги существуют и у триодов. В этом случае кристалл состоит из трех зон: n -типа по бокам и p -типа в середине. Зона p -типа является модулятором. Таким образом, в таком кристалле два перехода — n - p и p - n .

Если подключить один конец кристалла к «минусу», а второй — к «плюсу» батареи, то электроны, отталкиваемые отрицательным электродом, устремятся к зоне p -типа, а электроны, притягиваемые положительным полюсом, будут удаляться от зоны p -типа, и за счет этого начнут двигаться электроны зоны p -типа. То есть электроны будут перемещаться из одного конца кристалла в другой, при этом p -зона будет тормозить их движение. Изменяя заряд зоны p -типа, можно регулировать скорость электронного потока.

Такой триод был впервые создан в 1948 году английским физиком Уильямом Шокли (1910—1989) совместно с американ-

скими физиками Джоном Бардином (1908—1991) и Уолтером Браттейном (1902—1987). Устройство получило название *плоскостной полупроводниковый триод*, или *транзистор* (от англ. *transfer* — проводить и *resistor* — сопротивление. — Пер.).

В природе иногда встречаются неидеальные кристаллы полупроводников с примесью других элементов в нужной пропорции. В первые дни радио, еще до появления электровакуумных приборов, такие кристаллы уже использовались для выпрямления электрического тока. Приемники на таких кристаллах назывались *детекторными*.

В свое время развитие электровакуумных ламп привело к прекращению использования детекторных приемников, однако появление транзисторов возродило кристалл. У транзисторов несколько преимуществ по сравнению с лампами. Транзисторы твердотельные, им не нужен вакуум, а значит, и ударопрочность у них выше. Так как у транзисторов нет нити накаливания, то, в отличие от ламп, им не нужно разогреваться, да и работают они дольше. А самое главное — размеры транзистора могут быть в десятки, сотни, тысячи раз меньше, чем у вакуумной трубки.

Радиоприемник на лампах — это большой и громоздкий ящик, а транзисторный радиоприемник можно сделать размером с пачку сигарет. Использование транзисторов привело к миниатюризации абсолютно всех приборов. Особенно это заметно в вычислительной технике, ведь количество ламп в ламповых компьютерах достигает нескольких тысяч! С появлением транзисторов размеры таких компьютеров уменьшились в десятки раз.

Полупроводники можно также использовать для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую. Феномен термоэлектричества был открыт в 1921 году немецким физиком Томасом Иоганном Зеебеком (1770—1831). Он обнаружил, что если при нагревании двух различных соединенных между собой металлов поместить в месте соприкосновения этих металлов иголку, то она будет отклоняться. Феномен получил название *явление Зеебека*, или *термоэлектрический эффект*.

Таким образом, при нагревании в цепи появляется электрический ток, который и приводит к возникновению магнитного поля. Однако Зеебек полагал, что эффект этот чисто магнитный, а не электромагнитный (в то время ученые только начинали говорить о связи между электричеством и магнетизмом, и интерес к явлению Зеебека угас вплоть до середины XX века).

Рассмотрим полупроводник *n*-типа, одна сторона которого подвергается нагреванию. Электроны этой половины под дей-

ствием температуры будут перемещаться на одну энергетическую зону, откуда они и начнут дрейфовать к холодному концу кристалла. В кристалле возникает электрический ток (холодная половина — «минус», горячая — «плюс»). То же самое происходит и в обычном проводнике, однако в холодной половине обычного проводника и без того много свободных электронов, которые начнут отталкивать электроны, поступающие из нагреваемой половины, и электрический ток будет крайне слабым. А в холодной половине полупроводника свободных электронов практически нет, значит, и дрейфующие электроны отталкивать нечему, поэтому при нагревании в полупроводнике возникает гораздо больший, чем в обычном проводнике, электрический потенциал.

При нагревании одного конца полупроводника p -типа под действием энергии извне электроны становятся гораздо более подвижными и дырки этой половины заполняются быстрее, а в холодной половине образуются новые дырки. Таким образом, дырки дрейфуют от нагреваемого конца кристалла к холодному и в полупроводнике появляется электрический ток (нагреваемая часть — «минус», холодная — «плюс»).

Если соединить полупроводники n -типа и p -типа и подвергнуть место соединения нагреванию, то электроны холодной половины полупроводника p -типа через переход устремятся в сторону холодного конца полупроводника n -типа. Если подключить такой кристалл в электрическую цепь, то, пока кристалл подвергается нагреванию, в цепи будет электрический ток. Таким образом, с помощью полупроводника и, например, керосиновой лампы можно создать генератор электрического тока без движущихся частей.

Можно добиться и обратного эффекта. Если пропустить электрический ток через электрическую цепь из нескольких полупроводников, то кристаллы начнут выделять тепло. Это явление впервые наблюдал французский физик Жан Шарль Пельтье (1785—1845) в 1834 году, поэтому оно и получило название *эффект Пельтье* (или *электротермический эффект*). Если же пропустить электрический ток через соединенные с одного конца кристаллы полупроводников p -типа и n -типа, то один конец такого кристалла будет нагреваться, а второй, наоборот, охлаждаться.

С помощью полупроводников можно также преобразовывать свет в электрическую энергию. Такая *солнечная батарея* состоит из полупроводника n -типа, покрытого тонким слоем полупроводника p -типа. В части n -типа присутствует огромное количество свободных электронов, которые устремляются в дырки части p -типа, и, пока все дырки не заполнены, между двумя по-

лупроводниками на очень короткое время возникает электрический ток.

Когда на такой кристалл падает солнечный свет, то под действием энергии электроны вновь возвращаются в часть *n*-типа, а в части *p*-типа образуются новые дырки, то есть электрический ток будет возникать постоянно. Солнечные батареи успешно используются для питания искусственных спутников Земли.

Матеры и лазеры

Электронные уровни находятся на определенном расстоянии друг от друга, а заполняться могут только путем выделения или поглощения фотонов определенного размера. Именно этот факт привел к появлению очень важных электротехнических устройств.

Например, у молекулы аммиака (NH_3) 2 энергетических уровня, разделенные запрещенной энергетической зоной, ширина которой соответствует размеру заряда фотона, необходимого для излучения микроволны частотой 24 млрд Гц, то есть 1,25 см.

Разницу между энергетическими уровнями можно рассмотреть с геометрической точки зрения. Тогда 3 атома водорода молекулы аммиака можно представить как три вершины равно-стороннего треугольника, а атом азота будет располагаться на некотором расстоянии от центра этого треугольника. При изменении количества электронов на энергетическом уровне атом азота перейдет на другую сторону треугольника сквозь его плоскость. Таким образом, молекулу аммиака можно заставить вибрировать с частотой 24 млрд раз в секунду.

Этот период колебания повторяется с чрезвычайной точностью. Точность эта гораздо выше, чем у любого созданного человеком устройства, и даже точнее движения космических тел. На основе такой молекулы можно создавать высокоточные *атомные часы*, погрешность которых — всего одна секунда на 100 000 лет.

Теперь рассмотрим только лишь энергетические уровни. При прохождении микроволн через газообразный аммиак молекулы поглощают часть микроволновой энергии и поднимаются на уровень выше (из центра к периферии. — *Пер.*).

Но что происходит с теми молекулами, которые уже находятся на высшем уровне? В 1917 году Эйнштейн выявил, что когда фотон определенного размера ударяется о такую молекулу, то молекула переходит на уровень ниже, двигаясь в том же, что и фотон, направлении и испуская фотон излучения

того же размера. То есть под действием микроволнового излучения молекулы аммония будут либо подниматься с нижних уровней на верхние, либо опускаться с верхних на нижние. При нормальных условиях последнее будет происходить реже, так как на верхнем уровне будет находиться лишь небольшое количество молекул.

Предположим, что возможно каким-либо способом переместить большую часть молекул на верхний уровень. Тогда фотон микроволнового излучения толкнет молекулу на уровень ниже и та выделит еще один фотон. Оба фотона ударятся еще о две молекулы, и те выделят еще два фотона. Эти четыре фотона столкнутся с еще двумя молекулами, и получится уже 8 фотонов и т. д. Исходный фотон породит целую лавину фотонов одинакового размера и двигающихся в одном направлении.

Над разработкой подобного устройства одновременно работали и американские, и советские ученые, однако пальма первенства принадлежит все же американскому физика Чарльзу Таунсу. В 1953 году он разработал метод, с помощью которого возбужденные молекулы аммиака можно изолировать и подвергнуть стимуляции с помощью микроволнового излучения для усиления входящего излучения, то есть входит один фотон, а выходит целый поток.

Такой прибор называется квантовый *генератор СВЧ-диапазона*, или по-английски *мазер*. В последующие годы термин «мазер» вытеснил термин «атомные часы».

Вскоре был разработан и твердотельный мазер, состоящий из помещенного в магнитное поле парамагнитного материала (см. ч. II). Электрон в таком лазере может находиться лишь на одном из двух энергетических уровней: если спин электрона совпадает с направлением магнитного поля, то он занимает нижний уровень, а если электрон вращается в противоположную сторону, то он занимает верхний уровень. Под действием магнитного поля электроны постепенно выталкиваются с верхнего уровня на нижний. При переходе на нижний уровень все электроны выделяют излучение одной и той же частоты (*монокроматическое излучение*).

Первые мазеры (и газовые, и твердотельные) не могли работать непрерывно. Такой мазер сначала нужно было накачать электромагнитным излучением, затем мазер выдавал вспышку излучения, после чего его было необходимо накачивать заново.

Для преодоления этой проблемы американский физик Николас Бломберген использовал системы из трех уровней. При добавлении в систему лазера атома металла (например, хрома или железа) электроны будут распределяться уже не на два,

з на три уровня: верхний, средний и нижний. В этом случае накачка и излучение могут происходить одновременно. Электроны будут подниматься с нижнего уровня на верхний, а с помощью определенной стимуляции можно заставить их опускаться сначала на средний и только потом на нижний уровень. А так как для накачки и для стимуляции необходимы фотоны разного размера, то эти два процесса не будут друг другу мешать, и мазер может работать непрерывно.

Так как мазеры усиливают слабое микроволновое излучение с высокой точностью (то есть с крайне незначительными «шумами»), то в радиоастрономии они используются в качестве высокочувствительных микроволновых приемников.

В принципе этот метод можно использовать и применительно к электромагнитным волнам любой длины, например световым. Таунс впервые заговорил об этом в 1958 году. Такой световой мазер получил название *оптический мазер*, или *лазер*.

Первый лазер был создан в 1960 году американским физиком Теодором Майманом. Майман применил в своем приборе трубку из синтетического рубина, состоящего из оксида алюминия с большой примесью оксида хрома (собственно, именно оксид хрома и дает рубину его красный цвет). Под действием света электроны атомов хрома поднимаются на верхние уровни и через небольшой промежуток времени вновь падают вниз. Первые фотоны света (длина волны которых составляет 694,3 микрон) стимулируют появление других фотонов, и кристалл рубина испускает короткую вспышку красного света. В том же году были разработаны и лазеры с непрерывным режимом работы.

Лазер дал людям не только совершенно новую форму света высокой интенсивности и монохроматичности, но и кое-что еще.

Дело в том, что свет любого другого происхождения (солнечный или образующийся в результате горения) состоит из огромного числа пакетов относительно коротких расходящихся во всех направлениях волн.

Лазерное же излучение состоит из движущихся в одном и том же направлении фотонов одинакового размера. То есть такой свет состоит из следующих строго друг за другом пакетов волн одинаковой длины, и все эти волны сливаются в один сплошной световой луч. Такой свет называется *когерентным*. Конечно же физики научились генерировать длинные когерентные волны уже довольно давно (например, несущая волна радиопередачи также является когерентной), однако лишь в 1960 году стало возможным генерировать когерентные световые волны.

Благодаря особому устройству лазера все излучаемые фотоны движутся в одном направлении. Оба конца рубиновой трубки отполированы до зеркального блеска и дополнительно покрыты серебром. Излучаемые фотоны отражаются от этих зеркал и движутся туда-сюда внутри кристалла, генерируя все больше и больше фотонов. В конце концов пучок фотонов достигает такой интенсивности, что проходит сквозь покрытую меньшим слоем серебра сторону рубина. Понятно, что этот пучок состоит лишь из фотонов, движущихся параллельно продольной оси рубина. Остальные фотоны, пусть даже и с небольшим отклонением от оси, уже после нескольких отражений от зеркальных стенок вылетят за пределы рубина.

Когерентные волны лазера настолько параллельны друг другу, что луч лазера, практически не расходясь, может преодолевать огромные расстояния. В 1962 году ученые направили лазерный луч на Луну, и оказалось, что через почти 400 000 километров диаметр пучка лазера увеличивается всего лишь до 3 километров.

Вскоре были созданы лазеры на основе не только металлов, но и фторидов, вольфраматов, полупроводников и большинства газов; такие лазеры способны производить излучение как видимой, так и инфракрасной части спектра.

Пучок лазерного луча очень маленький, а это значит, что на небольшой площади можно сфокусировать огромную энергию. Под действием лазера металл быстро переходит в газообразное состояние, и ученые используют это свойство лазера при спектральном анализе металлов. С помощью лазера можно прожигать отверстия любого диаметра даже в тугоплавких материалах. А в микрохирургии глаза с помощью лазера можно настолько быстро приварить отслоившуюся сетчатку, что близлежащие ткани просто не успеют «обжечься».

В ближайшем будущем у лазеров появится еще огромное количество различных применений. Когда они появятся, мы обязательно поговорим о них в следующих изданиях этой книги.

Материальные волны

Попытка Бора применить квантовую теорию к атому принесла огромное количество как теоретических, так и практических плодов: удалось дать объяснение периодической таблице, появился совершенно новый класс устройств — твердотельные приборы... Физики остались довольны.

Но квантованный атом не решил проблем химиков, так и не объяснив, как же атомы соединяются в молекулы. Если

модель атома Льюиса—Денгмюра хоть как-то объясняла этот процесс с помощью кубов и общих электронов, то разобрать что-либо среди прыгающих с одного энергетического уровня на другой электронов квантовой атома было просто невозможно.

Ответ вырос из другой неразрешимой на первый взгляд загадки — связи между частицами и волнами. В начале XX века физики окончательно убедились, что свойства света да и электромагнитных волн в целом точно такие же, как и у частиц. Комптон-эффект (см. ч. II) окончательно убедил ученых, что частицы и волны могут образовывать единое целое и совмещать в себе свойства и частиц, и волн.

Но относится ли это лишь к электромагнитному излучению? Что, если не только волны проявляют свойства частиц, но частицы также могут проявлять некоторые свойства волн?

Французский физик Луи де Бройль (1892—1987) как раз занимался изучением этого вопроса. Он применил к электронам соотношения, справедливые для фотонов, то есть частиц. В 1923 году де Бройль опубликовал следующую формулу:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (\text{Уравнение 6.1})$$

где h — постоянная Планка (см. ч. II); m — масса движущейся частицы; v — ее скорость (произведение mv есть ее импульс); λ — принятое обозначение длины волны.

Теоретически эту формулу можно применить к любому движущемуся объекту, хоть к теннисному мячу, хоть к планете. Однако с возрастанием импульса длина волны сокращается, поэтому измерить частоту излучения, испускаемого летящим теннисным мячом, существующими способами просто невозможно, да и не нужно.

Тем не менее длина волн, излучаемых объектами с ничтожной массой, например электронами, относительно велика и равняется длине волны рентгеновского луча. (Впрочем, хотя длина волны и одинаковая, природа такого излучения отличается от природы рентгеновского луча. Волны, излучаемые частицами, по своей природе не являются электромагнитными, поэтому мы назовем их «материальными волнами».)

Если длина материальной волны равна длине волны рентгеновского излучения, значит, ее можно обнаружить тем же способом, что и рентгеновский луч. Рентгеновское излучение было обнаружено при помощи кристаллов. Так, может, и материальные волны можно также обнаружить при помощи кристаллов?

Первые удачные попытки осуществить это были сделаны в 1927 году английским физиком Джорджем Томсоном (1892—1975), а также американскими физиками Клинтон Дзвигсоном (1881—1958) и Лестером Гермером (1896—1971), работавшими независимо от Томсона. В последующие годы ученым удалось обнаружить волновые свойства и у других, более тяжелых частиц, и уже не осталось никаких сомнений в том, что любой объект, обладающий волновыми свойствами, обладает и свойствами частицы, и наоборот.

Аналогия между материальными волнами и электромагнитным излучением проявилась в микроскопии.

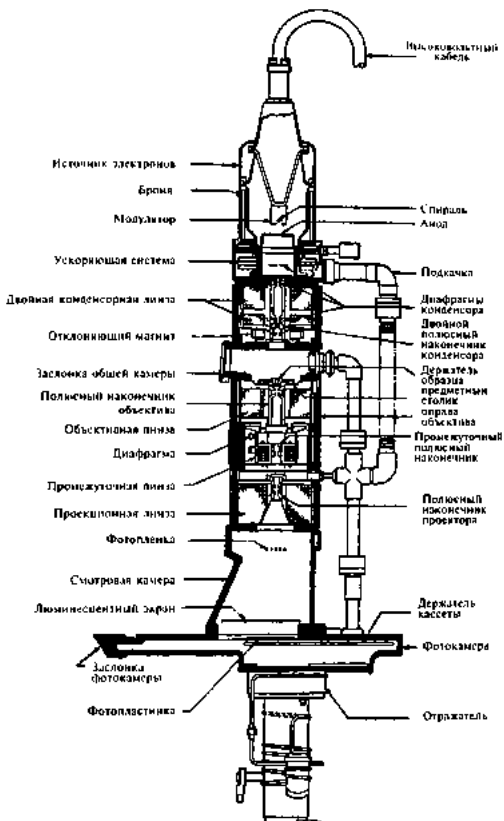
При использовании световых волн у микроскопа существует предел разрешающей способности, и, какой совершенной бы ни была оптическая «начинка» прибора, с его помощью нельзя изучать образцы, размеры которых меньше $\frac{1}{2}$ длины световой волны.

Образно говоря, свет будет просто «обходить» такой образец. Даже при использовании самых коротких видимых световых волн, скажем длиной 380 миллимикрон, с помощью микроскопа невозможно будет разглядеть объекты менее 200 миллимикрон в диаметре, например вирусы. Таким образом, оптический микроскоп позволяет увеличивать изображение максимум в 2000 раз.

Для увеличения разрешающей способности микроскопов сначала стали применять электромагнитные волны, но использование материальных волн дало максимальный результат. Сегодня для этих целей используются в основном электронные волны, длина которых равна длине рентгеновского излучения. С помощью магнитного поля можно сфокусировать четкий электронный пучок так же, как можно сфокусировать пучок света с помощью линзы. Образец должен быть довольно тонким, чтобы электроны могли свободно проходить сквозь него. Кроме того, образец должен находиться в вакууме, иначе содержащиеся в воздухе частицы рассеют электронный пучок. С помощью такого микроскопа можно исследовать абсолютное большинство предметов.

Образец располагается между источником электронного излучения и фотографической пластиной или же люминесцентным экраном. Проходя через образец, электроны рассеиваются и поглощаются отдельными его частями, в результате чего на экране появляется черно-белое изображение объекта.

Первый электронный микроскоп был создан в 1931 году в Германии немецким физиком Эрнстом Руской (1906—1988). Уже в 1934 году были созданы электронные микроскопы, пре-



Электронный микроскоп

восходящие по увеличению оптические, а начиная с 1939 года такие микроскопы стали производить в коммерческих целях. Современные электронные микроскопы увеличивают в тысячи крат сильнее, чем лучшие их оптические собратья.

Материальные волны вошли и в мир атомной теории. Австрийский физик Эрвин Шрёдингер (1887—1961) подошел к проблеме изучения структуры атома с точки зрения не только частиц, но и волн.

Шрёдингер представил электрон в виде вращающейся вокруг ядра волны. В этом случае описываемая электроном орбита должна соответствовать количеству испускаемых электроном волн. За один оборот вокруг ядра по постоянной орбите электрон излучает одно и то же количество волн, т. е. его излучение является *стоячей волной*.

Когда электрон поглощает некоторое количество энергии, длина его волны уменьшается, и, оставаясь на той же орбите, он уже не может излучать такое же количество волн. То же самое происходит и когда электрон теряет часть своей энергии, а длина волны увеличивается.

Учитывая, что количество волн, производимых электроном за один оборот вокруг ядра, не должно быть дробным числом, необходимо, чтобы при излучении или поглощении электроном энергии длина испускаемых волн увеличивалась или уменьшалась, а их общее количество оставалось целым числом. Например, если вместо четырех волн электрон будет излучать пять более коротких, то уровень его энергии увеличится, а если вместо четырех волн будет три более длинных — уменьшится. Если количество испускаемых волн сократилось до одной волны максимальной длины, значит, электрон опустился на ближайший к ядру энергетический уровень и больше не может терять энергию.

Получается, что каждому энергетическому уровню соответствует определенная стоячая волна. Шрёдингер проанализировал все это математически и в 1926 году вывел *волновое уравнение*.

Изучение поведения атомов на основе модели Шрёдингера называется *волновой механикой*, или, так как поглощаться или излучаться могут лишь кванты энергии, *квантовой механикой*.

Квантовая механика тут же завладела сердцами физиков. Она превосходила матричную механику Гейзенберга (см. гл. 6) психологически, так как квантовая механика Шрёдингера давала волнам визуальный облик, пусть и сложный для восприятия, в то время как числам Гейзенберга явно не хватало наглядности.

В 1944 году венгерский математик Джон Нейман (1903—1957) выдвинул предположение, что с математической точки

зрения квантовая механика и матричная механика равнозначны: одно и то же явление можно продемонстрировать с точки зрения как квантовой, так и матричной механики¹.

Теоретически квантовую теорию можно применить и для объяснения химического поведения атомов. Однако, как показывает практика, произвести подобные чудовищные расчеты невозможно даже с использованием современных вычислительных средств. Поэтому химия до сих пор остается намного менее изученной наукой, чем физика.

Тем не менее с помощью квантовой теории можно объяснить процесс формирования молекул из атомов. Американский химик Лайнус Полинг (1901—1994) показал, как из двух атомов образуется молекула — соединение, обладающее гораздо большей, чем отдельные атомы, стабильностью. Общая электронная оболочка модели атома Льюиса—Ленгмюра у Полинга превратилась в две резонирующие друг с другом волны (см. ч. 1). *Теория резонанса Полинга* подробно описана в его работе «Природа химических связей» (1939).

Теория резонанса объясняет структуру и поведение молекул гораздо глубже, чем модель Льюиса—Ленгмюра. В частности, Полингу удалось объяснить образование молекул бензола и гидридов бора. Вообще квантовая механика помогает разгадывать все больше и больше тайн современной химии.

В 1927 году Гейзенберг выявил еще одно важное свойство волновой природы электрона (и частиц в целом). Дело в том, что если рассматривать частицу не как частицу, а как волну, то картинка получается гораздо более размытой. А так как все во Вселенной состоит из частиц, обладающих в том числе и свойствами волн, то и картина Вселенной также становится гораздо более размытой.

Местоположение любой частицы (или ее центра) в космосе можно определить с очень большой точностью, а вот точное местоположение волны определить уже гораздо сложнее.

Рассуждая над этим, Гейзенберг предположил, что невозможно одновременно точно определить и местоположение, и импульс частицы. Доводом ученого являлось то, что любая попытка точно определить местоположение частицы (любым технически возможным и невозможным способом) автоматически приводит к изменению скорости движения этой частицы и соответственно к изменению ее импульса, т. е. значение ее

¹ Впрочем, в 1964 году английский физик Поль Адриен Морис Дирак (1902—1984) опроверг это утверждение, доказав, что эти две теории вовсе не равнозначны и матричная механика более точно отражает действительность.

импульса станет более неопределенным. И наоборот, любая попытка точно измерить импульс частицы приведет к изменению ее местоположения, и местоположение будет более неопределенным. Чем выше точность измерения одной величины, тем выше погрешность измерения второй.

Кратко вышесказанное можно выразить следующей формулой:

$$(\Delta p)(\Delta x) = h, \quad (\text{Уравнение 6.2})$$

где Δp — погрешность измерения местоположения, Δx — погрешность измерения импульса; h — постоянная Планка (символ = означает «приблизительно равно»). Эта формула получила название *принцип неопределенности Гейзенберга*.

С философской точки зрения Гейзенберг пришел к весьма неутешительным выводам, ведь еще со времен Ньютона ученые свято верили в науку, верили в то, что хотя бы теоретически измерения можно производить с абсолютной точностью. А тут выясняется, что на пути к абсолютному знанию стоит непреодолимая стена, стена, возведенная самим мирозданием. Конечно, это тяжелый удар для всего научного сообщества.

Даже сам Эйнштейн долго не мог примириться с неопределенностью, так как этот принцип ставил под сомнение существование причинно-следственных связей на субатомном уровне. Получается, что все в мире происходит случайно. Раз невозможно определить точное местоположение электрона, то как тогда подсчитать силу вероятного воздействия на него извне? «Я не могу поверить, — говорил Эйнштейн, — что Господь Бог играет со всем миром в кости».

И тем не менее Эйнштейну не удалось найти в принципе неопределенности каких-либо противоречий, а современная физика эту теорию полностью приняла.

Однако особых поводов для печали нет. Постоянная Планка очень мала, поэтому значением относительной неопределенности для тел, чьи размеры превышают размеры атома, можно пренебречь. Так что принцип неопределенности правит бал только лишь в субатомном мире.

Более того, принцип неопределенности вовсе не нанес науке никакого оскорбления. Даже наоборот, если во Вселенной существует пусть и очень малая, но приводящая к критическим последствиям доля неопределенности, следует отдать ученым дань за то, что они смогли ее обнаружить. Конечно же осознание пределов своего знания уже само по себе знание первостепенной важности.

Глава 7 РАДИОАКТИВНОСТЬ

Уран

Итак, структура и свойства атома зависят в основном от количества электронов на его энергетических уровнях, а атомное ядро, диаметр которого колеблется в пределах от 10^{-11} до 10^{-12} см, является, казалось бы, крайне незначительной его частью. Если бы размеры атома увеличились до размеров Земли, то диаметр ядра такого атома составил бы всего около 210 метров.

И тем не менее масса ядра составляет более 99,9% от общей массы атома, и, несмотря на его малые размеры, ученые практически сразу определили, что атомное ядро также имеет внутреннюю структуру.

К обнаружению этой структуры привело открытие, сделанное французским физиком Антуаном Анри Беккерелем (1852—1908) в 1896 году. Именно в этом году было открыто рентгеновское излучение, и Беккерель, как и многие ученые того времени, активно изучал это явление.

Отец Беккереля (также известный физик) занимался изучением люминесцирующих материалов, т. е. веществ, которые поглощают свет определенной длины, а затем излучают уже более длинные волны¹. Сам же Беккерель попытался выяснить, нет ли среди этих волн рентгеновских излучений.

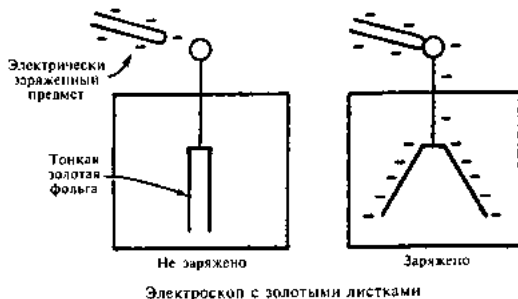
Отец Беккереля работал, в частности, с сульфатом уранил-калия $K_2UO_4(SO_4)_2$. Молекула этого флуоресцентного вещества содержит один атом урана. Беккерель обнаружил, что флуоресцентное излучение сульфата уранил-калия, подвергнутого воздействию солнечных лучей, способно затемнять фотопластинку даже сквозь черную бумагу, что не под силу обычному свету.

А 1 марта 1896 года Беккерель сделал поистине выдающееся открытие. Он обнаружил, что сульфат уранил-калия затемняет фотопластинку и без «подзарядки» от солнечных лучей, то есть когда он не флуоресцирует. Это вещество испускает сильное проникающее излучение постоянно.

Как и рентгеновские лучи, это излучение обладало не только проникающей способностью, но и способностью ионизировать атмосферу. Для демонстрации этого Беккерель использовал *электроскоп с золотыми листками*. Это устройство состоит из

¹ Под действием ультрафиолетового излучения флуоресцирующие вещества начинают ярко светиться. В темноте зрелище очень красивое.

двух тонких листов золотой фольги, подключенных к электроду, помещенному для изоляции от воздушных потоков в специальный корпус. Если поднести к выступающему над краем корпуса концу электрода заряженный предмет, то заряд этого предмета перейдет на золотые пластинки. Оба листа получают одноименный заряд и отталкиваются друг от друга, образуя фигуру в виде перевернутой латинской V.



Лепестки могут провисеть так довольно долго. Однако если воздух внутри корпуса ионизирован, то содержащиеся в таком воздухе ионы постепенно нейтрализуют заряд золотых листков, те перестанут отталкиваться друг от друга и вновь сойдутся вместе. Именно это и произошло, когда рядом с электроскопом поместили образец сульфата уранил-калия. Таким образом Беккерелю удалось доказать, что испускаемое этим веществом излучение является *ионизирующим*.

Физик Мария Склодовская-Кюри (1867—1934), наполовину полячка, наполовину француженка по национальности, в 1898 году назвала такое постоянное проникающее ионизирующее излучение *радиоактивным*. Исследования Кюри показали, что все соединения, содержавшие уран, были радиоактивными, причем чем больше урана содержится в веществе, тем выше его радиоактивность. Получается, что радиоактивным является сам атом урана, а не остальные входящие в соединения вещества. Опытным путем Кюри выяснила, что радиоактивным был и атом тория. (Атомное число атома урана 90, тория — 92, поэтому их структура очень сложна. В 1890-х годах уран и

торий были самыми тяжелыми из известных на тот момент химических элементов.)

Вскоре обнаружилось, что излучение урана и тория не гомогенно. В магнитном поле одна часть радиоактивных лучей немного отклонилась в одном направлении, другая сильно отклонялась в противоположном, а оставшаяся не отклонялась вовсе. Эрнест Резерфорд (впоследствии он развил модель атома) назвал эти части радияционного излучения первыми тремя буквами греческого алфавита: *альфа-лучи*, *бета-лучи* и *гамма-лучи*. Эти три группы лучей отличаются друг от друга еще и проникающей способностью: гамма-лучи обладают такой же проникающей способностью, как и рентгеновские, проникающая способность бета-излучения гораздо ниже, а альфа-лучи такой способностью вообще практически не обладают.

По направлению отклонения бета-лучей Беккерель в 1899 году определил, что они, так же как и катодные лучи, состоят из отрицательно заряженных частиц. Дальнейшие исследования подтвердили, что бета-излучение является потоком быстро движущихся электронов, поэтому излучаемый радиоактивным веществом электрон принято называть *бета-частицей*.

Как я уже говорил, гамма-лучи не отклоняются электромагнитным полем, поэтому ученые предположили, что бета-излучение является электромагнитным по своей природе, однако длина его волны еще короче, чем у рентгеновского излучения. В 1914 году, подвергнув гамма-лучи дифракции на кристалле, Резерфорд доказал это.

Появление ядерной модели атома дало ключ к разгадке природы радиоактивного излучения. Стало понятно, что его источник нужно искать внутри атомного ядра. Дело в том, что разницы энергии электронных уровней недостаточно для возникновения гамма-лучей. Значит, существуют *внутриядерные энергетические уровни*, энергия которых и переходит в фотоны гамма-излучения.

Кроме того, рентгеновские и гамма-лучи не так уж и похожи друг на друга. В целом длина волны рентгеновских лучей выше, а у тяжелых элементов частота рентгеновского излучения превосходит частоту гамма-излучения того же атома.

Границей между рентгеновским и гамма-излучением является волна длиной 0,01 миллимикрона. Все волны короче 0,01 миллимикрона являются гамма-лучами, длиннее — рентгеновскими. Гамма-лучи расширили спектр известных электромагнитных волн, и на сегодняшний день его диапазон от самой короткой гамма-волны до самой длинной радиоволны равняется 60 октавам.

Альфа-частицы

А что такое альфа-лучи? Они отклоняются в противоположную от бета-лучей сторону, и это значит, что они состоят из положительно заряженных *альфа-частиц*. Тот факт, что альфа-лучи лишь незначительно отклоняются электромагнитным полем, которое сильно отклоняет бета-лучи, говорит о том, что масса альфа-частиц намного выше массы электронов.

Впрочем, такие прецеденты уже были. За десять лет до открытия радиоактивности были обнаружены другие потоки тяжелых частиц. В 1886 году Гольдштейн (тот самый, который дал катодной трубке ее название) впервые применил катодную трубку с перфорированным катодом. Он обнаружил, что, когда электроны, появляющиеся под действием электрического тока отрицательно заряженных катодных лучей, начинают двигаться от катода к аноду, сквозь отверстия в катоде в противоположном направлении устремляются лучи совсем другого излучения. Гольдштейн назвал эти лучи *канальными*, так как они проходили сквозь катод по каналам (т. е. через отверстия).

Направление туннельных лучей противоположно направлению катодных лучей, следовательно, они состоят из положительно заряженных частиц. Поэтому Джозеф Томсон и предложил называть их *положительными лучами*.

Можно предположить, что частицы позитивных лучей — это положительно заряженные аналоги частиц катодных лучей, «анодные лучи». Однако это не так. Немецкий физик Вильгельм Вик (1864—1928) измерил их e/m соотношение и на основе полученных низких значений предположил, что частицы положительных лучей были гораздо тяжелее электронов. Их масса соответствовала массе атомов.

Более того, значение e/m варьировалось в зависимости от вещества, из которого сделан катод, и от свойств остаточных газов в катодно-лучевой трубке. На модели атома Резерфорда основывалось предположение, что если катодные лучи состоят из «выбитых» из атомов электронов, то положительные лучи состоят из того, что от этих атомов осталось. То есть из положительно заряженных атомных ядер, а их масса варьируется в зависимости от элемента, из которого они получены¹.

¹ В последние годы этим положительно заряженным частицам было найдено постоянное параллельное применение. Наиболее легко отдает хотя бы часть своих электронов атом цезия, более того, атом цезия относительно тяжелый. Поток ионов цезия, разогнанный током определенной силы и вырывающийся из двигателя ракеты, будет согласно третьему закону Ньютона (см. ч. 1) толкать ракету в противоположном направлении. Конечно же мощность потока даже очень тяжелых ионов — ничто по сравнению с мощностью фор-

Положительная частица с самым высоким соотношением e/m , а значит, самая легкая, являлась ядром атома водорода. Если принять за значение заряда $+1$, т. е. противоположное значение заряду электрона, тогда масса частицы должна превышать массу электрона в 1836 раз. В 1924 году Резерфорд прекратил безуспешные поиски частицы легче ядра водорода и предложил принять массу этого ядра за противоположное число электрона, несмотря на разницу в массе. (Подлинное противоположное число было открыто лишь 20 лет спустя, см. гл. 13.)

В 1920 году Резерфорд предложил назвать положительно заряженные частицы *протонами* (от греч. «первый»).

Резерфорд предположил, что ядра атомов всех элементов состоят, хотя бы частично, из ядер водорода. Об этом говорил еще Праут. Гипотеза Праута возродилась, приняв более сложную форму. Снова поднялся дохоронивший в XIX веке гипотезу Праута вопрос о нецелочисленных атомных весах. Мы поговорим о нем чуть ниже.

Давайте вернемся к альфа-частицам. В 1906 году Резерфорд измерил значение соотношения e/m для этой частицы и обнаружил, это значение это эквивалентно значению e/m атома гелия. В 1909 году он разрешил этот вопрос окончательно, поместив радиоактивное вещество в тонкостенную трубку, находящуюся внутри толстостенной трубки, и откачав воздух из пространства между стенками. Альфа-частицы проникали сквозь тонкую стенку, однако задерживались в пространстве между стенками. Там они присоединяли электроны и превращались в обычные атомы. Проведенный через несколько дней спектроскопический анализ показал, что это были атомы гелия.

Атомный вес гелия равняется 4, таким образом, ядро гелия в 4 раза тяжелее ядра водорода. Если бы соотношение e/m ядра атома гелия было таким же, как и у ядра атома водорода, то положительный заряд ядра атома гелия был бы в 4 раза выше положительного заряда ядра атома водорода. Однако значение соотношения e/m ядра атома гелия в два раза меньше значения соотношения e/m протона. Итак, если масса протона (т. е. ядра атома водорода) равняется 1, а заряд $2-1$, то масса альфа-частицы (а ядро атома гелия и есть альфа-частица) будет иметь массу 4 и заряд $4-2$.

санных двигателей, но зато действие этого потока продолжительное. После того как топливные двигатели выведут ракету за пределы атмосферы в открытый космос, *ионный двигатель* будет медленно разгонять ее до скорости света. Это — самый экономичный и, скорее всего, единственный способ путешествовать в космосе на длительные расстояния.

Казалось бы, раз альфа-частица имеет массу 4, то она должна состоять из 4 протонов. Однако она не может состоять из 4 протонов, так как в этом случае ее заряд будет +4. Впрочем, этот парадокс можно довольно легко объяснить. Радиоактивные вещества, помимо альфа-частиц, излучают еще и бета-частицы (электроны), поэтому можно предположить, что ядро, кроме протонов, содержит еще и электроны. Тогда получается, что альфа-частица состоит из 4 протонов и 2 электронов. Присутствие 2 электронов практически никак не повлияет на массу, которая так и останется равной 4, а общий заряд будет +2.

Существование электронов внутри ядра удовлетворяло ученых и с еще одной точки зрения. Дело в том, что атомное ядро не может состоять лишь из одних протонов, так как протоны имеют положительный заряд и, учитывая небольшие размеры ядра, они будут отталкиваться друг от друга с колоссальной силой. В то же время электроны внутри атомного ядра играют роль своеобразного «цемента», соединяющего протоны.

Подобные рассуждения привели к появлению *протонно-электронной модели* атомного ядра. Согласно этой модели, ядро атома состоит как из протонов, так и из электронов (за исключением ядра атома водорода, так как оно состоит лишь из одного протона, и поэтому ему не нужен электрон-связка).

Количество протонов в ядре любого атома равняется атомному весу этого элемента (A)¹, а в то время как количество электронов равняется количеству, необходимому для погашения заряда всех протонов, минус атомное число элемента (Z). Таким образом, количество необходимых электронов равняется $A - Z$. Заряд же оставшихся протонов гасится электронами, находящимися за пределами ядра. Таким образом, в атоме, обладающем нейтральным зарядом, Z «внеядерных электронов».

Приведем несколько примеров. Атомный вес атома углерода равняется 12, атомное число — 6, значит, ядро атома углерода должно состоять из 12 протонов и $12 - 6$, то есть 6 электронов. Атомный вес атома мышьяка — 75, атомное число — 33, значит, его ядро состоит из 75 протонов и $75 - 33$, то есть 42 электронов. Атомный вес атома урана — 238, атомное число — 92, значит, ядро атома урана состоит из 238 протонов и $238 - 92$, или 146 электронов. Даже атом водорода не является исключением из этого общего правила: его атомный вес равняется 1, атомное число — 1, значит, ядро атома водорода состоит из 1 протона, а количество

¹ Собственно говоря, это правило справедливо только для тех элементов, атомный вес которых приблизительно является целым числом. О том, как работает это правило применительно к другим элементам, я расскажу ниже.

электронов равняется $1-1$, т. е. в ядре атома водорода электронов нет.

К сожалению, протонно-электронная модель атомного ядра не давала объяснения по целому ряду вопросов. Например, каково направление *ядерного спина*? Спин протона или электрона может быть либо $+1/2$, либо $-1/2$, а общая сумма спинов может быть целым числом (как положительным, так и отрицательным), положительным или отрицательным дробным числом, например $(-1)/2$, $(-1) 1/2$, $(-1) 3/2$ и т. д., или же равняться нулю.

Атомный вес атома азота равен 14, атомное число — 7, тогда согласно протонно-электронной модели ядро атома азота должно состоять из 14 протонов и 7 электронов, а общее количество частиц в ядре азота должно равняться 21. Сумма спинов (как положительных, так и отрицательных) 21 частицы в любом случае является дробным числом. Однако наблюдения показали — спин ядра азота является целым числом. Тогда ученые предположили, что сумма электронов и протонов в ядре азота не равна 21 и вообще не может равняться нечетному числу. С другой стороны, она не может быть и четным числом, так как атомный вес азота 14, а атомное число — 7.

Данные о ядерных спинах других элементов также противоречили протонно-электронной модели атомного ядра, что и привело к полному отказу от нее.

Обнаружение частиц

Так в чем же все-таки было дело? По одной из версий, электроны и протоны внутри ядра являлись единой частицей, так как из-за крошечных размеров ядра они находились в непосредственной близости и спаивались в одну частицу. Поскольку масса электрона ничтожно мала, масса такой частицы приблизительно равняется массе протона, а ее заряд равен 0, так как заряд протона (+1) погашается зарядом электрона (-1). Согласно этой версии, ядро атома азота состоит из 7 протонов и 7 «спящих частиц», а общее число частиц равняется 14, то есть четному числу.

В 1920 году были высказаны первые предположения о том, что внутри атомного ядра присутствуют еще и незаряженные частицы, масса которых равна массе протонов. Однако в течение следующих 10 лет ученым так и не удалось найти никаких доказательств существования таких частиц. Но это еще не значило, что их не существует, так как физики знали, что незаряженная частица и должна быть неуловимой.

Обычные методы обнаружения основывались на ионизирующем свойстве субатомных частиц. Именно так, например, удалось обнаружить радиоактивное излучение с помощью электро-скопа.

Когда ученые только-только начинали изучать радиоактивность, для обнаружения субатомных частиц использовались два устройства. Прототип первого был сконструирован в 1913 году немецким физиком Хансом Гейгером (1882—1945). В свое время Гейгер помогал Резерфорду проводить эксперименты, которые впоследствии привели к созданию ядерной модели атома. В 1928 году Гейгер совместно с немецким физиком С. Мюллером значительно усовершенствовал прибор, получивший название *счетчик Гейгера—Мюллера*.

Счетчик Гейгера—Мюллера представляет собой покрытую полосками металла стеклянную трубку, заполненную аргоном, в центре которой находится нить из тонкого металла. На трубку подается электрический ток: нить является анодом, а металлические полоски цилиндра — катодом, причем разность их потенциалов недостаточна для возникновения искры.

Когда в трубку попадает заряженная частица, она сталкивается с атомом аргона, выбивая из него один и более электронов. Под действием электрического тока эти электроны устремляются к аноду, ионизируя при этом другие атомы аргона. Появляются еще несколько электронов, которые ионизируют еще несколько атомов аргона, и т. д. То есть одна лишь заряженная частица запускает процесс ионизации аргона, и через небольшой период времени количество ионов становится достаточным для того, чтобы аргон начал проводить ток. Тогда в трубке возникает электрическая искра, и разность потенциалов трубки на мгновение становится равной нулю.

Электрический разряд, или импульс, можно преобразовать в звуковой щелчок, обозначающий проход одной субатомной частицы сквозь трубку. По количеству щелчков можно приблизительно определить на слух уровень радиационного излучения (поэтому счетчики Гейгера—Мюллера используются при разведке урана), а с помощью автоматики можно подсчитать и точное количество импульсов.

Если же нужно нечто большее, чем просто посчитать субатомные частицы, то можно воспользоваться прибором, изобретенным в 1911 году шотландским физиком Чарлзом Вильсоном (1869—1959). Ученый занимался исследованиями облакообразования и пришел к выводу, что капельки воды, из которых состоят облака, образуются вокруг частиц пыли и также могут образовываться вокруг ионов. Если же в воздухе нет ни пыли,

ни ионов, то облака образовываться не будут, а воздух станет *перенасыщенным*, то есть водяного пара в таком воздухе будет больше, чем обычно.

Вильсон поместил некоторый объем насыщенного водяными парами воздуха в камеру с поршнем. Если поршень вытянуть, то воздух расширится и его температура понизится. Холодный воздух не может содержать такое же, что и теплый, количество водяного пара, и обычно при понижении температуры часть пара конденсируется в виде капелек воды. Однако при отсутствии пыли и ионов конденсация происходит не может, и холодный воздух становится перенасыщенным.

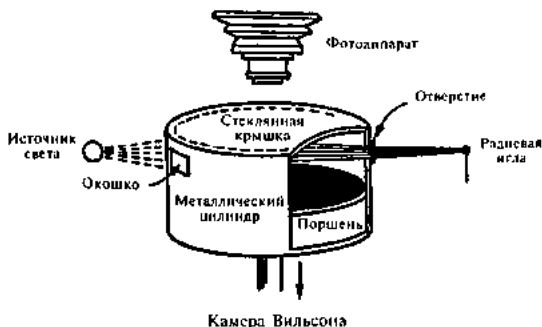
Если сквозь камеру с перенасыщенным воздухом проходит субатомная частица, то за ней создается след из ионов, вокруг которых образуются капли воды. По этим каплям можно определить траекторию полета субатомной частицы.

Можно многое узнать о частице по оставленному ею в камере Вильсона следу. Также по следу можно идентифицировать различные типы частиц. Например, альфа-частица образует множество ионов, а ее след является прямой линией, так как благодаря большой массе альфа-частица при столкновении с электронами не отклоняется, но она отклоняется, причем почти на 90° , только при столкновении с ядром. В результате столкновения ядро лишается части своих электронов, становясь ионизирующей частицей, и отскакивает в сторону. Поэтому четкий и прямой след альфа-частицы обычно раздваивается с одного конца. По длине оставленного альфа-частицей следа можно судить о ее исходной энергии.

Бета-частица, масса которой намного меньше массы альфа-частицы, гораздо легче меняет направление своего движения и образует меньше ионов. Она оставляет тонкий и волнообразный след. Гамма- и рентгеновские лучи выбивают из атомов электроны, и последние, становясь ионизирующими частицами, оставляют расходящиеся в разные стороны следы. Поэтому след гамма- и рентгеновского излучения нечеткий, размытый и «пушистый».

Если поместить камеру Вильсона между двумя разноименными полюсами магнита, то заряженные частицы будут двигаться по криволинейным траекториям, о чем можно будет судить по оставляемым ими следам. По направлению кривой можно определить, является заряд частицы положительным или отрицательным, а по остроте кривой можно вычислить значение отношения e/m .

Для образования электронов необходимо, чтобы летящая частица обладала электрическим зарядом. Положительно заря-



женная частица притягивает электроны встречающихся на пути атомов, а отрицательно заряженная будет их отталкивать. Незаряженная частица не притягивает, не отталкивает электроны и не образует ионов. Таким образом, такую незаряженную частицу невозможно обнаружить с помощью счетчика Гейгера—Мюллера или камеры Вильсона (и любого другого разработанного позже устройства). Если незаряженные частицы существуют, то их можно обнаружить лишь косвенно.

Именно поэтому ученым в течение 10 лет не удавалось обнаружить нейтральную частицу и разработать более совершенную модель атома, чем протонно-электронная.

Нейтрон

В начале 1930 года появились данные о том, что под действием альфа-лучей бериллий начинает испускать какой-то неизвестный тип излучения. Это излучение обладало высокой проникающей способностью и не меняло своего направления под действием магнитного поля. Сначала решили, что это гамма-лучи. Однако новое излучение не являлось гамма-лучами, так как не обладало ионизирующим свойством и его невозможно было обнаружить с помощью электроскопа.

Это излучение действительно невозможно было обнаружить напрямую. Однако оно выбивало протоны из парафина, что и дало возможность обнаружить его косвенно.

В 1932 году английский физик Джеймс Чедвик (1891—1974) дал этому феномену удовлетворительное объяснение. Электромагнитное излучение может сдвинуть разве что легкие электроны, а не тяжелые протоны. Выбивать же протоны с такой легкостью может лишь какая-то другая частица, масса которой соизмерима с массой протона. Раз эта частица не ионизирует воздух, значит, она не несет электрического заряда. Т. е. это и есть та самая частица, которую ученые ищут вот уже более 10 лет. Так как заряд частицы нейтрален, она получила название *нейтрон*.

Итак, ученым удалось обнаружить нейтрон, и Гейзенберг тут же предложил *протонно-нейтронную модель* атома. Согласно этой модели, ядро состоит только из протонов и нейтронов. Масса нейтрона равна массе протона, а сумма протонов (p) и нейтронов (n) равняется атомному весу (A). С другой стороны, заряд ядра зависит только от положительно заряженных протонов, поэтому заряд ядра равняется атомному числу (Z). Таким образом:

$$p + n = A, \quad (\text{Уравнение 7.1})$$

$$p = Z. \quad (\text{Уравнение 7.2})$$

Количество нейтронов можно определить путем вычитания уравнения 7.1 из уравнения 7.2:

$$n = A - Z. \quad (\text{Уравнение 7.3})$$

Новая модель давала полное представление о структуре ядра атомов тех элементов, чьи атомные веса приблизительно равнялись целым числам.

Ядро атома водорода ($A = 1, Z = 1$) состоит только из одного протона; ядро атома гелия ($A = 3, Z = 2$) — из двух протонов и двух нейтронов; ядро атома мышьяка ($A = 75, Z = 33$) — из 33 протонов и 42 нейтронов; ядро атома урана ($A = 238, Z = 92$) — из 92 протонов и 146 нейтронов.

Протонно-нейтронная модель смогла дать ответы на те вопросы, на которые не могла дать протонно-электронная модель. Например, ядро атома азота ($A = 14, Z = 7$) состоит из 7 протонов и 7 нейтронов, итого из 14 частиц. Spin нейтрона такой же, как и протона, $+1/2$, или $-1/2$, и значение общего спина 14 (и любого другого количества) частиц будет целым числом.

Сегодня протонно-нейтронная модель является общепризнанной, а протоны и нейтроны вместе называют *нуклонами*, то есть «частицами атомного ядра».

Конечно же и эта модель не дает ответа на все вопросы. Например, если ядро состоит только лишь из протонов и электро-

нов, то откуда же берутся электроны бета-лучей, испускаемых радиоактивными веществами? Ведь именно существование бета-лучей и дало повод считать, что в ядре есть электроны.

Ответ на этот вопрос дают свойства нейтронов, не имеющие ничего общего со свойствами протонов и электронов. И электроны и протоны являются *устойчивыми частицами*. Это значит, что если Вселенная состояла бы из одних лишь электронов и протонов, то оставалась бы неизменной. Вселенная обязана своим современным обликом именно нейтрону, *неустойчивой частице*.

В изоляции нейтрон через какое-то время распадается на протон и электрон. (Пока я даю неполное описание процесса распада, более подробно см. в гл. 14.)

Мы можем записать этот процесс символами (надстрочный индекс обозначает заряд):



Эта формула иллюстрирует одну очень важную вещь: электрический заряд не создается. Весь опыт изучения субатомных частиц показывает, что нейтрон не может просто так вот стать протоном, так как заряд, как положительный, так и отрицательный, у незаряженной частицы не может появиться ниоткуда. Поэтому нейтрон образует положительно заряженный протон и отрицательно заряженный электрон, таким образом, общий заряд двух образовавшихся частиц равен нулю.

Закон *сохранения электрического заряда* гласит, что в закрытой системе общий заряд частиц в результате изменений внутри системы не меняется. Ученые выявили это еще во времена изучения электричества (см. ч. II), когда о существовании субатомных частиц даже и не подозревали.

Однако внутри ядра нейтрон, как правило, стабилен (причины см. в гл. 14). Поэтому атом азота стабилен, даже несмотря на то, что в его ядре есть нейтроны и их количество, как и количество протонов, остается равным ⁷!

С другой стороны, нейтроны некоторых атомов все же обладают некоей долей неустойчивости, и в некоторых случаях такой нейтрон распадается на протон и электрон. При этом протон остается в ядре, а электрон становится бета-частицей и покидает ядро. Несмотря на то что бета-частицы излучаются ядром, это не значит, что они являются его составной частью. Бета-частицы образуются в момент выхода из ядра.

¹ У вас может возникнуть вопрос: а что же удерживает 7 положительно заряженных частиц вместе, не давая им оттолкнуться друг от друга в отсутствие «цементирующего» электрона? Ответ на этот вопрос я дам ниже.

Новые радиоактивные элементы

При возникновении бета-излучения нейтрон внутри атомного ядра становится протоном. Ясно, что при этом изменяются и свойства атома.

Так как общее количество протонов возрастает на единицу, на единицу возрастает и атомное число, и такой атом становится уже атомом совсем другого химического элемента.

На самом деле радиоактивность некоего вещества практически всегда является признаком глубоких изменений свойств атомов этого вещества. Ученые осознали это через некоторое время после открытия радиоактивности и до того, как была изучена внутренняя структура ядра.

В 1900 году Крукс, один из первооткрывателей катодных лучей, обнаружил, что уран высокой очистки практически не проявляет радиоактивных свойств, и сделал вывод, что радиоактивность вызвана не самим ураном, а некой содержащейся в нем примесью.

В следующем году Беккерель подтвердил полученные Круксом результаты, а также выявил, что постепенно радиоактивность чистого урана возрастает до нормального для этого элемента уровня. В 1902 году Резерфорд совместно с английским физиком Фредериком Содди (1877—1956) обнаружил сходство поведения соединений тория с поведением урана.

Напрашивается логичный вывод: если радиоактивность вызвана примесью, то она постепенно образуется из самого урана. Другими словами, радиоактивность урана — показатель того, что атомы урана принимают какую-то другую форму. Эта новая форма атома также является радиоактивной и преобразуется в следующую и т. д. Исследования Резерфорда и Содди показали, что следует говорить не просто о радиоактивном элементе, а о *ряде радиоактивных элементов*.

Вполне возможно, что радиоактивность является свойством не урана и тория (сами элементы менее радиоактивны), а их разнообразных «дочерних элементов». Последние обладают гораздо большей радиоактивностью и либо присутствуют в составе урана и тория всегда, либо образуются в них сразу после очистки.

Раз «дочерние элементы» образуются медленно и быстро распадаются, значит, в руде урана и тория они содержатся лишь в исчезающе малых количествах. «Дочерние элементы» не поддаются обнаружению с помощью обычных химических методов, однако по испускаемым ими излучениям их можно обнаружить с большой точностью. Излучение каждого из дочерних элемен-

тов обладает своими уникальными характеристиками и интенсивностью.

В 1898 году Мария Кюри и ее муж, французский физик Пьер Кюри (1859—1906), обычными химическими методами разделили большое количество урановой руды по свойствам на фракции, отсеивая обладающие высокой радиоактивностью. В том же году им удалось обнаружить два неизвестных ранее элемента, первый из которых они назвали *полоний* (созвучно с названием родной страны Марии Кюри), а второй, из-за его высокой радиоактивности, — *радий*.

Радиоактивность этих элементов была гораздо выше, чем у урана и тория. На самом деле скорость распада радия и полония настолько высока, что ни один из них не дошел бы до наших дней в чистом виде, даже если 5 миллиардов лет назад, во время образования планеты, они существовали бы в достаточном количестве. Сегодня эти элементы существуют лишь благодаря тому, что они постоянно образуются из урана и тория. А вот скорость распада последних настолько низкая, что их запасы за 5 миллиардов лет практически не уменьшились, несмотря на постоянно продолжающийся процесс распада.

Сколько же существует таких «недолговечных» дочерних элементов урана и тория? Во времена Кюри никто точного ответа дать не мог, так как не было известно, сколько же еще осталось незаполненных клеток периодической таблицы. Концепция атомных чисел, разработанная Мозли в 1913 году, внесла в этот вопрос некоторую ясность.

Все элементы с атомными числами до 84 включительно (до висмута) являются нерадиоактивными, в том числе и еще неизвестные элементы (43, 91, 72 и 75). И действительно, гафний и рений, открытые в 1923-м и 1926 годах соответственно, оказались нерадиоактивными. Тогда ученые переключили свое внимание на элементы с атомным числом выше 83.

Торий (атомное число 90) и уран (атомное число 92) являются первыми открытыми радиоактивными элементами. Атомные числа обнаруженных Кюри полония (84) и радия (88) также выше 83.

Последовал целый ряд открытий. В 1899 году французский химик Андре Дебьерн (1874—1949) открыл *актиний* (атомное число 89); в 1900 немецкий химик Фридрих Дорн (1848—1916) открыл *радон* (атомное число 86); в 1917 году немецкий химик Отто Ган (1879—1968) совместно с австрийским физиком Лизе Майтнер (1878—1968) открыл протактиний (атомное число 91).

Две оставшиеся ячейки этой части периодической таблицы, 85 и 87, оставались незаполненными еще целых 25 лет. Ученые

были убеждены, что эти элементы также являются радиоактивными (что впоследствии и подтвердилось).

И тем не менее эти так замечательно вписывающиеся в таблицу элементы поставили перед химиками вопрос, который чуть было не опроверг сам принцип периодической системы, однако в итоге лишь в очередной раз доказал ее непоколебимость. Обо всем этом вы узнаете из следующей главы.

Глава 8 ИЗОТОПЫ

Атомные превращения

Открытие в 1898 году нескольких новых элементов в радиоактивной руде вызвало некоторые затруднения. В периодической таблице было место лишь для 9 радиоактивных элементов (атомные числа от 84 до 92). То есть для радия, полония и некоторых других элементов место было, но что делать с остальными? Ведь если брать только дочерние элементы урана и тория с четко выраженными свойствами и определенной интенсивностью излучения, у физиков будет несколько десятков новых элементов.

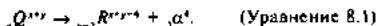
Каждому типу излучения было дано свое название. Например, уран Хр, уран Ху, радий А, радий В и так далее вплоть до радия С. Были также излучения тория от А до D, два мезотория, один радиоторий и т. д. Но если элементов действительно столько же, сколько и различных излучений, как же их вписать в таблицу? С открытием Мозли атомного числа задача еще более усложнилась.

Для начала давайте рассмотрим природу этих радиоактивных излучений и их влияние на испускающий их атом. (Я прибегну к протонно-нейтронной модели атомного ядра, несмотря на то что изначально описываемый мною анализ был сделан на основе протонно-электронной модели.)

Возьмем произвольный элемент Q , ядро которого состоит из x протонов и y нейтронов. Значит, его атомное число равняется x , а его атомный вес $x + y$. Запишем атомное число текстом нижнего регистра перед символом элемента, а атомный вес — текстом верхнего регистра после символа. Получаем Q^{xy} .

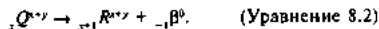
Теперь предположим, что атом этого элемента испустил одну альфа-частицу (обозначается греческой α). Альфа-частица состоит из двух протонов и двух нейтронов, следовательно, ее атомное число 2, а атомный вес 4. В записи это выглядит как α^4 .

То, что остается от исходного атома после выхода альфа-частицы, должно содержать $x-2$ протона и $y-2$ электрона. Атомное число уменьшается на 2 (и образуется новый элемент R), атомный вес — на 4. Это можно записать так:



Если же исходный атом испустил бета-частицу (обозначается греческой β), ситуация будет несколько иной. Выход бета-частицы означает, что внутри ядра один нейтрон превратился в протон. Значит, теперь количество протонов в ядре будет $x+1$, а нейтронов $y-1$. Атомное число увеличится на 1, а атомный вес останется прежним, т. к. $x+1+y-1=x+y$.

Атомный вес самой бета-частицы практически равен 0. (Точнее, 0,00054, но в данном случае мы можем сократить его до 0.) Так как атомный вес равняется числу положительно заряженных частиц в ядре и так как бета-частица является электроном, а следовательно, обладает единичным отрицательным зарядом, ее атомное число равняется -1 . Таким образом, бета-частицу можно обозначить как ${}_{-1}\beta^0$, а процесс выхода как



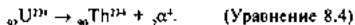
Обратите внимание, что в уравнениях 8.1 и 8.2 сумма атомных чисел правой части равняется сумме атомных чисел левой части в соответствии с законом сохранения электрического заряда. То же можно сказать и об атомных весах правой части формулы 8.2 согласно закону сохранения массы. (Пока мы можем пренебречь небольшим изменением массы при ее переходе в энергию.)

Гамма-луч обозначается греческой буквой γ . Гамма-излучение является электромагнитным, следовательно, не имеет ни атомного веса, ни атомного числа. Запись будет выглядеть как ${}_0\gamma^0$. Добавляем следующую формулу:



Таким образом, когда атом испускает альфа-частицу, его атомное число уменьшается на 2, а атомный вес — на 4. Когда атом испускает бета-частицу, его атомное число уменьшается на 1, а атомный вес остается неизменным. Когда же атом испускает гамма-луч, его и атомное число, и атомный вес остаются неизменными. Этот закон впервые был сформулирован Содди в 1913 году.

Давайте применим этот закон к атому урана с атомным числом 92 и атомным весом 238, т. е. ${}_{92}\text{U}^{238}$. Слабое радиоактивное излучение урана высокой очистки состоит из альфа-частиц. Испускание альфа-частицы уменьшает атомное число атома урана до 90, т. е. до атомного числа тория, а атомный вес до 234. Запись выглядит так:



Атом тория, полученный в результате распада атома урана, несколько отличается от атома тория, содержащегося в руде. Атомное число последнего также равняется 90, однако его атомный вес равен 232, то есть ${}_{90}\text{Th}^{232}$.

Атомное число и одного и другого атома равно 90, поэтому они оба занимают одну и ту же ячейку периодической таблицы. Соди обнаружил это в 1913 году и предложил называть элементы, имеющие одинаковое атомное число и различающиеся атомным весом, *изотонами* (от греч., означает «одно и то же место», то есть одно и то же место в периодической таблице).

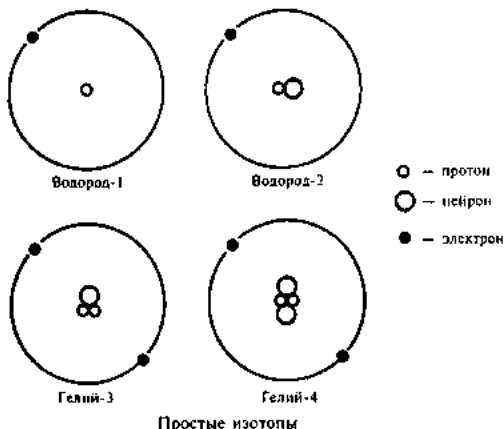
Так как атомное число изотопов одного и того же элемента одинаково, химики решили на письме отображать лишь их атомные веса: торий-234 и торий-232, или, более кратко, Th^{232} и Th^{234} .

С точки зрения химии вполне обоснованно помещать изотопы в одну и ту же ячейку периодической таблицы. Торий-234 и торий-232 имеют в ядре по 90 протонов и соответственно по 90 электронов в нейтральном атоме. Химические свойства элементов определяются распределением электронов по электронным уровням, а значит, химические свойства этих двух изотопов тория, как и изотопов любых других элементов, будут одинаковыми¹.

Но, несмотря на то что у атомов изотопов на энергетических уровнях один и тот же набор электронов, они все же отличаются структурой атомных ядер. Количество протонов в ядре изотопов одинаково, значит, неодинаково количество нейтронов. Например, ядро атома тория-234 состоит из 90 протонов и 144 нейтронов, в то время как ядро атома тория-232 состоит из 90 протонов и 142 нейтронов.

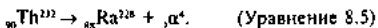
Когда речь идет об изменениях внутри атомного ядра, например когда мы говорим о радиоактивности (в то время как

¹ Впрочем, небольшие различия в химических свойствах все же есть. Это особенно характерно для атомов легких элементов, так как один изотоп такого элемента тяжелее другого и поэтому проявляет меньшую активность. Однако эта разница настолько незначительна, что в большинстве случаев ею можно пренебречь.

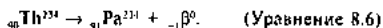


во время химических преобразований изменяется лишь число электронов, атомное ядро остается неизменным), различия в количестве нейтронов в ядре очень важны.

Итак, процесс распада тория-232 идет очень медленно, именно поэтому этот элемент до сих пор присутствует в земной коре. Атом тория испускает альфа-частицу и его атомное число падает до 88, т. е. до радия. Запишем это:

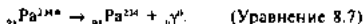


С другой стороны, процесс распада атомов тория-234 идет крайне быстро, и именно поэтому в природе этот элемент встречается только в исчезающе малых количествах в урановой руде. Более того, при распаде тория-234 выделяется бета-частица, что приводит к увеличению атомного числа до 91, то есть до протактиния:



После выхода альфа- или бета-частицы может образоваться новый атом, заряд ядра которого будет выше, чем у атома исходного состояния. После возврата в прежнее состояние атом

испускает гамма-луч. В некоторых случаях это происходит не сразу, атом существует какое-то время, а радиационное излучение его возбужденного ядра обладает уникальными характеристиками. Для обозначения наличия возбужденного ядра символ элемента помечают звездочкой. В процессе образования протактиния-234 его ядро переходит в возбужденное состояние:



В 1936 году Лизе Майтнер предложила называть атомы с одинаковыми атомными числами и атомными весами, но различающиеся структурой ядра, *изомерами*. Первый случай ядерной изомерии был зафиксирован на примере протактиния-234 еще в 1921 году Отто Ганом, давним партнером Майтнер по работе.

Радиоактивные ряды

Закон Содди привел к отказу от собственных названий различных атомов, образующихся из урана и тория. Эти названия представляют определенный исторический интерес, поэтому их можно встретить в книгах по истории физики, но в этой книге мы будем обозначать эти элементы исключительно как изотопы. Как только мы правильно обозначим все эти элементы, окажется, что, несмотря на то что уран и торий образуют десятки изотопов, их все можно разместить в той или иной ячейке периодической таблицы.

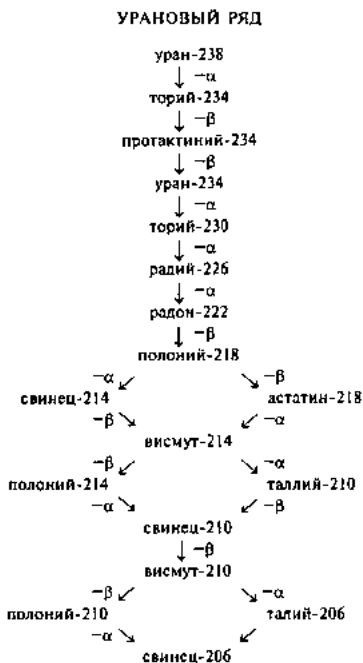
В табл. 5 все вышесказанное проиллюстрировано на примере изотопов так называемого *уранового ряда*, то есть элементов, образующихся из урана-238.

Стоит подробнее ознакомиться с элементами этого ряда, как возникает несколько вопросов. Например, свинец-206 является стабильным изотопом и не подвергается радиоактивному распаду, поэтому этот элемент и заканчивает урановый ряд. Однако существуют и такие изотопы, как свинец-214 и свинец-210, и они являются радиоактивными элементами. Это говорит о том, что изотопы не обязательно являются радиоактивными, у одного и того же элемента могут быть как радиоактивные, так и устойчивые изотопы.

Если не принимать во внимание свинец-206, то процесс распада всех этих элементов, за исключением урана-238, идет с относительно высокой скоростью. Следовательно, с момента

образования Земли до наших дней дошел только уран-238. Этот элемент является «родителем» всего уранового ряда, и если бы урана-238 сегодня не существовало, то не существовало бы и всех его дочерних элементов.

Таблица 5



Атомы некоторых радиоактивных элементов могут образовывать разные целочки изотопов. К примеру, полоний-218 может испустить альфа-частицы свинца-214 или же бета-частицу аста-

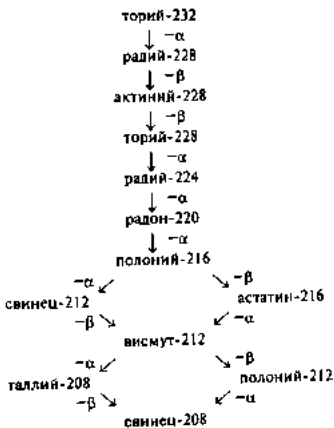
тина-218. Это пример так называемого *разветвленного распада*. Как правило, преобладает какой-то один вариант распада. Например, лишь каждые 2 из 10 000 атомов полония-218 распадаются до астатина-218, все остальные распадаются до свинца-214. (То есть в этом случае преобладает эмиссия альфа-частиц, в других же случаях может преобладать и эмиссия бета-частиц.)

Астатин (атомное число 85) если и образуется во время радиоактивного распада, то обычно в самом конце цепочки превращений. Именно поэтому его количество настолько ничтожно мало, что ученые очень долго не могли его обнаружить. То же можно сказать и о франции (атомное число 87), с той лишь разницей, что франций в некоторых цепочках вообще не образуется.

Атомный вес любого атома радиоактивного семейства либо вообще не меняется (как в случае выхода бета-частицы или гамма-луча), либо уменьшается на 4 (как в случае выхода альфа-частицы). Это означает, что значение разницы атомных весов двух любых элементов ряда либо равно нулю, либо кратно 4.

Таблица 6

ТОРИЕВЫЙ РЯД



Атомный вес урана-238 равняется 238. Разделив 238 на 4, получаем 59 и 2 в остатке. При делении любого числа, отличного от 238 и кратного 4, на 4 всегда будет оставаться остаток 2. Значение атомного веса любого члена уранового ряда можно вычислить по формуле $4x + 2$, где он может принимать любое значение от $x = 59$ — для урана-238 и $x = 51$ — для свинца-206. По этой причине урановый ряд иногда называют *рядом* $4x + 2$.

После урана был открыт торий. Этот радиоактивный элемент также является родителем группы дочерних атомов так называемого *ториевого ряда* (см. табл. 6).

Атомные веса атомов изотопов тория, как и изотопов урана, также кратны 4. Значение атомного веса тория-232 равняется 232 и делится на 4 без остатка. Значения атомного веса всех элементов ториевого ряда также делятся на 4 без остатка, и поэтому изотопы тория иногда называют *рядом* $4x + 0$.

Можно предположить, что раз из всех радиоактивных элементов в природе в значительных количествах встречаются только уран и торий, то существуют только два радиоактивных ряда. Однако в радиоактивных рудах встречаются и атомы, значения атомных весов которых не удовлетворяют ни формуле $4x + 0$, ни формуле $4x + 2$, следовательно, эти атомы не принадлежат элементам ни уранового, ни ториевого ряда.

Сначала ученые решили, что эти элементы являются частью ряда актиния-227, значения атомного веса которого сводятся к формуле $4x + 3$. Эти элементы получили название изотопов *актиниевого ряда*. В настоящее время это название все еще широко используется, несмотря на то что само предположение оказалось неверным. Процесс распада актиния-227 идет слишком быстро, поэтому этот элемент не мог просуществовать в течение 5 миллиардов лет, а значит, он не может быть и исходным атомом радиоактивного ряда.

Когда был открыт протактиний, ученые обнаружили, что при распаде протактиния-231 (по современной терминологии) образуется актиний-227, благодаря чему элемент и получил свое название («протактиний» означает «до актиния»). Однако процесс распада протактиния-231 также идет очень быстро, и этот элемент не может быть родителем ряда.

В 1935 году канадский физик Артур Джеффри Демпстер (1886—1950) обнаружил, что не все атомы урана являются атомами урана-238. Из каждой тысячи добываемых из урановой руды атомов урана семь являются атомами урана-235. Процесс распада этих атомов, ядро которых состоит из 92 протонов и 143 нейтронов, идет достаточно медленно (хотя и быстрее, чем распад урана-238), и атом урана-235 является родителем элементов акти-

ниевского ряда. (Именно поэтому уран-235 иногда называют «актиноураном».) Значение атомных весов всех элементов актинового ряда (см. табл. 7) можно описать формулой $4x + 3$.

Понятно, что должен существовать и четвертый ряд радиоактивных элементов, атомные веса которых могут принимать значение $4x + 1$. Уран-233 как раз и является изотопом этого типа, и он не принадлежит ни к одному из вышеописанных рядов. Ученым так и не удалось обнаружить четвертый радиоактивный ряд ни в 1920-х, ни в 1930-х годах. Дело в том, что, как правильно предположили физики, ни один изотоп этого ряда не может являться исходным элементом, так как процесс распада всех элементов этого ряда идет слишком быстро.

В конце каждого из трех радиоактивных рядов стоит изотоп свинца с соответствующим атомным весом. Урановый ряд заканчивается свинцом-206 ($4x + 2$), ториевый ряд заканчивается свинцом-208 ($4x + 0$), а актиноивый ряд — свинцом-207 ($4x + 3$).

Таблица 7

АКТИНИЕВЫЙ РЯД



Все три изотопа свинца являются стабильными, а это означает, что у одного и того же элемента может быть не только по одному стабильному и нестабильному изотопу, но и более одного стабильного изотопа.

Период полураспада

Выше я давал процессу распада радиоактивных элементов характеристики типа «быстро» и «медленно», но не приводил никаких конкретных чисел.

Первыми продолжительность распада попытались вычислять Резерфорд и Содди в 1902 году. Они проследили изменение интенсивности излучения быстрораспадающегося радиоактивного изотопа и определили, что со временем интенсивность падает по экспоненте.

Это верно только в том случае, если за определенное количество времени распадается определенное количество атомов. Скажем, если скорость распада 0,02 всех атомов в секунду, то в первую секунду из 1 000 000 000 атомов радиоактивного вещества распадется 20 000 000 000 атомов. Конечно же мы не можем сказать, какие именно атомы распадутся. Мы не можем определить, распадется отдельно взятый атом в первую секунду, или через 5 секунд, или через 5 лет.

Приведу пример аналогичной ситуации из жизни. После тщательного изучения статистических данных страховые компании могут дать довольно точный прогноз, сколько человек из каждого миллиона американцев в возрасте 35 лет умрет в следующем году, если, конечно, считать этот год «нормальным». Компании не могут выявить конкретных американцев, которым грозит смерть, или предсказать конкретный год смерти конкретного американца. Они могут делать лишь общие прогнозы для большого количества абстрактных людей. Страховые компании работают с людьми, а физики — с атомами, и прогнозы последних, как правило, гораздо более точные.

Скорость радиоактивного распада не меняется с течением времени. Предположим, что каждый год умирает одно и то же количество человек. Предположим, что в течение года из 1 000 000 американцев в возрасте 35 лет умрет 0,2%, то есть 2000 человек. К концу года останется 998 000 человек. В следующем году умрет еще 0,2% от оставшихся, то есть 1996 человек. В следующем году умрет еще 0,2% от 996 004, останется 994 012 человек и т. д.

Таким образом, каждый год с уменьшением количества живущих будет уменьшаться и количество смертей. Невозможно пред-

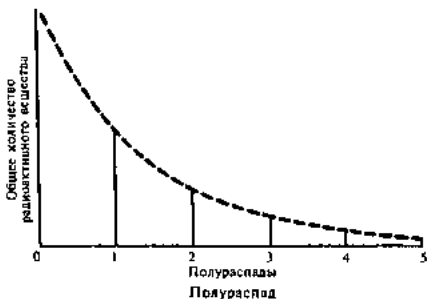
сказать конкретно, через сколько лет умрет последний человек, так как в любой произвольно взятый год умрет только небольшой процент людей. Понятно, что такой анализ дает приемлемые результаты только в том случае, если количество живых людей остается достаточно большим. Тем не менее если количество людей изначально было огромным, то согласно статистике некоторые из них проживут сотни и тысячи лет.

В действительности этого не происходит, потому что, когда человек стареет, постепенно возрастает вероятность его смерти, и вероятность смерти старых людей очень высока. Поэтому все 35-летние люди умрут менее чем через сто лет, независимо от их изначального количества.

В отличие от людей вероятность «смерти» атома радиоактивного элемента не возрастает со временем, и, если некоторые атомы распадаются мгновенно, отдельные атомы могут просуществовать в течение неопределенно больших периодов времени. Поэтому нельзя определить скорость полного распада радиоактивного атома, так как эта скорость может быть любой.

Однако при фиксированной скорости распада возникает одно интересное свойство: зная эту скорость, можно определить период времени, требующийся для распада половины исходного числа атомов. Этот период, который в 1904 году Резерфорд назвал *периодом полураспада*, одинаков для любого количества атомов в пределах разумного.

Оказалось, что период полураспада определенных изотопов не зависит от изменения условий внешней среды, таких как температура и давление. Физики научились немного (на не-



сколько процентов) изменять период полураспада отдельных элементов, но это скорее исключение, чем правило.

Предположим, период полураспада некоего изотопа равен одному году. Тогда, если изъять 2 триллиона атомов этого изотопа, к концу года от них останется только 1 триллион. Теперь атомов стало в два раза меньше, значит, в будущем году количество распадающихся атомов также уменьшится в два раза, то есть в следующем году распадётся лишь полтриллиона атомов, а еще полтриллиона останется. К концу третьего года останется четверть триллиона и т. д.

В общем за первый период распадётся половина любого количества атомов, за второй — половина оставшихся и так до бесконечности, пока количество атомов не станет слишком маленьким. В этом случае статистические методы просто перестанут давать точные результаты.

Зная период полураспада изотопа, можно определить, сколько его атомов распадётся за определенное время, и таким образом оценить интенсивность его радиоактивного излучения. Также можно дать приблизительную оценку его интенсивности в прошлом и будущем.

Периоды полураспада радиоактивных изотопов могут быть как исчезающе короткими, так и чрезвычайно долгими. Период полураспада средней продолжительности можно определить непосредственно по скорости распада атомов элемента. Например, период полураспада радия-226 — 1620 лет.

Для определения продолжительности гораздо более длительных периодов используются косвенные методы. Возьмем, например, уран-238. Поскольку скорость распада его атомов очень мала, мы можем считать, что в течение определенного периода времени число атомов в куске урановой руды является константой. Обозначим это число N_0 . За одну секунду распадается определенная часть F_0 атомов урана. Таким образом, за одну секунду распадется $F_0 N_0$ атомов урана.

В процессе распада урана-238 образуется радий-226. Правда, это происходит не сразу: среди всех образующихся из урана-238 элементов радий-226 лишь пятый по счету. Но на данном этапе это для нас не имеет особого значения, поэтому давайте предположим, что из урана-238 сразу образуется радий-226.

Тогда так как за одну секунду распадается $F_0 N_0$ атомов урана, то за одну секунду образуется $F_0 N_0$.

Радий-226 также начинает распадаться со скоростью $F_0 N_0$ атомов в секунду. Так как атомы радия-226 образуются из урана-238 и их число увеличивается, количество распадающихся атомов радия-226 также увеличивается до тех пор, пока не ста-

нет равным количеству образующихся атомов радия-226. Тогда количество атомов радия-226 становится постоянным, и это состояние называется *радиоактивным равновесием* урана-238 и радия-226. Математически это равновесие выражается так:

$$F_u N_u = F_r N_r \quad (\text{Уравнение 8.8})$$

или

$$\frac{F_u}{F_r} = \frac{N_r}{N_u} \quad (\text{Уравнение 8.9})$$

То есть доля атомов определенного элемента, распадающихся за одну секунду, обратно пропорциональна периоду полураспада этого элемента. Чем длиннее период полураспада, тем меньше атомов в секунду распадается. Если принять за период полураспада урана-238 H_u , радия-226 за H_r , то

$$\frac{F_u}{F_r} = \frac{H_r}{H_u} \quad (\text{Уравнение 8.10})$$

Теперь совместим уравнения 8.9 и 8.10:

$$\frac{H_r}{H_u} = \frac{N_r}{N_u} \quad (\text{Уравнение 8.11})$$

Другими словами, при радиоактивном равновесии соотношения количества атомов элемента-родителя и дочернего элемента равно соотношению их периодов полураспада. В урановых рудах атомов урана-238, в 2 800 000 раз больше, чем атомов радия-226. Таким образом, период полураспада урана-238 должен быть в 2 800 000 раз дольше, чем у радия-226, то есть около 4 500 000 000 лет.

Теперь понятно, почему уран-238 все еще присутствует в земной коре. Если возраст Солнечной системы от 5 до 6 миллиардов лет, значит, от исходного количества атомов урана-238 распалось всего чуть более половины.

Период полураспада урана-235 короче, чем урана-238, — всего 713 000 000 лет. То есть со времени образования Солнечной системы до наших дней дошло около 1% атомов урана-235. Неудивительно, что из каждой тысячи атомов урана лишь 7 являются атомами урана-235.

Сегодня количество атомов любого радиоактивного изотопа с периодом полураспада менее 500 000 000 лет исчезающе мало, если только он не образуется из какого-то другого элемента с большим периодом полураспада. Из всех элементов ряда $4x + 2$

приспособлен для жизни только уран-238, а из ряда $4x + 3$ — только уран-235.

Из всех атомов ряда $4x + 0$ продолжительностью полураспада, достаточной для того, чтобы являться родителем ряда, обладает лишь торий-232. Период его полураспада не менее 13 900 000 000.

Косвенным методом можно определить и гораздо более короткие периоды полураспада. Например, у изотопов, излучающих альфа-частицы, величина энергии этой частицы обратно пропорциональна периоду полураспада. Таким образом, зная энергию альфа-частиц (а ее можно определить по силе проникающей способности), можно высчитать продолжительность периода полураспада. Например, период полураспада полония-212 равен 0,0000003 секунды.

Если изотопы одного и того же элемента мало отличаются между собой по химическим свойствам, то они значительно отличаются по свойствам ядра, таким как период полураспада. Например, в то время как период полураспада тория-232 приблизительно 14 миллиардов лет, период полураспада тория-231 (у которого в ядре всего лишь на один нейтрон меньше) — всего лишь один день!

Стабильные изотопы

Обратив внимание на элементы трех радиоактивных рядов, представленных в табл. 5, 6, 7, можно заметить, что радиоактивные изотопы существуют и у устойчивых элементов. Например, у висмута таких изотопов пять — с атомным весом 210, 211, 212, 214 и 215, соответственно, у таллия — четыре — с атомным весом 206, 207, 208 и 210 и у свинца также четыре — с атомным весом 210, 211, 212 и 214. Так как все эти элементы содержатся в почве в больших количествах и не радиоактивны, у каждого из них должен быть хотя бы один стабильный изотоп.

Тем не менее все эти изотопы, как стабильные, так и нестабильные, являются радиоактивными. Напрашивается вопрос: а имеют ли изотопы нерадиоактивные элементы? Если имеют, то доказать это будет очень сложно, так как обычными лабораторными методами невозможно выделить изотопы (кроме некоторых исключительных случаев), да и радиоактивного излучения они не испускают.

Давайте предположим, что атомы элемента ионизированы, как в случае образования позитивных лучей (см. гл. 7). Тогда, так как в каждом атоме станет на один электрон меньше, их заряд будет равняться +1. Однако, если элемент состоит из двух

и более изотопов, образуется несколько групп ионов, различающихся массой.

Если пропустить поток таких положительных ионов через магнитное поле, то они будут лететь по кривой траектории, причем степень кривизны будет зависеть от заряда и массы отдельных частиц. В данном случае заряд всех ионов одинаков, но масса — различна! Чем легче частица, тем больше угол кривизны траектории ее полета. Теперь, если у всех ионов потока масса одинакова, то на фотопластинке они образуют одно пятно, однако если же поток электронов состоит из групп ионов с разными массами, то на пластинке будет уже несколько пятен, причем более тяжелые ионы образуют более темное и большее по размерам пятно.

В 1912 году Дж.Дж. Томсон, первооткрыватель электрона, проделал подобный эксперимент с неоном. Положительные лучи из неона оставляли на фотопластинке два пятна, по всей видимости ионов неона-20 и неона-22. Первое пятно было почти в 10 раз больше второго. Это говорило о том, что неон состоит из двух изотопов, неона-20 и неона-22, в пропорции примерно $\frac{1}{10}$. (Позднее было обнаружено присутствие и третьего изотопа, неона-21. Его содержание настолько мало, что из 1000 атомов неона 909 являются атомами неона-20, 88 — неона-22 и только 3 — атомами неона-21.)

В 1919 году работавший вместе с Томсоном английский физик Фрэнсис Уильям Астон (1877—1945) сконструировал более совершенное устройство для анализа положительных лучей. В этом устройстве положительные лучи определенной массы не просто оставляли отпечаток на фотопластинке; они особым образом отклонялись, и при этом повышалось разрешение. В результате пучок ионов одного элемента отпечатывался на фотопластинке в виде последовательности точек («массовый» спектр вместо оптического). По положению точек можно оценить массу отдельных изотопов, а по степени затемнения можно определить, с какой частотой эти изотопы встречаются в данном веществе (то есть *относительное содержание*). Устройство получило название *масс-спектрограф*.

С помощью масс-спектрографа ученые определили, что большинство устойчивых элементов состоит из двух и более стабильных изотопов. Полный список этих стабильных изотопов¹ приведен в табл. 8.

По данным таблицы можно сделать следующие выводы. Во-первых, несмотря на то что большинство из 81 устойчивого

¹ Или же изотопы с настолько низким уровнем радиоактивности, что их можно также считать стабильными.

элемента имеют два и более стабильных изотопа (а у олова их целых 10), из них 20 элементов имеют всего один изотоп. (Более того, у двух элементов с атомным числом менее 84 вообще нет стабильных изотопов. Эти два элемента с атомными числами 43 и 61 подробно описаны в гл. 10.)

По правде говоря, элемент не может иметь «один изотоп», так как изотопы по определению являются двумя и более элементами, занимающими одну и ту же ячейку периодической системы. В данном случае элемент имеет «одного близнеца», и правильнее называть их *нуклидами*, то есть элементами с определенной структурой ядра. Тем не менее термин «изотоп» настолько прижился, что я буду продолжать говорить об «одном изотопе».

Не все из 282 приведенных в табл. 7 нуклидов действительно стабильны. 18 из них являются радиоактивными, однако их период полураспада настолько велик, что радиоактивное излучение у них очень слабое. Периоды полураспада некоторых из них достигают квадриллионов лет, поэтому их радиоактивностью можно просто пренебречь. Однако 7 из них очень радиоактивны, поэтому я и привел их в табл. 9.

Таблица 8

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ

| Атомное число | Химический элемент | Изотопы |
|---------------|--------------------|----------------|
| 1 | Водород | 1, 2 |
| 2 | Гелий | 3, 4 |
| 3 | Литий | 6, 7 |
| 4 | Бериллий | 9 |
| 5 | Бор | 10, 11 |
| 6 | Углерод | 12, 13 |
| 7 | Азот | 14, 15 |
| 8 | Кислород | 16, 17, 18 |
| 9 | Фтор | 19 |
| 10 | Неон | 20, 21, 22 |
| 11 | Натрий | 23 |
| 12 | Магний | 24, 25, 26 |
| 13 | Алюминий | 27 |
| 14 | Кремний | 28, 29, 30 |
| 15 | Фосфор | 31 |
| 16 | Сера | 32, 33, 34, 36 |
| 17 | Хлор | 35, 37 |
| 18 | Аргон | 36, 38, 40 |
| 19 | Калий | 39, 40, 41 |

| Атомное число | Химический элемент | Изотопы |
|------------------|-----------------------|--|
| 20 | Кальций | 40, 42, 43, 44, 46, 48 |
| 21 | Скандий | 45 |
| 22 | Титан | 46, 47, 48, 49, 50 |
| 23 | Ванадий | 50, 51 |
| 24 | Хром | 50, 52, 53, 54 |
| 25 | Марганец | 55 |
| 26 | Железо | 54, 56, 57, 58 |
| 27 | Кобальт | 59 |
| 28 | Никель | 58, 60, 61, 62, 64 |
| 29 | Медь | 63, 65 |
| 30 | Цинк | 64, 66, 67, 68, 70 |
| 31 | Галлий | 69, 71 |
| 32 | Германий | 70, 72, 73, 74, 76 |
| 33 | Мышьяк | 75 |
| 34 | Селен | 74, 76, 77, 78, 80, 82 |
| 35 | Бром | 79, 81 |
| 36 | Криптон | 78, 80, 82, 83, 84, 86 |
| 37 | Рубидий | 85, 87 |
| 38 | Стронций | 84, 86, 87, 88 |
| 39 | Иттрий | 89 |
| 40 | Цирконий | 90, 91, 92, 94, 96 |
| 41 | Ниобий | 93 |
| 42 | Молибден | 92, 94, 95, 96, 97, 98 |
| 44 | Рутений | 86, 98, 99, 100, 101, 102, 104 |
| 45 | Родий | 103 |
| 46 | Палладий | 102, 104, 105, 106, 108, 110 |
| 47 | Серебро | 107, 109 |
| 48 | Кадмий | 106, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116 |
| 49 | Индий | 113, 115 |
| 50 | Олово | 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 124 |
| 51 | Сурьма | 121, 123 |
| 52 | Теллур | 120, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 130 |
| 53 | Йод | 127 |
| 54 | Ксенон | 124, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 136 |
| 55 | Цезий | 133 |
| 56 | Барий | 130, 132, 134, 135, 136, 137, 138 |
| 57 | Лантан | 138, 139 |
| 58 | Церий | 136, 138, 140, 142 |
| 59 | Прозеродим | 141 |
| 60 | Неодим | 142, 143, 144, 145, 146, 148, 150 |
| 62 | Самарий | 144, 147, 148, 149, 150, 152, 154 |
| 63 | Европий | 151, 153 |
| 64 | Гадолиний | 152, 154, 155, 156, 157, 158, 160 |
| 65 | Тербий | 159 |
| 66 | Диспрозий | 156, 158, 160, 161, 162, 163, 164 |

| Атомное число | Химический элемент | Изотопы |
|---------------|--------------------|-----------------------------------|
| 67 | Гольмий | 165 |
| 68 | Эрбий | 162, 164, 166, 167, 168, 170 |
| 69 | Тулий | 169 |
| 70 | Иттербий | 168, 170, 171, 172, 173, 174, 176 |
| 71 | Лютеций | 175, 176 |
| 72 | Гафний | 174, 176, 177, 178, 179, 180 |
| 73 | Тантал | 180, 181 |
| 74 | Вольфрам | 180, 182, 183, 184, 186 |
| 75 | Рений | 185, 187 |
| 76 | Осмий | 184, 186, 187, 188, 189, 190, 192 |
| 77 | Иридий | 191, 193 |
| 78 | Платина | 190, 192, 194, 195, 196, 198 |
| 79 | Золото | 197 |
| 80 | Ртуть | 196, 198, 199, 200, 201, 202, 204 |
| 81 | Таллий | 203, 205 |
| 82 | Свинец | 204, 206, 207, 208 |
| 83 | Висмут | 209 |

Может показаться странным, что радиоактивность не была обнаружена ранее, особенно на примере калия-40, так как калий — вполне обычный химический элемент, а у калия-40 (входит в список элементов табл. 9) период полураспада короче, чем у урана-238 и урана-232, поэтому он и более радиоактивный.

На то есть две причины. Во-первых, в природе калий-40 встречается довольно редко: из 10 000 атомов калия только 1 является атомом калия-40. Во-вторых, хотя и уран, и торий являются родителями ряда очень радиоактивных элементов, именно их дочерние элементы порождают явления, которые наблюдали Беккерель и Кюри.

Ни один из радиоактивных элементов с длинным периодом полураспада, являющийся изотопом более легких элементов, не может быть родителем радиоактивного ряда. Они испускают бета-частицу и тут же становятся стабильными изотопами элемента с атомным числом, больше на 1. Таким образом, рубидий-87 становится устойчивым стронцием-87, лантан-138 становится устойчивым церием-138 и т. д.

У калия-40 все немного по-другому. Около 89% всех распадающихся атомов калия-40 действительно излучают бета-частицу и превращаются в устойчивый кальций-40. Ядра оставшихся 11% атомов поглощают электрон К-оболочки (см. гл. 5), и этот процесс получил название *К-захват*. Этот захваченный электрон нейтрализует положительный заряд протона, и в итоге в

ядре попадается еще один нейтрон. При этом количество нуклонов не меняется, а следовательно, и атомный вес остается прежним, но вот атомное число уменьшается на 1. Путем К-захвата калий-40 (атомное число 19) становится устойчивым аргон-40 (атомное число 18).

В какой-то мере самым необычным из всех стабильных изотопов является водород-2, ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона, в отличие от ядра водорода-1, которое состоит только из одного протона. Соотношение разницы массы у этих двух элементов намного больше, чем у двух любых стабильных изотопов любого другого элемента.

Например, масса урана-238 в 238/235, или 1,013, раза больше массы урана-235, олова-124 (самый тяжелый изотоп этого элемента) — в 1,107 раза больше массы олова-112 (самого легкого). Масса кислорода-18 в 1,125 раза больше массы кислорода-16. А масса водорода-2 в 2 раза больше массы водорода-1.

Эта огромная разница относительной массы двух изотопов водорода говорит о том, что по физическим и химическим свойствам эти два элемента отличаются друг от друга сильнее, чем изотопы других веществ. Точка кипения обычного водорода 20,38 °К, а у водорода-2 («тяжелый водород») — 23,50 °К.

Опять-таки плотность обычной воды — 1000 граммов на кубический сантиметр, а температура замерзания 273,1 °К (0 °С), в то время как у воды, молекулы которой состоят из водорода-2 («тяжелой воды»), плотность 1,108 грамма на кубический сантиметр, а температура замерзания — 276,9 °К (3,8 °С).

Учитывая все особенности водорода-2, ему дали особое название — *дейтерий* (от греч. «второй»). Его символ — D, и формула тяжелой воды выглядит как D₂, а тяжелой воды — D₂O.

Физики предположили возможность существования дейтерия еще в самые первые годы изучения изотопов, так как атомный вес водорода был немного выше, чем он должен быть.

Таблица 9

ЛЕГКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ НУКЛИДЫ

| Нуклид | Период полураспада (лет) |
|-------------|--------------------------|
| Калий-40 | 1 300 000 000 |
| Рубидий-87 | 47 000 000 000 |
| Лантан-138 | 110 000 000 000 |
| Самарий-146 | 106 000 000 000 |
| Лютеций-176 | 36 000 000 000 |
| Рений-187 | 70 000 000 000 |
| Платина-190 | 700 000 000 000 |

Как показали подсчеты, энергетические уровни единственного электрона водорода-1 и водорода-2 распределены немного по-разному, поэтому в спектре водорода должны присутствовать слабые линии водорода-2. Однако этого не наблюдается, да и масс-спектрографом водород-2 обнаружен не был. Возможно, причина кроется в том, что водород-2 в природе встречается довольно редко: из 7000 атомов водорода только один является атомом водорода-2.

В 1931 году американский химик Гарольд Юри (1893—1981) решил провести следующий эксперимент. Он оставил 4 литра водорода испаряться до 1 куб. см, полагая, что поскольку водород-2 испаряется медленнее, то он сконцентрируется в этой «последней капле». Юри оказался прав. В спектре последней капли он обнаружил линии дейтерия точно там, где они, по расчетам, и должны были быть.

Глава 9

ЯДЕРНАЯ ХИМИЯ

Массовое число

Люди, особо любящие порядок во всем, могут попытаться «поделить» атом между химиками и физиками, отдав первым электроны, а вторым — ядро.

Однако с научной точки зрения этого делать нельзя. Поэтому, несмотря на то что изучение структуры ядра резко отличается от изучения обычных химических реакций, химики должны интересоваться структурой ядра, хотя бы потому, что от нее зависит базовая величина химии — атомный вес.

В конце XIX века считали, что с атомным весом все было ясно и понятно. Как казалось химикам, атомный вес каждого элемента уникален и в будущем нужно лишь уточнить его значения до четвертого и пятого разряда десятичной дроби.

Открытие изотопов поставило под сомнение уникальность атомного веса. Оказалось, что идея Дальтона о том, что масса всех атомов одного и того же элемента одинакова, а следовательно, одинаков и атомный вес этих атомов, в корне неверна, так как большинство элементов состоит из двух и более типов атомов разной массы. Атомный вес — лишь среднее взвешенное масс атомов изотопов.

Раз «атомный вес» — это среднее взвешенное масс изотопов элемента, значит, нельзя говорить об «атомном весе» изотопа.

Для обозначения относительной массы изотопа лучше использовать термин *массовое число*.

Таким образом, мы можем сказать, что неон состоит из трех изотопов, массовые числа которых 20, 21 и 22. Неон-20 составляет около $\frac{9}{10}$ всех атомов неона, в то время как большая часть оставшейся $\frac{1}{10}$ состоит из атомов неона-22. Так как концентрация неона-21 слишком мала, чтобы иметь хоть какое-то влияние, то можем ею пренебречь и считать, что из 10 атомов неона 9 имеют массу 20, а 1 — массу 22. Вместе получается 20,2, что приблизительно равно атомному весу неона.

Хлор состоит из двух изотопов, массовые числа которых 35 и 37, причем хлор-35 составляет $\frac{3}{4}$, а хлор-37 — $\frac{1}{4}$ всех атомов хлора. Средняя масса четырех атомов, три из которых имеют массу 35, а один — 37, равна 35,5, что также приблизительно равно атомному весу хлора.

Гипотеза Прута (см. гл. 2) о том, что атомные веса всех элементов были кратными целыми веса водорода, в XIX веке подвергалась жесткой критике. Однако в XX веке выяснилось, что действительно, массовые числа всех без исключения изотопов являются практически точными кратными массы атома водорода. Это и возродило гипотезу Прута в более сложной интерпретации. Хотя химические элементы и не состоят из атомов водорода, но (не учитывая практически невесомых электронов) все они состоят из нескольких нуклонов практически одинаковой массы, а атом водорода состоит из одного такого нуклона.

Атомные веса некоторых элементов являются целыми или близкими к целым числам потому, что эти элементы состоят из одного изотопа, как, например, алюминий, или же один из изотопов этого элемента наиболее распространен, как, например, кальций. Кальций состоит из 6 стабильных изотопов, массовые числа которых 40, 42, 43, 44, 46 и 48, но атомы кальция-40 составляют 97% всех атомов кальция. К этим двум классам принадлежат большинство элементов, поэтому Прут и сделал такие выводы.

Именно из-за этого «дисбаланса» изотопов некоторые элементы занимают «не свои места» в периодической таблице. Например, кобальт, атомное число которого 27, состоит из единственного изотопа с массовым числом 59. Таким образом, его атомный вес примерно 58,9¹. По идее у никеля, атомное число которого больше (28), и атомный вес должен быть выше. Никель состоит из 5 изотопов, массовые числа которых 58, 60, 61, 62 и 64, и неудивительно, что массовые числа четырех из них выше, чем у оставшегося изотопа никеля. Однако именно этот самый легкий

¹ А почему не точно? См. гл. 11.

изотоп, никель-58, в природе наиболее распространен. Атомов никеля-58 в два раза больше, чем атомов всех остальных изотопов никеля, вместе взятых. Поэтому атомный вес никеля около 58,7, что ниже, чем у кобальта.

Таким образом, оказывается, что значение атомного веса вовсе не носит фундаментального характера и не может являться характеристикой элемента. А казался он таковым исключительно потому, что свойства всех изотопов одного и того же элемента практически идентичны. Процессы, благодаря которым соединения элементов сконцентрировались на тех или иных участках земной поверхности или же благодаря которым ученым удалось выделить тот или иной элемент в лаборатории, действуют на все изотопы одного и того же вещества одинаково. Таким образом, два образца любого вещества, независимо от того, как они были получены, содержат изотопы практически в одинаковых пропорциях, и поэтому атомный вес этих веществ одинаков, то есть является характерным для этого вещества.

Впрочем, существуют и исключения, лучшим примером которых является свинец. Все радиоактивные ряды (см. гл. 8) заканчиваются определенным изотопом свинца. Ряды, начинающиеся с урана-238 и урана-235, заканчиваются свинцом-206 и свинцом-207, причем свинца-206 образуется гораздо больше, так как атомов урана-238 намного больше, чем урана-235. Ториевый же ряд заканчивается свинцом-208.

Атомный вес обычного свинца, содержащегося в нерадиоактивных рудах, равен примерно 207,2. В урановых рудах, где в течение многих геологических периодов образовывался свинец-206, его атомный вес должен быть немного ниже, а атомный вес свинца, содержащегося в ториевых рудах, немного выше. В 1914 году американский химик Теодор Ричардс (1868—1928) провел измерения их атомных весов и обнаружил, что действительно атомный вес свинца, содержащегося в урановых рудах, равен 206,1, а атомный вес свинца, содержащегося в ториевых рудах, — 207,9.

Среди нерадиоактивных элементов таких вариаций атомного веса обычно не наблюдается. Однако обнаружено, что атомный вес некоторых легких элементов зависит от условий, при которых этот элемент был получен. Например, соотношение кислорода-16 и кислорода-18 в карбонате кальция (CaCO_3), из которого состоит морская раковина, зависит от температуры воды, в которой находилась образовавший раковину организм. С помощью точных измерений соотношений содержания этих изотопов в окаменелых морских раковинах можно определить, какова была температура воды Мирового океана в различные геологические периоды.

Обнаружение изотопов кислорода привело к некоторой неразберихе с атомными весами. Еще при Берцелиусе за эталон атомного веса был принят атомный вес кислорода, равный 16. Однако в 1929 американский химик Уильям Джиок (1895—1982) обнаружил, что кислород состоит из трех изотопов — кислорода-16, кислорода-17 и кислорода-18, а его атомный вес равен среднему арифметическому массовых чисел этих изотопов.

С другой стороны, кислород-16 составляет почти 99,759% всего кислорода, и поэтому можно считать, что кислород состоит всего лишь из одного изотопа. Химики еще в течение целого поколения предпочитали игнорировать существование других изотопов и пользовались прежними атомными весами, получившими название *химические*.

Физики же предпочли принять за 16 массовое число кислорода-16 и вычислять массовые числа остальных элементов относительно этого изотопа. В качестве аргументов они приводили следующее: массовое число изотопа постоянно и не меняется, в то время как атомный вес элемента, состоящего из нескольких изотопов, будет меняться в зависимости от относительного содержания этих изотопов в конкретном образце данного элемента.

Исходя из того, что массовое число кислорода-16 равно 16, физики составили новую таблицу атомных весов, на этот раз уже *физических*. Согласно этой новой таблице, атомный вес кислорода равен 16,0044 (за счет кислорода-17 и кислорода-18), что на 0,027% больше, чем химический атомный вес кислорода, равный 16. Атомный вес любого элемента по таблице физиков на 0,027 больше атомного веса того же элемента по таблице химиков, а так как разница невелика, то она лишь создает ненужные сложности при точных расчетах.

В 1961 году физики и химики пришли к компромиссу, приняв за массовое число углерода-12 величину 12 и высчитав атомные веса всех остальных элементов относительно углерода-12. Как и хотели физики, атомные веса были привязаны к массовому числу, то есть к постоянной величине. Более того, величины атомных весов элементов по новой системе практически не отличались от их химических атомных весов. Например, по новой системе атомный вес кислорода равнялся 15,9994, что всего лишь на 0,0037% меньше химического атомного веса кислорода. Атомные веса, приведенные в табл. 2, гл. 1, высчитаны относительно углерода-12.

Так как атомный вес является средним взвешенным массовых чисел встречающихся в природе изотопов, то можно говорить лишь об атомном весе примордиальных элементов, тех элементов, которые были на Земле с самого момента ее образования, то есть

появились одновременно. Таких элементов всего 83, из них 81 стабильный элемент (с атомным весом от 1 до 83, исключая элементы с атомным весом 43 и 61) и два относительно стабильных элемента — уран и торий.

Элементы, образующиеся из урана и тория, являются изотопами, значение массовых чисел которых зависит от того, содержатся эти элементы в урановой или в ториевой руде. Вычислить среднее арифметическое таких чисел невозможно, поэтому нельзя определить и атомное число. В результате за атомный вес этих элементов (и других нестабильных элементов, речь о которых пойдет в следующей главе) принято считать массовое число изотопа с самым длительным периодом полураспада. В таблицах такие массовые числа обычно пишут в квадратных скобках, как, например, в табл. 10. Из приведенных в этой таблице изотопов радон и радий являются дочерними элементами уранового ряда, а франций, актиний и протактиний — актиниевого ряда. Эти 5 элементов встречаются в природе, в то время как полоний-209 и астатин-210 получены искусственным путем.

Таблица 10

АТОМНЫЕ ВЕСА РАДИОАКТИВНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

| Химический элемент | Массовое число изотопа с самым долгим периодом полураспада | Период полураспада |
|--------------------|--|--------------------|
| 84 — полоний | [209] | 103 года |
| 85 — астатин | [210] | 8,3 часа |
| 86 — радон | [222] | 3,8 дня |
| 87 — франций | [223] | 22 минуты |
| 88 — радий | [226] | 1 620 лет |
| 89 — актиний | [227] | 21,2 года |
| 91 — протактиний | [231] | 32 480 лет |

Радиоактивное датирование

Изотопы свинца поменяли не только представления химиков об атомных весах, но и представления геологов об истории Земли.

В 1907 году американский физик Бертрам Борден Болтвуд (1870—1927) предложил вычислять возраст полезных ископаемых по радиоактивным рядам.

Предположим, что столько-то лет назад под действием морской седиментации или вулканической активности на поверх-

ности земли сформировался слой застывшей породы, содержащей уран или торий. Атомы урана или тория оказались внутри этого слоя «в ловушке». Атомы свинца, образующиеся в результате распада урана и тория, также окажутся «в ловушке».

На протяжении всего времени с момента отвердевания слоя породы атомы урана или тория будут распадаться, а содержание свинца соответственно увеличиваться. То есть со временем соотношение уран/свинец и торий/свинец в слое будет увеличиваться.

К этому времени Резерфорд уже разработал концепцию полураспада, поэтому стало ясно, что это соотношение будет увеличиваться с известной скоростью. Таким образом, зная величину соотношения урана/свинца или же тория/свинца в любой произвольный момент времени (например, в настоящий), можно вычислить, сколько прошло времени с момента застывания породы. А поскольку периоды полураспада урана-238 и тория-232 чрезвычайно длинные, можно определить возраст до нескольких миллиардов лет.

Основная сложность здесь заключалась в том, что не все атомы свинца, содержащиеся в породе, образовались в результате распада урана или тория, ведь их произвольная часть могла присутствовать в породе в момент застывания наравне с ураном и торием. Такой примордиальный свинец не имеет никакого отношения к распаду урана и тория и приводит к появлению серьезных ошибок при расчетах.

Проблему удалось обойти, определив с помощью масс-спектрографа относительное содержание свинца в нерадиоактивной породе. Выяснилось, что этот свинец состоит из четырех стабильных изотопов свинца с массовыми числами 204, 206, 207 и 208, причем свинец-204 достигает 1,48% ($1/67,5$) от общей массы.

К счастью, свинец-204 не является конечным продуктом ни одного из радиоактивных рядов, значит, на его содержание радиоактивность не влияет. Теперь, если определить содержание в радиоактивной породе свинца-204 и умножить это число на 67,5, то полученное значение будет являться общим количеством присутствующего в породе примордиального свинца. Все, что свыше, является свинцом, образовавшимся в процессе радиоактивного распада.

По соотношению урана/свинца (и учитывая содержание свинца-204) удалось обнаружить застывшие породы, возраст которых более 4 000 000 000. Это является лучшим доказательством того, что Земля образовалась миллиарды лет назад.

Конечно же уран и торий далеко не самые распространенные элементы, и породы с достаточным для точного определе-

ния возраста содержанием урана и тория можно обнаружить только в строго определенных местах. Однако определять возраст можно и по рубидию-87, и по калию-40. Оба этих элемента обладают длительным периодом полураспада и в природе встречаются гораздо чаще, нежели уран и торий. В случае с рубидием-87 определяется соотношение рубидий/стронций, так как стронций-87 является конечным продуктом распада рубидия-87. (Количество примордиального стронция определить невозможно, так как другие изотопы стронция, присутствующие в породе, в процессе радиоактивного распада не образуются.) Ученым удалось найти содержащие рубидий минералы, застывшие более 4 000 000 000 лет назад.

С калием-40 не все так просто. В большинстве случаев калий-40 распадается до кальция-40, но содержание кальция-40 в земной коре слишком высоко, чтобы отличить кальций-40, образовавшийся в процессе радиоактивного распада, от примордиального кальция-40. Однако определенное количество кальция-40 путем К-захвата превращается в аргон-40 (ниже).

Аргон — один из содержащихся в атмосфере благородных газов. Все эти газы, за исключением аргона-40, встречаются на Земле в исчезающе малых количествах. Возможно, что за заре своей истории Земля могла удерживать лишь твердые химические соединения, в то время как газообразные вещества просто «улетали», либо из-за малой массы, либо из-за высокой температуры планеты. А благородные газы как раз и не образуют никаких химических соединений.

С другой стороны, аргон-40 составляет около 1% атмосферы. Это значит, что аргон-40 образовался уже после того, как масса и температура Земли приблизились к современному значению (то есть когда у Земли появилась способность удерживать благородные газы). Скорее всего, аргон-40 появился в процессе распада калия-40. Если подсчитать, сколько времени для этого понадобилось, то получится, что Земля в ее современном облике существует уже не менее 4 000 000 000 лет.

Итак, различные методы вычисления возраста дают одну и ту же цифру, которая и является общепринятой на сегодняшний день.

Ядерные реакции

Пока атом считался неделимой частицей, было ясно, что его структуру невозможно изменить в лабораторных условиях за отсутствием таковой. Однако как только обнаружилось, что

атом состоит из огромного количества упорядоченных субатомных частиц, у ученых зародилась мысль о том, что этот порядок можно каким-либо образом изменить.

Порядок электронов внешних оболочек атомов изменить довольно просто. Для этого достаточно заставить атомы и молекулы сталкиваться между собой, что ученым удалось сделать еще в XIX веке, подвергая атомы и молекулы нагреванию. Здесь безраздельно правили химии: обычные химические реакции происходят именно за счет перераспределения электронов.

А можно ли перестроить структуру самого ядра? Столь фундаментальная перестройка атома элемента приведет к его превращению в атом другого элемента.

Для того чтобы при столкновении двух атомов их ядра соприкоснулись, преодолев «подушку» из электронов, нужно подвергнуть эти атомы нагреванию до чрезвычайно высокой температуры. К счастью, в XX веке был найден способ обойтись и без высоких температур. Радиоактивные элементы испускают субатомные частицы и при комнатной температуре. Одна из таких частиц — альфа-частица — как раз и является «голым» атомным ядром (атома гелия).

Конечно же направить альфа-частицу в определенное атомное ядро невозможно, но с точки зрения статистики из достаточно большого количества альфа-частиц хотя бы несколько попадут в ядро. Исследуя такие столкновения и «почти» столкновения, Резерфорд и разработал концепцию атома с атомным ядром и рассчитал размер ядра (см. гл. 4).

С другой стороны, столкновения, в результате которых атом и альфа-частица лишь отклоняются или отталкиваются друг от друга, не приводят к изменениям ни того ни другого.

Здесь нужно нечто большее. После серии экспериментов, результаты которых были опубликованы в 1919 году, Резерфорд доказал, что иногда это «нечто большее» все-таки происходит. В начале своих опытов Резерфорд поместил источник альфа-частиц в закрытый цилиндр, одним концом которого был покрыт слоем сульфида цинка.

Когда альфа-частица ударяется о сульфид цинка, возникает вспышка люминесценции, или сцинтилляция (мерцание). Это происходит потому, что за счет кинетической энергии альфа-частицы происходит возбуждение молекулы цинка, а возвращаясь в свое прежнее состояние, молекула испускает фотон видимого света. (Впервые это явление наблюдал Беккерель в 1899 году. Позже такой способ стали применять при производстве светящихся объектов. Смесь небольшого количества соединений радия с сульфидом цинка или некоторых других ве-

шесть дает свечение, легко заметное в темноте. Самым «пиком» 1920-х годов стали часы, на циферблатах которых цифры были нанесены такими вот люминесцентными материалами.)

Если рассматривать мерцающий экран в темноте (когда глаза привыкли к темноте и легко замечают даже слабый свет) с помощью лулы, то можно увидеть каждую вспышку в отдельности. Учитывая, что каждая вспышка вызвана попащей в экран альфа-частицей, то, подсчитав количество вспышек в заданной области за определенное время, можно определить скорость распада некоторой массы радиоактивного вещества и с помощью этого выяснить, например, период полураспада данного вещества. Прибор, который Резерфорд использовал в своих экспериментах, получил название *сцинтилляционный счетчик*.

В современных сцинтилляционных счетчиках используются более эффективные сцинтилляторы, а вспышки подсчитываются с помощью фотоэлементов и электроники.

Если же в трубке присутствует газ (например, углекислый или кислород), количество вспышек на экране становится меньше. Это происходит потому, что, сталкиваясь с молекулами газа, альфа-частицы замедляются и некоторые из них присоединяют электроны и становятся обычными атомами гелия. Поэтому до экрана «добирается» меньше частиц, и уровень их кинетической энергии ниже.

Однако если заполнить трубку водородом, то на экране время от времени начинают появляться очень яркие вспышки. Это можно объяснить тем, что иногда альфа-частица сталкивается с ядром водорода (то есть с протоном) и тот, оставив свой электрон, устремляется вперед. В этом случае скорость протона будет гораздо выше, чем у тяжелых ядер углерода и кислорода, и достаточной для того, чтобы при его столкновении с экраном возникла яркая вспышка.

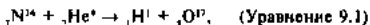
Резерфорд обнаружил, что если заполнить трубку азотом, то на экране также появляются фотонные вспышки. Альфа-частица не могла толкнуть ядро атома азота сильнее, чем ядра углерода или кислорода, но вполне могла выбить из него протон, который и устремлялся к экрану.

В 1925 году английский физик Патрик Блэкетт (1897—1974) доказал это. Он бомбардировал альфа-частицами атомы азота внутри камеры Вильсона. В большинстве случаев альфа-частица оставляла за собой след из водяных капель, но сталкиваясь ни с одним ядром, и, когда ее энергия уменьшалась, присоединяла электроны и исчезала. Однако одна из 350 000 альфа-частиц все же встречала на своем пути препятствие.

В этом случае след ее траектории раздвигался на конце. Один конец был тоньше и довольно длинный. Это — ионизирующий протон, с меньшим, чем у альфа-частицы, зарядом (+1 против +2). Второй след был толстый и короткий. Это — отскочившее ядро атома азота, лишенное большинства электронов, благодаря чему оно получило высокий положительный заряд и соответственно сильные ионизирующие свойства. Тем не менее оно двигалось медленно и, быстро набрав электроны, лишилось этих свойств. Никаких следов альфа-частицы не было, значит, она присоединилась к ядру атома азота.

В 1919 году Резерфорд стал первым, кому удалось изменить структуру атомного ядра, то есть провести первую искусственную ядерную реакцию. (Это что-то вроде «ядерной химии»: нуклоны перераспределяются аналогично тому, как перераспределяются электроны в процессе обычной химической реакции.)

Предположим, вначале у нас было ядро атома азота (7 протонов, 7 нейтронов). Добавим сюда альфа-частицу (2 протона, 2 нейтрона) и вычтем протон, который был «выбит» альфа-частицей. Получаем атом, состоящий из 8 протонов и 9 нейтронов, то есть кислород-17. В записи это выглядит так:



где подстрочный индекс — атомные числа, а надстрочный — массовые. ${}_2\text{He}^4$ — это ядро атома гелия, или альфа-частица, а ${}_1\text{H}^1$ — ядро атома водорода, или протон. Обратите внимание, что сумма атомных чисел в правой, и левой частей формулы равняется 9, а массовых чисел — 18. Согласно законам сохранения электрического заряда и массы, при любых ядерных реакциях суммы атомных и массовых чисел исходных и образующихся продуктов должны быть равны.

Физики разработали и более короткий способ записи формул ядерных реакций. Так как по названию элемента можно узнать его атомное число, в формуле его просто не пишут. Символом альфа-частицы является α , а протона — p . Таким образом, формулу 9.1 можно представить как: $\text{N}^{14}(\alpha, p)\text{O}^{17}$.

По этой системе в левой части записывается ядро-мишень, затем в круглых скобках название ударяющей по нему частицы, потом — выбиваемой частицы. В правой части записывается остаточное ядро. Все семейство (α, p) -реакций можно представить в виде аналогичной формулы: в любой из таких реакций атомное число остаточного ядра будет на 1, а массовое — на 3 выше, чем у ядра-мишени.

Резерфорд провел и другие (α, p)-реакции, однако встретился с серьезными ограничениями. Дело в том, что и альфа-частица, и ядро-мишень обладают положительным зарядом и отталкиваются друг друга. Чем выше атомное число ядра, тем сильнее они отталкиваются, и даже самым быстрым альфа-частицам радиоактивных элементов не хватает энергии, чтобы преодолеть силы отталкивания ядер элементов с зарядом выше калия (+19).

Нужно было найти способ получения субатомных частиц, энергия которых была бы выше, чем у радиоактивных частиц.

Электронвольт

Заряженную частицу можно ускорить, подвергнув ее действию электрического поля, направленного по ходу движения частицы. Чем выше потенциал этого электрического поля, тем выше ускорение и энергия частицы.

Частица с единичным зарядом, например электрон, под действием электрического поля напряжением 1 вольт получает заряд энергии, равный 1 *электронвольту* (сокращенно эв). 1 эв равен $1,6 \times 10^{-12}$. Для более крупных зарядов используется килоэлектронвольт (Кэв). 1 Кэв равняется 1000 эв.

Существуют также мегаэлектронвольт (Мэв), равный миллиону электронвольт, и миллиард электронвольт (Бэв)¹. Биллион электронвольт равняется $1,6 \times 10^{-9}$. В принципе это очень небольшое количество энергии, но для одной субатомной частицы оно просто огромно.

В последнее время в электронвольтах все чаще обозначают массу субатомных частиц. Масса электрона равна $9,1 \times 10^{-28}$ граммов. По формуле Эйнштейна $e = mc^2$ (см. ч. II) получаем энергетический эквивалент, равный $8,2 \times 10^{-7}$ эрг, что, в свою очередь, равно 510 000 эв, или 0,51 Мэв.

Длину волны электромагнитного излучения также можно представить в электронвольтах. Согласно квантовой теории, $e = h\nu$, где e — энергия одного кванта электромагнитного излучения, эрг; h — постоянная Планка, эрг/сек, ν — частота излучения, Гц.

Таким образом, длина волны (обозначается λ — «лямбда») равняется пройденному излучением за одну секунду в вакууме

¹ В разных частях света слово «биллион» имеет разные значения. Например, для американца это миллиард (1 000 000 000), в то время как для англичанина — биллион (1 000 000 000 000). То, что американцы называют биллионом, англичане называют «тысячей миллионов». В Великобритании 1 000 000 000 электронвольт называют гигаэлектронвольт (Гэв).

расстоянию (c), деленному на количество образовавшихся за это время волн, то есть частоту излучения ν :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (\text{Уравнение 9.2})$$

или

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (\text{Уравнение 9.3})$$

Поставив c/λ в формулу квантовой теории $e = h\nu$, получим:

$$e = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Уравнение 9.4})$$

или

$$\lambda = \frac{hc}{e}, \quad (\text{Уравнение 9.5})$$

где h равняется $6,62 \times 10^{-27}$ эрг-с, а $c = 3,00 \times 10^{10}$ см в секунду, соответственно hc равняется $1,99 \times 10^{-16}$ эрг. Приводим уравнение 9.5 к виду:

$$\lambda = \frac{1,99 \times 10^{-16}}{e}. \quad (\text{Уравнение 9.6})$$

Теперь, если мы подставим $1,6 \times 10^{-12}$ эрг (один электронвольт) вместо e в формуле 9.6, то получим $1,24 \times 10^{-4}$ сантиметров. Другими словами, излучение длиной 1,24 микрона (инфракрасный спектр) состоит из протонов, энергия которых 1 эв.

Таким образом, 1 Кэв — это энергия излучения, длина волны которого в 1000 раз больше 1 эв, т. е. 1,24 миллимикрона, или 12,4 ангстрема. Это уже диапазон рентгеновского излучения. Точно так же 1 Мэв — это энергия излучения, длина волны которого 0,0124 ангстрема (диапазон гамма-лучей).

По формуле 9.6, запас энергии видимого света колеблется от 1,6 эв для красной части спектра и 3,2 эв для фиолетовой. Видимый свет и ультрафиолетовое излучение поглощаются и испускаются во время обычных химических реакций. Таким образом, во время обычных химических реакций используется энергия не более 1—5 эв. Основная сложность проведения ядерных реакций заключается в том, что для таких реакций энергии нужно гораздо больше — тысячи, даже миллионы электронвольт.

Ускорители частиц

Устройства, испускающие субатомные частицы с уровнем энергии в несколько килоэлектронвольт и выше, получили название *ускорителей элементарных частиц*. Так как такие частицы используются для разрушения атомных ядер и возбуждения ядерных реакций, то устройства также называли ускорителями ядерных частиц, но сейчас этот термин практически вышел из моды.

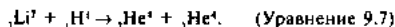
Первый удачный ускоритель частиц, адаптированный под ускорение протонов, был сконструирован английским физиком Джоном Кокрофтом (1897—1967) и его ирландским коллегой Эрнестом Уолтоном (1903—1995) в 1929 году.

Протоны в ядерных реакциях использовать удобнее, чем альфа-частицы, так как они обладают меньшим зарядом и поэтому меньше подвержены силам отталкивания ядра.

Кроме того, протоны являются ионизированными атомами водорода (H^+), в то время как альфа-частицы являются ионизированными атомами гелия (He^{++}), а водород гораздо легче ионизируется.

В ускорителе Кокрофта—Уолтона для получения огромного электрического заряда и ускорения протонов до 380 КэВ применялся *умножитель напряжений* (связка из нескольких конденсаторов).

В 1931 году ученые смогли настолько ускорить частицы, что им удалось разрушить ядро атома лития:



Это была первая полностью искусственная реакция, так как даже применявшиеся при ее проведении бомбардирующие частицы были получены искусственно.

В том же 1931 году были созданы еще три типа ускорителей частиц.

Американский физик Роберт Ван-де-Графф (1901—1967) построил механизм, внешне напоминавший половину гантели, поставленную на пол. Внутри находился «конвейер», переносивший положительный заряд в верхнюю часть, а отрицательный — в нижнюю, создавая огромный разноименный электростатический заряд. Благодаря значительной разности потенциалов с помощью такого *электростатического генератора* можно было разогнать частицы до 1,5 МэВ, а впоследствии и до 18 МэВ.

Ускорители последующего типа состояли из нескольких раздельных труб. Такое устройство давало возможность «толкать»

частицы в несколько приемов, а не одним мощным «пинком». Проходя по трубе, частица получала дополнительную энергию и скорость. Так как «толчки» осуществлялись через одинаковые периоды времени, то расстояние, которое частица проходила между «толчками», становилось все больше и больше, и каждая последующая труба должна была быть все длиннее и длиннее. Поэтому очень скоро *линейный ускоритель* стал слишком длинным и неудобным.

Эрнест Орландо Лоуренс (1901—1958) предложил схему самого компактного ускорителя. В его устройстве частицы перемещались не по прямой, а по кривой траектории, благодаря чему и удалось сэкономить место.

В центре закрытого плоского круглого сосуда помещается высокотемпературная спираль, ионизирующая водород для образования протонов. Противоположные части сосуда находятся под высоким напряжением, которое и ускоряет протоны. Находящиеся над и под сосудом магниты заставляют протоны двигаться по криволинейной траектории.

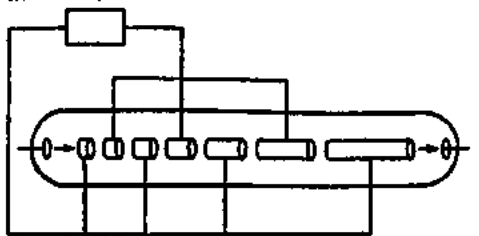
Двигающиеся по такой криволинейной траектории протоны в конце концов попадут в зону положительного заряда и начнут тормозиться. Однако сосуд находится под переменным током, и анод с катодом «меняются местами» с тщательно подобранной частотой.

Всякий раз, когда протоны, казалось бы, двигаются к аноду, тот становится катодом и протоны продолжают ускоряться. (Как будто борзая гонится за электрическим кроликом, который всегда остается впереди.)

По мере ускорения скорость протонов растет, и они делают обороты внутри сосуда все быстрее и быстрее. А часть переменного электрического поля остается прежней постоянной величиной. Происходит рассинхронизация, и протоны оказываются под действием отталкивающей силы анода, который не успевает вовремя стать катодом, что приводит к торможению протонов. (Борзая прибавила скорости и догнала электрического зайца.)

К счастью, по мере ускорения траектория протонов под действием магнитного поля становится менее криволинейной, и они начинают описывать большие круги. Их большая скорость просто-напросто компенсируется большим расстоянием, которое они проходят. Поэтому они продолжают передвигаться из одной половины в другую в соответствии с частотой электрического тока, постепенно все больше и больше удаляясь от центра сосуда. В конце концов они вылетают из него в виде потока частиц большой энергии.

Источник переменного тока



Вход

Трубы дрейфа

Выход

Линейный ускоритель частиц

Лоуренс назвал свой ускоритель *циклотроном*. Даже самая первая тестовая модель циклотрона — не более 25 сантиметров в диаметре — позволяла ускорять частицы до 80 КэВ. На протяжении последующих 10 лет строились все более крупные циклотроны, позволявшие ускорять частицы до 10 МэВ и более.

Идеального соответствия между движением частицы и частотой электрического тока можно добиться только при условии, что масса частицы не меняется. Это удается при нормальных условиях, однако в процессе ускорения скорость движения частиц начинает приближаться к скорости света. Согласно теории относительности (см. ч. II), в этом случае скорость частицы начинает расти очень и очень медленно (скорость движения частицы ни в коем случае не может быть выше скорости света), в то время как рост массы частицы все ускоряется и ускоряется.

Чем больше масса частицы, тем больше времени она затрачивает на один полуоборот и синхронизацию между движением частицы и частотой переменного тока. Это ограничивает максимальную скорость ускорения протона, и еще до Второй мировой войны эта максимальная скорость была достигнута.

В 1945 году американский физик Эдвин Макмиллан (1907—1991) и русский физик Владимир Векслер независимо друг от друга предложили способ обойти это ограничение. Ученые показали, как именно частоту переменного тока можно постепенно понижать без рассинхронизации с движением частицы постоянно увеличивающейся массы. В результате был построен *синхроциклотрон*.

Синхроциклотрон не способен испускать частицы высокой энергии непрерывно, так как частота переменного тока, приемлемая для частиц на последних стадиях ускорения, слишком низкая для частиц на начальных стадиях. Поэтому частицы ускоряются пакетами (по 60—300 частиц) в секунду: перед запуском нового пакета предыдущий должен пройти весь цикл. Однако значительное увеличение скорости частиц на выходе привело к сокращению их общего количества. Первый синхроциклотрон был построен в 1946 году, а несколькими годами позднее появились синхроциклотроны, позволяющие ускорять частицы до 800 Мэв.

При ускорении электронов проблема увеличения релятивистской массы появляется еще раньше. Электроны настолько легкие, что для придания хотя бы умеренного заряда их необходимо разогнать до очень высоких скоростей. Чтобы получить электрон с энергией всего лишь 1 Мэв, его нужно разогнать до 270 000 км/с, а это уже более $\frac{1}{10}$ скорости света.

При такой скорости масса электрона увеличивается в 2,5 раза по сравнению с состоянием покоя. Поэтому нет особого смысла разгонять электрон с помощью циклотрона, так как даже при небольших уровнях энергии электрона синхронизация уже будет невозможна.

Решение было найдено еще до появления синхроциклотрона. В 1940 году американский физик Дональд Керст разработал ускоритель, в котором электроны двигались по «бубликообразному» сосуду. С ростом скорости движения электронов увеличивалась интенсивность магнитного поля, заставляющего электроны двигаться по кругу. Так как увеличение интенсивности магнитного поля (заставляет электроны двигаться по меньшему радиусу) было согласовано с ростом массы электрона (заставляет электроны двигаться по большему радиусу), в конечном результате электроны не меняют свою траекторию. В определенный момент интенсивность магнитного поля резко изменяют, и несколько электронов высокой энергии вылетают из ускорителя. Керст назвал свой ускоритель *бетатроном*, так как бета-частицы являются электронами высокой энергии естественного происхождения. Ускоритель Керста испускал электроны с энергией до 2,5 Мэв, а самый современный бетатрон позволяет ускорять электроны до 340 Мэв.

Быстро движущиеся по орбитам электроны испытывают сильное центростремительное ускорение и согласно теории Максвелла испускают энергию в виде излучения. Это ограничивает максимальное ускорение электронов в любом устройстве, где электроны движутся по кругу. (Протоны менее подвержены этому явлению, так как при одинаковом уровне энергии скорость

движения протонов существенно ниже, чем у электронов, а значит, и центростремительное ускорение у них гораздо ниже.)

Поэтому сейчас принимаются усилия по строительству линейных ускорителей с длиной, достаточной (сейчас планируется строительство 3,5-километрового ускорителя) для ускорения электронов до 20 000 Мэв.

У синхроциклотрона есть один практический недостаток. Во время движения от центра к выходу частица описывает круги все большего и большего радиуса, поэтому необходимо использовать магниты, достаточные для покрытия максимального радиуса. Эти огромные магниты как раз и были узким местом при строительстве больших синхроциклотронов.

Поэтому целесообразнее было подстраивать интенсивность магнитного поля так, чтобы протоны двигались по кругу, а не по спирали. При такой «жесткой фокусировке» протоны двигаются максимально плотным и узким лучом. Построенные по такому принципу устройства получили названия *протонные* (и *электронные*) *синхротроны*.

К 1952 году были построены протонные синхротроны, способные разгонять частицы до нескольких Бэв. Такой синхротрон, способный испускать частицы с уровнем энергии до 6,2 Бэв, есть у университета штата Калифорния, и называется он *бэватрон*.

В 1960-х годах были построены два огромных ускорителя с жесткой фокусировкой (один в Женеве, второй в Брукхейвене, Лонг-Айленд). Эти ускорители способны разгонять протоны до 30 Бэв и выше. Планируется построить и еще большие, поистине колоссальные по размерам ускорители. Самые большие из существующих ускорителей равны в диаметре трем городским кварталам.

Глава 10

ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

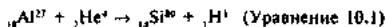
Радионуклиды

Первые атомные ядра, полученные путем искусственного превращения, были ядрами существующих в природе стабильных элементов. Например, Резерфорд получил кислород-17, а Кокрофт и Уолтон — гелий-47.

Однако в 1934 году французскому физiku Фредерику Жолио (1900—1958) и его жене, Ирен Жолио-Кюри (1897—1956), дочери первооткрывателей радия Пьера и Марии Кюри, удалось получить и другие элементы.

Жолио-Кюри продолжили начатую еще Резерфордом работу по бомбардировке альфа-частицами атомных ядер различных элементов. Они обнаружили, что при бомбардировке атомных ядер атомов алюминия возникает нейтронно-протонное излучение, которое после прекращения бомбардировки сразу же пропадает. Было и еще одно излучение¹, которое после прекращения бомбардировки исчезало постепенно, с периодом полураспада, равным 2,6 минуты. Очевидно, в атомах алюминия присутствует что-то, что в результате бомбардировки альфа-частицами делает их радиоактивными.

Следующая формула описывает, что происходит, когда атом алюминия-27 поглощает альфа-частицу и излучает протон:

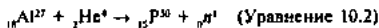


или

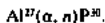


Кремний-30 — это стабильный изотоп, относительное содержание которого в кремнии всего лишь 3%.

При бомбардировке альфа-частицами атомы алюминия испускают нейтроны. Должно быть, имеет место реакция, в процессе которой ядро-мишень алюминия поглощает альфа-частицу и испускает нейтрон, получая в общей сложности 2 протона и 1 нейтрон. При такой (α, n)-реакции атомное число возрастает на два, а не на один, и алюминий становится фосфором, а не кремнием. Запишем формулу:



или



Однако встречающийся в природе фосфор состоит лишь из одного изотопа — фосфора-31. Другие изотопы фосфора неизвестны, значит, если в ходе ядерной реакции синтезируется другой изотоп фосфора, то он будет радиоактивным. Именно из-за радиоактивности (и короткого периода полураспада) такой изотоп не встречается в природе.

Супруги Жолио-Кюри доказали присутствие радиоактивного фосфора, расплавив алюминий и подвергнув его реакциям, в ходе которых любой изотоп фосфора либо улетучится в виде

¹ О природе этого излучения я расскажу ниже.

газообразного соединения, либо выпадет в виде твердого осадка. Образовавшиеся газ и осадок проявляли радиоактивные свойства.

Фосфор-30 стал первым синтезированным в лабораторных условиях и не встречающимся в природе изотопом, а его радиоактивные свойства — первым примером *искусственной радиоактивности*.

Первым и далеко не единственным. В последующие годы в ходе лабораторных ядерных реакций были получены более тысячи искусственных изотопов. Так как все эти изотопы являются радиоактивными, их часто называют *радиоизотопами*.

Ученым удалось получить радиоизотоп каждого устойчивого элемента, а иногда даже несколько радиоизотопов. Например, у цезия, состоящего всего лишь из одного стабильного изотопа (цезий-133), таких радиоизотопов целых 20 с массовыми числами от 123 до 148.

Периоды полураспада всех полученных изотопов слишком малы, и они не могли сохраниться в земной коре с момента образования планеты до наших дней. Конечно же по человеческим меркам периоды полураспада некоторых из них довольно длинные (период полураспада цезия-135 равняется 2 000 000 лет), но в планетарных масштабах они все равно слишком малы.

Возможно, во время образования Солнечной системы существовали атомные ядра всех мыслимых составов. Выжили же лишь устойчивые и слаборадиоактивные (например, калий-40 и уран-238). И действительно, все стабильные и слаборадиоактивные изотопы, которые могут существовать, на Земле существуют. Шансы обнаружить какой-либо еще стабильный или слаборадиоактивный изотоп практически равны нулю.

Может быть, изотопы, период полураспада которых меньше 500 000 000 лет, также существовали, но впоследствии они распались и исчезли: какие-то из них быстро, какие-то медленно. Сегодня благодаря труду ученых они возродились.

Использование изотопов в биохимии

Как только физики научились изолировать редкие изотопы и синтезировать новые, стало возможным создавать на их основе химические соединения. Если найти достаточно дешевый способ получения таких изотопов, то в химических экспериментах можно будет использовать большое количество соединений на их основе.

Первым используемым в «крупномасштабных» химических экспериментах стал стабильный водород-2, получаемый из «тяжелой воды» (см. гл. 8).

Путем органических химических реакций из тяжелой воды можно получить и другие химические соединения, молекулы которых содержат один или несколько атомов водорода-2. Если такие соединения вступают в химические реакции, то их можно определить, изолировав продукты реакции и выяснив, какие из них содержат водород-2. Химические соединения с содержанием редкого изотопа выше нормы называются *мечеными соединениями*, а атомы такого изотопа — *индикаторами*.

Этот метод особенно важен, когда меченое соединение реагирует внутри живой ткани, так как в этом случае можно проследить все имеющиеся чрезвычайно сложные трансформации. Начиная с 1935 года немецкий биохимик Рудольф Шоенгеймер (1898—1941) провел серию таких экспериментов, используя в своих исследованиях жирные молекулы, в огромном количестве присутствующие в водороде-2. Этот метод стал революцией в биохимии, так как давал возможность детально изучить химические реакции в тканях, что ранее было невозможно.

Шоенгеймер, как и другие ученые, использовал в своих исследованиях и более тяжелые изотопы — азот-15 и кислород-18, — относительное содержание которых соответственно 0,37 и 0,20. Оба этих элемента достаточно редко встречаются в природе, и большое их количество является эффективными индикаторами.

Применение радиоизотопов привело к увеличению чувствительности при использовании индикаторов, так как по сравнению со стабильными изотопами даже небольшое количество радиоактивных изотопов можно обнаружить гораздо легче и быстрее.

Радиоактивные индикаторы впервые были использованы в 1913 году венгерским физиком Георгом Хевеши (1885—1966). В то время единственными доступными радиоактивными изотопами были изотопы, составляющие различные радиоактивные ряды. Хевеши использовал свинец-210 для определения растворимости слаборастворимых соединений свинца. (Измерив уровень радиоактивности соединения до и после реакции, он определил долю присоединившегося свинца-210 и предположил, что эта доля была одинакова для всех изотопов свинца.)

В 1923 году Хевеши пометил соединения свинца изотопами свинца-212 и изучил поглощение свинца растениями. Это стало первым применением индикаторов в биологии. Однако в естественных условиях живая ткань не содержит свинца, бо-

лее того, свинец является сильнейшим ядом. Поведение ткани в присутствии свинца не является нормальным. По-настоящему широко применять радиоизотопы в биологии стали лишь после Второй мировой войны, когда появилась возможность получать в достаточном количестве радиоизотопы более «полезных» элементов.

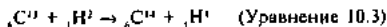
Еще одним препятствием для применения радиоизотопного анализа было то, что у наиболее характерных для ткани элементов очень мало радиоизотопов. 90% мягких тканей тела состоят из углерода, водорода, кислорода и азота. Например, самым долгоживущим радиоизотопом азота является азот-13, период полураспада которого равен всего лишь 10 минутам. Это значит, что, получив азот-13, нужно ввести его в состав подходящего химического соединения, затем каким-либо образом внедрить в ткань, где тот встретится со своей судьбой, после чего изолировать и проанализировать образовавшиеся продукты, и на все про все — не более получаса, хотя даже к этому времени уровень радиоактивности азота-13 понизится на $\frac{1}{4}$.

С кислородом дела обстоят еще сложнее. Самый долгоживущий из известных радиоизотопов кислорода — кислород-15, период полураспада которого всего лишь 2 минуты.

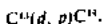
До 1940 года самым долгоживущим из радиоизотопов углерода считался углерод-11, период полураспада которого 20 минут. Это пограничный случай. С одной стороны, времени для маневра мало, но с другой — углерод является самым важным из всех элементов живой ткани. Поэтому биохимики начали разрабатывать методы выжимания максимума информации из химических реакций с соединениями, меченными углеродом-11, несмотря на ограничение по времени, вызванное коротким периодом полураспада.

Ученые не ожидали открыть более долгоживущий изотоп углерода. Однако в 1940 году в результате бомбардировки атомов углерода дейтронами (ядрами дейтерия, H^2) был открыт новый радиоизотоп углерода.

Дейтрон состоит из одного протона и одного нейтрона, и во время бомбардировки дейтронами атомы углерода отдают протоны, удерживая нейтроны. В результате такой (d, p)-реакции атомное число не изменяется, но массовое число увеличивается на единицу. Углерод состоит из двух стабильных изотопов — углерода-12 и углерода-13. Углерод-12 в результате реакции превращается в углерод-13, а вот с углеродом-14 происходит следующее:

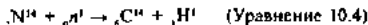


или

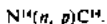


Углерод-14 является радиоактивным изотопом с неожиданным длинным периодом полураспада — более 5770 лет. А учитывая сравнительно небольшую продолжительность любого лабораторного эксперимента, его радиоактивность можно считать постоянной. Меченные углеродом-14 химические соединения можно использовать в огромном количестве биологических и биохимических экспериментов, и углерод-14, несомненно, является самым пригодным для этих целей радиоизотопом.

В 1946 году американский химик Уиллард Либби (1908—1980) предположил, что углерод-14 должен существовать в природе как результат реакции в присутствующем в атмосфере азоте-14, косвенно вызванной космическими излучениями высокой энергии¹. Реакция, по сути, является присоединением нейтрона и потерей протона. В результате такой (n, p) -реакции уменьшается лишь атомное число, массовое число остается неизменным. Таким образом:



или



Углерод-14 образуется постоянно и после образования разрушается. Между этими двумя процессами существует определенный баланс, и концентрация углерода-14 в атмосфере (углерод-14 входит в состав углекислого газа) постоянна, хотя и очень мала.

Позже Либби предположил, что, так как растения постоянно поглощают и используют углекислый газ, в их тканях должен содержаться углерод-14 постоянно, хотя и в очень малой концентрации. Углерод-14 должен содержаться и в тканях животных, так как животные питаются растениями (или травоядными животными).

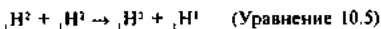
Однако постоянство концентрации поддерживается, только пока ткань жива, так как только в этом случае ткани непрерывно впитывают радиоактивный углерод (путем поглощения атмосферного углекислого газа или переваривания пищи). Как только организм погибает, поглощение углерода-14 прекращается, а уже имеющееся его количество начинает равномерно уменьшаться.

¹ Эти излучения называются космическими лучами. Мы рассмотрим их ниже.

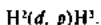
Все, что когда-то было частью живого организма, можно проанализировать на предмет количества углерода-14 и таким образом определить, сколько времени прошло с момента гибели организма. Такой метод *радиоактивного датирования* широко применяется в археологии. С его помощью удалось определить возраст дерева, найденного в древней египетской гробнице (около 4800 лет), и дерева, найденного в древней этрусской гробнице (около 2730 лет). Таким же образом был определен возраст Библии.

Можно определить возраст древних деревьев, сваленных наступающими ледниками, а также возраст деревьев, прибитых к берегам, образованным тающими ледниками. Ученые были удивлены, когда обнаружили, что ледовые шиты, покрывавшие Северную Америку, последний раз наступали всего лишь 25 000 лет назад и достигли максимальной площади 18 000 лет назад отступающие ледники вновь начали наступать и окончательно исчезли из района Великих озер лишь в 6000 году до н. э. (когда начали зарождаться первые цивилизации).

(*d, p*)-реакция, приведшая к обнаружению углерода-14, еще раньше привела к открытию единственного радионуклида водорода. В 1934 году австрийский физик Маркус Олифант (1901—2000) бомбардировал газообразный дейтерий дейтронами. То есть ядра тяжелого водорода (H_2) были одновременно и ядрами-мишенями, и бомбардирующими частицами:



или



У образующегося в результате такой реакции водорода-3 неожиданно длинный период полураспада — 12,26 года. Он получил название *третий* (от греч. «три»). Третий также образуется в атмосфере под действием излучений высокой энергии и в крайне малой концентрации присутствует в обычной воде. В особых случаях радиоактивное датирование идет по третию.

Единицы радиоактивности

При использовании радионуклидов важно знать не только их массу, но и скорость распада, так как именно она определяет количество излучаемых частиц на единицу массы, и именно эти частицы нужно обнаружить.

Скорость распада (R_0) радиоизотопа можно выразить следующим образом:

$$R_0 = \frac{0,693 N}{T}, \quad (\text{Уравнение 10.6})$$

где N — общее количество радиоактивных атомов; T — период полураспада в секундах.

Возьмем грамм радия. Массовое число самого долгоживущего изотопа радия (его в большинстве случаев и называют «радием») равно 226. Это означает, что в 226 граммах радия содержится число Авогадро, т. е. $6,023 \times 10^{23}$ атомов (см. гл. 1). Таким образом, количество атомов в одном грамме радия равняется числу Авогадро, разделенному на 226, или $2,66 \times 10^{21}$. Период полураспада радия-226 — 1620 лет, или $5,11 \times 10^{10}$ секунд.

Подставив в формулу 10.6 $N = 2,66 \times 10^{21}$, а вместо T — $5,11 \times 10^{10}$, получаем $= 3,6 \times 10^{10}$. Это значит, что в грамме радия каждую секунду распадается 36 000 000 000 атомов.

В 1910 году единица, обозначающая количество атомов, распадающихся в одном грамме радия за одну секунду, получила название *кюри*, в честь первооткрывателей радия. К тому времени были проведены более точные расчеты, в ходе которых выяснилось, что за секунду в грамме радия распадается 37 000 000 000 атомов.

Таким образом, за 1 кюри принят распад $3,7 \times 10^{10}$ атомов в секунду. Количество распадов в одном грамме радиоизотопа является его *удельной радиоактивностью*. Удельная радиоактивность атома радия равняется 1 кюри на грамм.

А как быть с другими изотопами? Скорость распада обратно пропорциональна периоду полураспада. Чем дольше период полураспада, тем меньше атомов распадается за одну секунду в данном количестве вещества, и наоборот. Получается, что скорость полураспада пропорциональна T_1/T_2 , где T_1 — период полураспада радия-226, а T_2 — период полураспада данного изотопа.

При фиксированной скорости полураспада количество атомов, распадающихся в грамме изотопа, обратно пропорционально массовому числу изотопа. Если изотоп тяжелее радия-226, то в одном его грамме содержится меньше атомов, и количество распадающихся в одном грамме атомов также будет меньше. Количество распадающихся атомов пропорционально M_1/M_2 , где M_1 — массовое число радия-226, а M_2 — массовое число данного изотопа.

Удельная радиоактивность (S_p) радиоизотопа, т. е. количество распадающихся атомов в одном грамме за одну секунду, по сравнению с одним граммом радия, зависит от периодов полураспада и массовых чисел следующим образом:

$$S_n = \frac{T_1 M_1}{T_2 M_2} \quad (\text{Уравнение 10.7})$$

Так как период полураспада радия-226 равен $5,11 \times 10^{10}$ секундам, а его массовое число равно 226, числитель формулы 10.7 равен $226 (5,11 \times 10^{10}) = 1,15 \times 10^{13}$. Тогда:

$$S_n = \frac{1,15 \times 10^{13}}{T_2 M_2} \quad (\text{Уравнение 10.8})$$

Например, для углерода-14, с периодом полураспада 5770 лет, или $1,82 \times 10^{11}$ секунд, и массовым числом 14, значение $T_1 M_1$ равно $2,55 \times 10^{12}$. Разделив $1,15 \times 10^{13}$ на $2,55 \times 10^{12}$, получаем, что удельная радиоактивность углерода-14 равна 4,5 кюри на грамм. Период полураспада углерода-14 длиннее периода полураспада радия-226, соответственно скорость его распада ниже. С другой стороны, углерод-14 гораздо легче радия-226, значит, в одном грамме углерода-14 распадается больше атомов, и фактическое количество распадающихся атомов в одном грамме углерода-14 выше, чем в одном грамме радия-226, несмотря на более низкую скорость распада.

В целом у большинства используемых в лаборатории радиоизотопов периоды полураспада короче, а массовые числа меньше, чем у радия, поэтому удельная радиоактивность, как правило, очень высока.

Так, например, период полураспада углерода-11 20,5 минуты, или 1230 секунд, массовое число — 11 и удельная радиоактивность — 850 000 000 кюри на грамм.

Впрочем, эти радиоизотопы никогда не используются в граммах. Во-первых, такое их количество просто невозможно получить, а во-вторых, если даже это было бы возможно, оно слишком опасно. Кроме того, большие количества просто не нужны. При точном обнаружении частиц удобно использовать гораздо меньшие, чем 1 кюри, единицы, например милликюри ($1/1000$ кюри) и микрокюри ($1/1\,000\,000$ кюри). Один микрограмм углерода-11 равноценен 850 микрокюри.

Даже один микрокюри означает распад 36 000 атомов в секунду. На практике удается зафиксировать в лучшем случае распад четырех атомов в секунду, то есть $1/9000$ кюри, или $1,1 \times 10^{10}$ кюри.

В какой-то мере пользоваться кюри неудобно из-за того, что эта единица отражает распад большого и «нечетного» количества атомов в секунду. Поэтому была введена новая единица — *резерфорд* (названная так в честь создателя ядерной

модели атома). Один резерфорд — это распад миллиона атомов в секунду.

Таким образом, в 1 кюри — 37 000 резерфордов, а в 1 резерфорде — 270 микрокюри.

Бомбардировка нейтронами

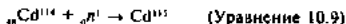
Как только был открыт нейтрон, физики сразу решили использовать его в ядерных реакциях в качестве бомбардирующей частицы (что и привело к получению радионуклидов в огромных количествах). Однако у нейтрона нет заряда, и он плохо подходил для этой роли, так как нейтрон невозможно ускорить при помощи магнитного поля, а ведь именно этот способ применяется во всех типах ускорителей частиц.

В 1935 году американский физик Роберт Оппенгеймер (1904—1967) нашел выход из сложившейся ситуации. Он предложил вместо нейтрона использовать дейтрон. Дейтрон состоит из относительно слабо связанных друг с другом протона и нейтрона. Дейтрон обладает электрическим зарядом (+1), значит, его можно ускорять. Когда разогнанный дейтрон подлетает к ядру-мишени, то положительно заряженное ядро начинает отталкивать протон дейтрона, иногда с достаточной силой, чтобы тот «оторвался» от нейтрона. Протон отделяется в сторону, однако нейтрон, поскольку силы отталкивания на него не действуют, продолжает лететь в сторону ядра и в случае попадания может к нему присоединиться. В результате происходит (*d, n*)-реакция по типу, описанному в уравнениях 10.3 и 10.5.

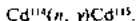
Да, сами нейтроны ускорять нельзя, но это не так уж и важно. Более того, нейтрон, не притягиваемый и не отталкиваемый электрическим зарядом, попадет в ядро (в случае правильного прицеливания), даже если его кинетическая энергия очень мала.

В 1930-х годах ученые получали потоки нейтронов в результате бомбардировки атомов альфа-частицами. Смесь из источника альфа-частиц и бериллия служила очень удобным источником нейтронов.

Ядро-мишень может присоединить нейтроны, не выделяя при этом никаких частиц. За счет полученной от нейтрона кинетической энергии ядро переходит в возбужденное состояние и просто излучает избыток энергии в виде протона гамма-луча. Это (*n, γ*)-реакция. При записи такой реакции можно не указывать уровень энергии:



или



Таким образом, для получения изотопов с большим атомным числом нейтрон использовать даже удобнее, чем дейтрон.

Часто образующийся в результате бомбардировки нейтрона изотоп является радиоактивным и распадается, испуская бета-частицу. В результате этого массовое число остается неизменным, однако атомное число увеличивается на единицу. Например, период полураспада бета-излучателя кадмия-115 равен 45 дням, после чего он превращается в индий-115.

Кадмий-117, образовавшийся в результате бомбардировки нейтронами кадмия-116, последовательно распадается на два других элемента. Кадмий-117 является бета-излучателем с периодом полураспада около трех часов, после чего он становится индием-117. Индий-117 является бета-излучателем с периодом полураспада около двух часов, после чего в результате испускания бета-частицы он превращается в стабильный изотоп олова-117.

В большинстве случаев путем бомбардировки нейтронами можно получить элемент с атомным числом на 1—2 единицы выше исходного. Эффективность такого способа зависит от вероятности (n, γ) -реакции, которая зависит от следующих факторов.

Представьте себе вещество-мишень, площадь которого равняется 1 см и оно содержит N атомных ядер. Предположим, что это вещество бомбардируется I частицами, которые в секунду попадают в A атомных ядер.

Таким образом, площадь попадания альфа-частиц в секунду составляет A/N атомов.

Впрочем, A/N атомов — это результат попадания всех частиц I . Разделив A/N на I , узнаем площадь попадания одной частицы. Размер площади попадания одной частицы называется *ядерным сечением* и обозначается как σ (греческая «сигма»). Таким образом:

$$\sigma = \frac{A}{NI}. \quad (\text{Уравнение 10.10})$$

В результате такого анализа становится ясно, что для возбуждения реакции бомбардирующая частица должна попасть в определенную зону, σ квадратных сантиметров в диаметре, в центре которой находится ядро-мишень. Значение ядерного сечения, получаемое по формуле 10.10, обычно колеблется в пределах

10^{-24} кв. см. Для удобства физики прижили за 10^{-24} кв. см за один барн. (По-английски *bar* — это «амбар». Название возникло в результате утверждения, что по субатомным меркам попасть в зону площадью 10^{-24} кв. см — все равно что попасть в стену амбара.)

Значение ядерного сечения варьируется в зависимости от свойств ядра-мишени и бомбардирующей частицы. В 1935 году итальянский физик Энрико Ферми (1901—1954) обнаружил, что вероятность ядерной реакции повышается, если бомбардирующие нейтроны проходят сквозь воду или парафин. Другими словами, после того как определенный нейтрон проходит сквозь воду или парафин, для этого нейтрона и конкретного ядра-мишени ядерное сечение увеличивается.

Проходя сквозь воду или парафин, нейтроны сталкиваются с легкими атомами. Эти атомы очень устойчивы и практически не присоединяют дополнительных нейтронов. (Другими словами, ядерное сечение поглощения нейтронов у этих атомов очень мало.) В результате нейтроны от этих атомов отталкивались.

Когда два объекта отталкиваются друг от друга, между ними происходит перераспределение кинетической энергии. Если один объект движется, а второй находится в состоянии покоя, то движущийся объект теряет какое-то количество энергии, а покоящийся — приобретает. Если масса объектов одинакова или почти одинакова, то энергия между ними разделится поровну.

Гораздо проще понять это, если взять вместо мельчайших субатомных частиц обычные предметы. Когда движущийся бильярдный шар сталкивается с шариком для пинг-понга, то, как и в случае столкновения нейтрона и электрона, шарик для пинг-понга отскочит в сторону с огромной скоростью, в то время как бильярдный шар, потеряв совсем немного энергии, продолжит движение в том же направлении. С другой стороны, если движущийся бильярдный шар столкнется с пушечным ядром, то, как и в случае столкновения нейтрона и ядра атома свинца, бильярдный шар отскочит, сохранив энергию, в то время как ядро останется практически нетронутым. Однако когда бильярдный шар сталкивается с бильярдным шаром, то уровень энергии и того и другого станет примерно одинаковым.

Получается, что наиболее эффективно нейтрон тормозится в случае столкновения с ядрами легких атомов, например водорода, бериллия или углерода, что и происходит, когда нейтрон проходит сквозь состоящие из таких атомов вещества, например воду или парафин. Такие вещества выступают в роли *замедлителей*. В конце концов нейтроны тормозятся до скорости движения содержащихся в атмосфере атомов и молекул под действием температуры (см. ч. I). Такие нейтроны называются *тепловыми*.

Но почему в результате замедления нейтронов ядерное сечение увеличивается? Давайте вспомним, что нейтроны обладают не только свойствами частиц, но и свойствами волн. В 1920-х годах было доказано, что электроны демонстрируют волновые свойства, как предсказывал Бройль (см. гл. 6), но оставалось неясным, относится ли это к незаряженным частицам. В 1936 году было обнаружено, что, проходя через кристаллы, нейтроны рассеиваются, значит, свойствами частиц и волн обладает любая материя, а не только электрически заряженная.

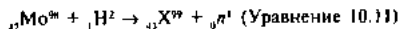
В процессе торможения частица теряет энергию, что приводит к увеличению длины испускаемой этой частицей волны. Таким образом, в процессе торможения нейтрон становится более «размытым» и «широким». Большой, медленный нейтрон с большей вероятностью попадет в ядро, чем маленький и быстрый, и поэтому с большей вероятностью вызовет ядерную реакцию. Кроме того, медленный нейтрон дольше остается в непосредственной близости с ядром-мишенью, что также увеличивает вероятность ядерной реакции.

Синтетические элементы

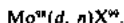
Появление в 1930-х годах новых методов стимулирования ядерных реакций привело не только к получению не встречающихся в природе изотопов, но и к созданию не существующих в природе элементов.

В 1930-х годах в таблице элементов с атомными числами от 1 до 92 включительно оставались всего четыре незаполненные клетки — 43, 61, 85 и 87.

Первым обнаружили элемент с атомным числом 43. Лоуренс, изобретатель циклотрона, подверг атомы молибдена бомбардировке дейтронами, в результате чего в ходе (d, n)-реакции образовался элемент номер 43:



или

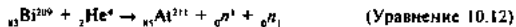


В 1937 году образец облученного молибдена попал в руки к итальянскому физiku Эмилио Сегре (1905—1989). Химическими способами он протестировал образец на предмет предполагаемого радиационного излучения элемента номер 43. Излучение действительно существовало, и таким образом было доказано, что

элемент 43 действительно присутствует в молибдене. Так как этот элемент был первым элементом, созданным в результате вызванных человеком ядерных реакций, он получил название *технеций* («искусственный»).

Технеций стал не только первым созданным человеком элементом, но и первым легким элементом (то есть атомное число которого меньше 84), не имеющим ни одного стабильного изотопа. Существуют не менее трех изотопов технеция с достаточно длинным периодом полураспада: технеций-97 — 2 600 000 лет, технеций-98 — 1 500 000 лет и технеций-99 — 210 000 лет. Тем не менее абсолютно стабильных изотопов технеция не существует. Так как продолжительность периодов полураспада мала по сравнению с возрастом Земли и так как изотопы технеция не являются членами какого-либо радиоактивного ряда, в земной коре технеций в измеримом количестве не встречается.

В 1939 году французский химик Маргарита Пере в продуктах распада урана-235 обнаружила изотоп элемента 87. Она назвала его *франций*, по названию своей родной страны. Чуть позже в радиоактивных рядах был обнаружен элемент 85, и уже в 1940 году его удалось получить искусственным путем в результате бомбардировки альфа-частицами атомов висмута. Элемент получил название *астатин* («нестабильный»). Реакция выглядит так:



или



(Переехавший к этому моменту в США Сегре стал одним из членов группы ученых, которым удалось выделить аstatин.)

Элемент номер 61 был открыт в 1948 году (при обстоятельствах, о которых я расскажу позже) командой американского химика Чарльза Корнела. Элемент получил название *протетий*. Это был уже второй случай элемента без стабильных изотопов. Период полураспада самого долгоживущего изотопа — прометия-145 — составлял всего 18 лет.

Таким образом, к 1948 году периодическую таблицу наконец удалось заполнить полностью. Однако была открыта верхняя часть таблицы. Ферми, которому не давала покоя возможность путем бомбардировки нейтронами поднимать атомное число ядра-мишени на 1—2 единицы, начиная с 1934 года занимался бомбардировкой атомов урана нейтронами.

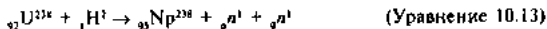
Он предположил, что, возможно, уран-239 образуется из урана-238. Испуская бета-частицы, уран-239, возможно, становится

элементом 93, а затем элементом 94. Ферми решил, что он уже показал этот процесс, и поэтому назвал элемент 93 «ураном X».

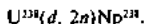
Когда ученые открыли возможность деления ядра урана (см. ниже), оказалось, что заслуги Ферми не ограничиваются выделением элемента 93, и на какое-то время о элементе 93 забыли. Однако когда страсти вокруг деления ядра немного поутихли, ученые вновь вернулись к элементу 93. Образование урана-239 являлось хоть и не основным, но все же результатом бомбардировки атомов урана нейтронами. Реакция действительно имела место.

Это было доказано в 1940 году американским физиком Эдвином Макмилланом и его коллегой, американским химиком Филипом-Хауге Эблсоном. Они обнаружили источник радиоактивного излучения с периодом полураспада 2,3 дня, атомным числом 93 и массовым числом 239. Так как уран был назван в честь планеты Уран, то элемент «выше» урана был назван *нептуний*, в честь планеты Нептун, располагающейся «выше» Урана.

Казалось очень вероятным, что нептуний-239 являлся бета-излучателем и распадался до элемента с атомным числом 94. К несчастью, радиоактивность образующегося в результате этого изотопа была настолько мала, что в малых количествах его было практически невозможно обнаружить. Однако в том же году Макмиллану и его новому ассистенту, американскому химику Гленну Сиборгу, в результате бомбардировки атомов урана дейтронами удалось получить нептуний-238:



или



Нептуний-238 испускал бета-частицу и становился изотопом элемента 94 с достаточно высокой для обнаружения радиоактивностью. Новый элемент получил название *плутоний*, в честь планеты Плутон, находящейся еще дальше, чем Нептун.

Как только плутоний удалось получить в достаточном количестве, его подвергли бомбардировке альфа-частицами, в 1944 году исследовательская группа во главе с Сиборгом получила изотопы элемента 95 (*америций*, в честь Америки) и 96 (*кюрий*, в честь Кюри).

Группе Сиборга удалось получить элементы и с большим атомным числом. В 1949-м и 1950 годах путем бомбардировки америдия и кюри альфа-частицами были получены элементы 97 и 98.

Элемент 97 получил название *берклий*, а элемент 98 — *калифорний*, в честь города Беркли в штате Калифорния, где находилась исследовательская лаборатория.

В лабораторных условиях элементы 99 и 100 удалось получить в 1954 году, однако двумя годами ранее, в 1952 году, изотопы этих элементов были обнаружены в осадках после взрыва водородной бомбы во время испытаний на острове в Тихом океане. Ко времени подтверждения и опубликования результатов открытий Эйнштейн и Ферми уже умерли, и в их честь элементы 99 и 100 были названы *эйнштейний* и *фермий*.

В 1955 году в результате бомбардировки эйнштейния альфа-частицами был получен элемент 101, *менделевий*, названный так в честь создателя периодической таблицы Менделеева. В 1957 году институт Нобеля в Стокгольме объявил об открытии элемента 102, *нобелия*¹, а в 1961 году был обнаружен элемент 103, названный *лауренцием* (*лоуренсием*) в честь изобретателя циклотрона, умершего за несколько лет до этого. В 1964 году советские физики объявили о получении элемента 104, но эта информация подтвердилась не сразу.

Таблица 11

ТРАНСУРАНОВЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

| Атомное число | Химический элемент | Массовое число наиболее долгоживущего изотопа | Период полураспада |
|---------------|--------------------|---|--------------------|
| 93 | Нептуний | [237] | 2 140 000 лет |
| 94 | Плутоний | [242] | 37 900 лет |
| 95 | Америций | [243] | 7650 лет |
| 96 | Кюрий | [247] | Ок. 40 000 000 лет |
| 97 | Берклий | [247] | Ок. 10 000 лет |
| 98 | Калифорний | [251] | Ок. 800 лет |
| 99 | Эйнштейний | [254] | 480 дней |
| 100 | Фермий | [253] | Ок. 4,5 дня |
| 101 | Менделевий | [256] | 1,5 часа |
| 102 | Нобелий | [253] | Ок. 10 минут |
| 103 | Лоуренсий | [257] | 8 секунд |

Элементы выше урана называются *трансурановыми*. Удалось получить более сотни изотопов этих элементов. В табл. 11 представлены наиболее долгоживущие из известных изотопов этих элементов.

¹ Попытки повторить опыт шведов провалились. Элемент 102 удалось получить методами, отличными от использованных в институте Нобеля, и название «нобелия» до сих пор официально не принято.

Основной теоретический интерес к этим элементам заключается в том, что они пролили свет на верхнюю часть периодической таблицы. До открытия трансурановых элементов, на основе некоторых опытных химических данных, торий в периодической таблице поместили под гафнием, протактиний — под танталом, а уран — под вольфрамом.

Согласно этому принципу, открытый нептуний следовало бы поместить перед рением. Однако химические свойства нептуния были аналогичны свойствам урана и трансурановых элементов. Оказалось (Сиборг первым предположил это), что элементы начиная с актиния образовывали новый ряд «редкоземельных» элементов (см. гл. 1), соответственно их нужно поместить под первым рядом редкоземельных элементов (от лантана и далее), что и сделано в периодической таблице (см. гл. 1).

Первый ряд, от лантана до лютеция включительно, сегодня называют *лантаноидами*, по названию первого члена этого ряда. По аналогии второй ряд, от актиния до лавренция включительно, называют *актинидами*. Лавренций является последним членом ряда актинидов, и химики уверены, что, как только элемент 104 удастся получить в достаточном для изучения его химических свойств количестве, окажется, что он по своим свойствам будет похож на гафний.

Хотя периоды полураспада некоторых изотопов трансурановых элементов и длинные по человеческим меркам, по меркам геологическим все они слишком короткие. (Тем не менее следы нептуния и плутония были найдены в урановых рудах. Они появились в результате взаимодействия нейтронов и урана, вызванного ядерной реакцией, возникающей под действием космических излучений высокой энергии.)

Особенный интерес представляет нептуний-237. В результате деления его массового числа на 4 остаток равен 1, значит, нептуний-237 принадлежит к ряду элементов $4x + 1$. Элементы этого радиоактивного ряда в природе не встречаются (см. гл. 8). Период полураспада нептуния-237 более 2 миллионов лет, и, по последним сведениям, это самый долгоживущий элемент данного ряда. Значит, нептуний-237 вполне может быть родительским элементом *нептуниевого* ряда. Его дочерние элементы не повторяют ни один из элементов трех других радиоактивных рядов (см. табл. 12).

Основной чертой нептуниевого ряда является то, что он, в отличие от трех других рядов, заканчивается висмутом, а не свинцом. Раз родительский элемент не дошел до наших дней, то не дошли и менее долгоживущие дочерние элементы. Из всего ряда встречается только конечный стабильный изотоп — висмут-209.

Таблица 12

НЕПТУНИЕВЫЙ РЯД



Глава 11

СТРУКТУРА ЯДРА

Нуклоны, четность и нечетность

Когда перед глазами весь список изотопов — стабильных и нестабильных, — можно сделать определенные утверждения о структуре ядра.

Для начала возьмем атом, ядро которого состоит из одного лишь протона. Получим атом водорода-1. Ядро не может содержать больше одного электрона, если в нем нет нейтронов. Среди элементов с маленькими атомами стабильные ядра состоят из равного или почти равного количества протонов и нейтронов. Так, у ядра водорода-2 1 протон и 1 нейтрон, у

гения-4 — 2 протона и 2 нейтрона, у углерода-12 — 6 протонов и 6 нейтронов, у кислорода-16 — 8 протонов и 8 нейтронов, у серы-32 — 16 протонов и 16 нейтронов, у кальция-40 — 20 протонов и 20 нейтронов.

Дальше ситуация меняется. Стабильные ядра всех элементов тяжелее кальция-40 содержат больше нейтронов, чем протонов, причем чем выше массовое число, тем больше дисбаланс между нейтронами и протонами. Так, ядро наиболее распространенного изотопа железа — железо-56 — состоит из 26 протонов и 30 нейтронов, то есть соотношение нейтронов и протонов (n/p) равно 1,15. Ядро наиболее распространенного изотопа серебра — серебро-107 — состоит из 47 протонов и 60 нейтронов, соотношение n/p равно 1,27. Ядро единственного стабильного изотопа висмута — висмута-209 — состоит из 83 протонов и 126 нейтронов, соотношение n/p равно 1,52. Ядро наиболее тяжелого из встречающихся в природе изотопов урана — урана-238 — состоит из 92 протонов и 146 нейтронов, то есть соотношение n/p равно 1,59.

Очевидно, что чем больше протонов содержится в ядре, тем больше избыточных нейтронов необходимо для поддержания стабильности ядра. (Хотя конечно же слишком большой избыток нейтронов — это так же плохо, как и их недостаток.)

Понятно, что существование парных протонов оказывает на ядро стабилизирующий эффект. Из всех атомных ядер, состоящих из более чем одного нуклона, ядра с парными протонами (имеющие четное атомное число) более распространены во Вселенной. 98% нашей планеты (как коры, так и внутренней ее части) состоит из 6 основных элементов: железа, кислорода, магния, кремния, серы и никеля. Атомные числа этих элементов соответственно 26, 8, 12, 14, 16 и 28. Как вы видите, все четные.

Четные количества нейтронов по сравнению с нечетными легко стабилизируются. Для элементов выше 83, сколько бы ни было нейтронов, стабильности все равно добиться невозможно. Однако два элемента этой группы почти стабильные — это торий и уран, атомные числа которых четные (90 и 92). С другой стороны, среди всех элементов с атомными числами до 83 только два вообще не имеют стабильных изотопов. Это технеций и прометий, атомные числа которых нечетные (43 и 61).

Теперь рассмотрим количество изотопов на элемент. У 21 элемента только один встречающийся в природе изотоп. Из них только у двух элементов четные атомные числа: у бериллия (4), у тория (90). У оставшихся 19 элементов атомные числа нечетные. Есть еще 23 элемента, у которых два встречаю-

щихся в природе изотопа. Опять-таки только у двух из них атомные числа четные: у гелия (2), у урана (92). У оставшихся 21 элемента атомные числа нечетные.

Видимо, при наличии нечетного числа протонов в ядре стабильность возможна только в случае одного, максимум двух определенных наборов нейтронов. Только один элемент с нечетным атомным числом имеет три изотопа — это калий (атомное число 19). Его изотопы: калий-39, калий-40 и калий-41. Однако калий-40 все же проявляет слабые радиоактивные свойства и в природе встречается достаточно редко.

С другой стороны, все элементы (кроме четырех) с четными атомными числами имеют более двух встречающихся в природе изотопов, а у олова (атомное число 50) их целых 10. Похоже, при наличии четного числа протонов в ядре достичь стабильности настолько легко, что она возможна практически при любом количестве нейтронов в ядре.

Нейтроны также чаще всего встречаются парами. Наиболее распространенными изотопами шести элементов, составляющих 98% Земли (см. выше), являются железо-56, кислород-16, магний-24, кремний-28, сера-32 и никель-58. Содержание протонов и нейтронов равно 26—30, 8—8, 12—12, 14—14, 16—16 и 28—30. Во всех случаях количество и нейтронов и протонов четное («четно-четное ядро»).

У элементов с нечетным атомным числом, имеющих лишь один встречающийся в природе изотоп, ядра этих изотопов содержат четное количество нейтронов («нечетно-четное ядро»). Например, фтор-19 (9 протонов, 10 нейтронов), натрий-23 (11 протонов, 12 нейтронов), фосфор-31 (15 протонов, 16 нейтронов) и золото-197 (79 протонов, 118 нейтронов).

У элементов с нечетным атомным числом, имеющих два встречающихся в природе изотопа, практически всегда оба изотопа имеют четное количество нейтронов в ядре. Например, у хлора есть два изотопа — хлор-35 и хлор-37, — ядра которых состоят из 17 протонов и 18—20 нейтронов. У меди есть два изотопа — медь-63 и медь-65, — ядра которых состоят из 29 протонов и 34—36 нейтронов. У серебра есть два изотопа — серебро-107 и серебро-109, — ядра которых состоят из 47 протонов и 60—62 нейтронов.

У элементов с четным атомным числом, имеющих три и более встречающихся в природе изотопов, нейтронов обычно больше, чем у элементов с нечетными атомными числами («четно-нечетные ядра»). Например, у ксенона 9 встречающихся в природе изотопов, 7 из которых имеют «четно-четные ядра» (ксенон-124, 126, 128, 130, 132, 134 и 136). Количество протонов везде одинаково,

54, а вот нейтронов соответственно 70, 72, 74, 76, 78, 80 и 82. В природе встречаются только два изотона ксенона с «четно-нечетными» ядрами. Это ксенон-129 и ксенон-131, количество нейтронов в ядрах которых равно 75 и 77.

У любого элемента может быть не более двух изотопов с «четно-нечетными» ядрами. Исключением является олово, у которого таких изотопов три: олово-115, олово-117 и олово-119. Количество протонов в ядрах этих изотопов равно 50, а нейтронов — 65, 67 и 69. (Помимо этих трех изотопов, у олова есть еще 7 изотопов с «четно-четными» ядрами.)

Самым редким типом ядра является «нечетно-нечетное» ядро, состоящее из нечетного количества и протонов, и нейтронов. В природе встречаются лишь 9 изотопов с такими ядрами. 5 из них слаборадиоактивны, а оставшиеся 4 являются простейшими и абсолютно стабильными.

4 стабильных изотопа с «нечетно-нечетными» ядрами — это водород-2 (1 протон, 1 нейтрон), литий-6 (3 протона, 3 нейтрона), бор-10 (5 протонов, 5 нейтронов) и азот-14 (7 протонов, 7 нейтронов). Относительное содержание трех из этих изотопов очень низкое. На 7000 атомов водорода встречается только один атом водорода-2, на 27 атомов лития — только два атома лития-6, а на 5 атомов бора — только один атом бора-10.

Азот-14 — удивительный член этой группы. Из 1000 атомов азота 996 являются атомами азота-14, что намного превосходит количество второго стабильного изотопа азота — азота-15, — структура ядра которого является «нечетно-четной» (7 протонов и 8 нейтронов).

Стабильность альфа-частицы, состоящей из пары протонов и пары нейтронов, очень высока. Радиоактивные элементы испускают нуклоны в количестве не меньше одной альфа-частицы.

Альфа-частицы настолько стабильны, что ядро, состоящее из двух альфа-частиц (4 протона и 4 нейтрона), крайне нестабильно, будто альфа-частицы настолько самостоятельны, что «не хотят» соединяться. Такое ядро у бериллия-8, период полураспада которого около 3×10^{-16} секунд.

С другой стороны, стабильность углерода-12, кислорода-16, неона-20, магния-24, кремния-28, серы-32 и кальция-40, ядра которых можно представить как объединение 3, 5, 6, 7, 8 и 10 альфа-частиц, соответственно очень высока.

В свете только что сказанного можно частично объяснить феномен естественной радиоактивности. Атомы таких элементов, как уран-238 и торий-232, для достижения стабильности стремятся уменьшить количество протонов в ядре до 83.

Для достижения этого они испускают альфа-частицы, но в этом случае уменьшается не только количество нейтронов, но и количество протонов. Нейтроны и протон убывают в равных количествах, и соотношение n/p растет, поскольку нейтроны и так содержатся в таких ядрах в избытке. Так, соотношение n/p урана-238 (92 протона, 146 нейтронов) равно 1,59. Если уран-238 для достижения возможной стабильности испустит 5 альфа-частиц, он потеряет 10 протонов, а его атомное число уменьшится до 82 (то есть до свинца). Однако он потеряет еще и 10 нейтронов, и его массовое число упадет на 20 единиц, и уран-238 превратится в свинец-218 (82 протона, 136 нейтронов), соотношение n/p которого равно 1,66. При столь высоком соотношении n/p ни о какой стабильности не может быть и речи. И действительно, свинец-218 обнаружить так и не удалось. Самым тяжелым из известных изотопов свинца является свинец-214, период полураспада которого менее получаса.

Для достижения стабильности с понижением атомного веса должно понижаться и соотношение n/p . Для этого нейтрон превращается в протон, и происходит излучение бета-частицы. Путем комбинации альфа- и бета-излучений уран-238 становится свинцом-206, теряя при этом 10 протонов и 22 нейтрона, то есть соотношение n/p уменьшается с 1,59 до 1,51.

Совпадения в комбинациях протонов и нейтронов говорят о том, что структура ядер стабильных элементов формируется согласно каким-то определенным закономерностям, а не хаотично. По аналогии с периодической таблицей, основанной, как выяснилось позже, на существовании электронных оболочек, некоторые физики пытались объяснить свойства ядер на основе системы ядерных оболочек.

В 1948 году польский физик Мария Гёпперт-Майер (1906—1972) развила эту систему. Она обнаружила, что наиболее стабильные или наиболее часто встречающиеся изотопы, ядра которых содержат определенное количество нейтронов и протонов. Это количество называется *оболочечным числом* или более ярким термином *«магическое число»*. Нейтроны и протоны имеют числа, равные 2, 8, 20, 50, 82 и 126.

Например, ядро гелия-4 состоит из 2 протонов и 2 нейтронов, кислорода-16 — из 8 протонов и 8 нейтронов, кальция-40 — из 20 протонов и 20 нейтронов. Все эти три изотопа очень стабильны. Элементом с самым большим количеством стабильных изотопов является олово, ядро которого содержит 50 протонов. Также существуют 6 встречающихся в природе изотопов, ядра которых имеют 50 нейтронов (сюда относится и слабоактивный рубидий-87). Есть еще 7 стабильных изотопов, ядра

которых содержат 82 нейтрона, и 4 изотопа (свинца), ядра которых имеют по 82 протона.

И дело здесь даже не в количестве изотопов. Те или иные ядерные свойства достигают своего максимума (или минимума) у элементов, ядра которых содержат магическое число нейтронов и протонов. Так, изотопы, ядра которых содержат магическое число протонов или нейтронов, имеют меньшее ядерное сечение, чем другие, схожие по сложности, элементы.

Гёпперт-Майер объясняла феномен магических чисел существованием состоящих из протонов и нейтронов *нуклонных оболочек*, заполняющихся согласно ядерным квантовым числам. Магические числа означают полностью заполненные оболочки (как в случае с электронными оболочками благородных газов).

У «ядерной периодической таблицы» есть целый ряд побед. С ее помощью удалось определить, какие нуклиды могут существовать в возбужденном состоянии длительное время, образуя ядерные изомеры (см. гл. 8). И все же эта модель довольно противоречива.

Коэффициент уменьшения массы

Стабильность определенного нуклида зависит не только от соотношения n/p , но и, что более важно, от энергии этого нуклида по отношению к другим нуклидам с таким же количеством нуклонов.

Чтобы лучше понять это, начнем с осознания того, что, хотя массовое число изотопа обычно приводится числом целым, на самом деле оно «не совсем» целое. Говоря о кислороде-18, калии-41 и уране-235, мы подразумеваем, что их массовые числа равны соответственно 18, 41 и 235.

С помощью масс-спектрографа Астона (см. гл. 8) удалось с огромной точностью измерить массы отдельных изотопов. Мы знаем, что по отношению к углероду-12 фактическая масса кислорода-18 равна 17,99916, калия-41 — 40,96184, а урана-235 — 235,0439.

Если считать, что ядро состоит из одних лишь нейтронов и протонов, то получились весьма странные результаты. Но разве масса одного нейтрона или протона равна 1? Нет. Относительно углерода-12 масса протона составляет 1,007825, а нейтрона — 1,008665.

Но тогда возникает другой вопрос. Ядро углерода-12 состоит из 6 протонов и 6 нейтронов. Но общая масса 12 отдельно взятых нуклонов равна 12,098940, однако масса тех же самых

12 нуклонов ядра углерода-12 составляет 12,00000, то есть *дефект массы* равен 0,098940. Куда же делась эта масса?

Понятно, что, согласно формуле Эйнштейна (см. ч. II), избыточная масса перешла в энергию.

При образовании ядра углерода-12 менее 1% общей массы 6 протонов и 6 нейтронов переходит в энергию. Для разложения ядра углерода-12 на отдельные нуклоны требуется энергия, которую накопить достаточно сложно, и именно поэтому ядро углерода-12 не распадается. Энергия, удерживающая нуклоны внутри ядра, гораздо выше энергии, удерживающей атомы внутри молекулы и молекулы внутри твердого вещества. Она также выше энергии, удерживающей электроны внутри атома. Именно поэтому расплавка твердого вещества, разложение химического соединения или даже ионизация атома — плевое дело по сравнению с расщеплением ядра.

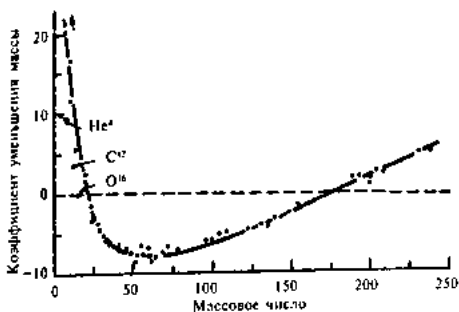
И хотя без применения колоссальной энергии расщелить атомное ядро невозможно, внутри его можно провести менее кардинальные изменения, и некоторые из этих изменений происходят спонтанно.

Начнем с того, что чем больше энергии на одну частицу отдается во время формирования ядра путем «упаковки» нескольких отдельных электронов вместе, тем более стабильным будет ядро (при прочих равных). Измерить эту энергию образования ядра можно, выделив массовое число (A) из фактической массы изотопа (A_m). Полученное значение дефекта массы можно разделить на фактическую массу и получить дробное значение дефекта массы. Чтобы избавиться от дроби, результат умножается на 10 000, и в итоге получаем то, что Астон назвал *коэффициентом уменьшения массы*. Если обозначить его как P_r то

$$P_r = \frac{10\,000(A_m - A)}{A_m}. \quad (\text{Уравнение 11.1})$$

Чем меньше коэффициент уменьшения массы, тем больше потери массы при образовании ядра и тем выше его стабильность.

Самый высокий коэффициент уменьшения массы у водорода. Фактическая масса ядра водорода-1 (голого протона) равна 1,007825. Подставив это значение (1,007825) в формулу 11.1 вместо A_m , а 1 — вместо A , коэффициент уменьшения массы получим 78,25, что несудивительно, так как единственный протон при формировании ядра никуда не «упаковывается». У отдельного нейтрона коэффициент уменьшения массы еще больше — 86,7.



Кривая коэффициента уменьшения массы Астона

С другой стороны, коэффициент уменьшения массы лития-7 равен 22,9, при $A_m = 7,01601$, а $A = 7$, в то время как коэффициент уменьшения массы углерода-13 равен 2,4, при $A_m = 13,00335$, а $A = 13$.

В целом коэффициент уменьшения массы нескольких следующих за водородом-1 элементов уменьшается. Это говорит о том, что с усложнением ядра отношение n/p становится более «стабильным». Проще говоря, когда два простых ядра образуют более сложное, выделяется энергия.

Коэффициент уменьшения массы азота-15 равен уже 0, однако у ядер еще более сложных элементов этот коэффициент принимает отрицательные значения. (Как следствие того, что мы приняли атомные веса относительно того, что атомный вес железа-56 равен 56, то коэффициент уменьшения массы не имел бы отрицательных значений.)

Например, значение A_m калия-41 равно 40,96184, а $A = 41$, значит, коэффициент уменьшения массы равен -9,3. Минимальное значение коэффициента уменьшения массы у железа-56 равно -11,63. Затем коэффициент уменьшения массы начинает вновь увеличиваться: например, у олова-120 он равен -8,1, а у иридия-191 равен -2,0. Значения коэффициентов элементов в конце периодической таблицы вновь положительные: коэффициент уменьшения массы урана-238 равен +2,1.

Это значит, что самыми стабильными являются атомы средних размеров, например железа и никеля. Энергия выделяется не

только при образовании более сложных атомов из более простых, но и при распаде более сложных атомов на более простые.

Все это отражено в общем устройстве Вселенной. В целом, согласно проведенному на основе астрономических данных анализу распространенности элементов во Вселенной, оказалось, что чем сложнее элемент, тем реже он встречается. Около 90% всех атомов во Вселенной являются атомами водорода (простейшего элемента) и еще 9% — гелия (второй простейший элемент). Вполне вероятно, что благодаря своей стабильности атомы железа также распространены гораздо больше атомов остальных элементов. На примере нашей планеты можно сказать, что это действительно так: малая масса Земли не позволила ей удержать простейшие атомы, однако по массе она на 35% состоит из атомов железа.

Очень мало значение коэффициента уменьшения массы у атомов углерода-12 и кислорода-16 (которые можно рассматривать как состоящие из альфа-частиц) и особенно мало у атома гелия-4 (который и является альфа-частицей).

Коэффициент уменьшения массы лития-6 равен 25,2, а водорода-2 — 70. Раз гелий-4 находится где-то посредине между этими элементами, то можно предположить, что и его коэффициент уменьшения массы также будет иметь среднее значение коэффициентов этих элементов. Однако коэффициент уменьшения массы гелия-4 всего лишь 6,5, что намного меньше, чем у лития-6 и водорода-2. Неудивительно, что гелий, углерод и кислород — самые распространенные элементы во Вселенной.

Стабильность определенного нуклида зависит от значения не только его собственного коэффициента уменьшения массы, но и коэффициента уменьшения массы нуклидов с таким же количеством нуклонов. Например, сам по себе атом натрия-24 (11 протонов, 13 нейтронов) должен быть стабильным. Однако у атома магния-24 (12 протонов, 12 нейтронов) коэффициент уменьшения массы ниже. Поэтому, испуская бета-частицу и меняя тем самым соотношение нуклонов с 11—13 до 12—12, атом магния-24 становится стабильным. В то время как для полного разложения ядра натрия-24 необходимы гигантские энергетические затраты, лишь небольшое количество энергии достаточно для преобразования ядра путем испускания бета-частицы. Атом натрия-24 самопроизвольно испускает бета-частицу и распадется до атома магния-24, период полураспада которого составляет 15 часов.

Сразу два соседних изотопа с равными значениями массового числа не могут быть стабильными. Изотоп с большим коэффициентом уменьшения массы самопроизвольно преобразуется

в изотоп с меньшим коэффициентом. Это все равно что скачуться с «энергетической горки»: чем круче горка, тем меньше период полураспада.

Два изотопа с одинаковыми массовыми числами, но не являющиеся соседними, стабильными быть могут. Так, и цинк-64 (30 протонов, 34 нейтрона), и никель-64 (28 протонов, 36 нейтронов) являются стабильными, так как между ними стоит медь-64 (29 протонов, 35 нейтронов), коэффициент уменьшения массы которой больше, чем у никеля-64 и цинка-64. Можно представить, что цинк-64 и никель-64 находятся по обе стороны «энергетической горы», на вершине которой находится медь-64. Изотоп меди-64 нестабилен, и его распад может проходить двумя способами: либо он испускает бета-частицу и становится цинком-64, либо он испускает противоположную бета-частицу микрочастицу (см. гл. 13) и становится никелем-64.

Иногда «энергетическая гора» не очень высокая, и лежащие у ее подножия изотопы почти стабильны, как в случае с калием-40 (19 протонов, 21 нейтрон). Этот изотоп находится между двумя стабильными изотопами — аргоном-40 (18 протонов, 22 нейтрона) и кальцием-40 (20 протонов, 20 нейтронов). Сам калий-40 также является слаборадиоактивным изотопом и может распадаться либо до кальция-40, либо до аргона-40.

Ядерная энергия

Как только существование ядерной энергии¹ было признано, ученые сразу начали искать возможные пути ее применения на практике. И действительно, существуют изотопы, которые стоят на вершине крайне пологого склона и медленно, по атому, скачываются с нее. Это конечно же изотопы урана-238, урана-235 и тория-232.

Например, в несколько приемов уран-238 распадается до образования свинца-206, при этом уран-238 испускает бета-частицу и гамма-лучи, массой которых можно пренебречь, а

¹ Ядерную энергию часто называют атомной энергией; словосочетание используется даже в некоторых официальных изданиях, например «Управление атомной энергетикой». Это неправильно, так как электроны являются такой же полноправной частью атома, как и ядро, и энергия, выделяющаяся в процессе химических реакций электронного обмена, имеет право называться «атомной энергией». Однако нельзя полностью стереть из языка такие неправильные наименования, как «атомная энергия», «атомная подводная лодка» и «атомная бомба», и заменить их на более правильные «ядерные подводные лодки» и «ядерные бомбы». Я использую в этой книге термин «ядерный» исключительно из принципа, а не потому, что надеюсь что-либо изменить.

также 8 альфа-частиц, массой которых пренебрегать уже нельзя. Обозначая лишь тяжелые числа, можем записать:



Масса ядра урана-238 равна 238,0506, ядра свинца-206 — 205,9745, а альфа-частицы — 4,00260. Общая масса ядра свинца-206 и 8 альфа-частиц равна 237,9953. Это означает, что в процессе радиоактивного распада урана-238 до свинца-206 каждое ядро урана-238 теряет 238,0506—237,9953, то есть 0,0553 единицы атомной массы.

Можем перевести эти числа в граммы. При полном распаде до свинца 238 граммов урана 55,3 миллиграмма переходят в энергию. Если каждый грамм урана распадается полностью, то 0,255 грамма его массы переходят в энергию.

Вспомним формулу Эйнштейна $e = mc^2$, где e — энергия в эрг, m — масса в граммах, а c — скорость света в сантиметрах в секунду. Скорость света равна 3×10^{10} сантиметров в секунду, а квадрат скорости света равен 9×10^{20} . Умножив это на 0,255 (или на $2,25 \times 10^{-4}$), получим, что при полном распаде 1 грамма урана высвобождается $2,5 \times 10^{20}$ эрг, или 5 000 000 килокалорий энергии.

При сгорании 1 грамма бензина выделяется 12 килокалорий энергии. Получается, что энергия, полученная в результате распада 1 грамма урана, в 420 000 раз больше энергии, выделяемой при сгорании 1 грамма бензина, и, более того, эквивалентна энергии, выделяемой при взрыве 5000 тонн тротила. Это хороший пример соотношения энергии химической и ядерной реакций.

Почему человек ничего не знал о выделении столь значительной энергии? (Ведь человек всегда знал о выделении относительно небольшой энергии, скажем при горении свечи.) Ответ очень прост. При распаде урана действительно выделяется огромное количество энергии, однако процесс ее выделения растянут во времени. Для выделения половины этой энергии, или 2 500 000 килокалорий, урану необходимо 4 500 000 000 лет. За одну же секунду уран выделяет намного меньше энергии, чем пламя свечи.

Существуют изотопы, радиоактивность которых интенсивнее радиоактивности урана-238. Рассмотрим полоний-212, дочерний нуклид тория-232, всегда присутствующий в его рудах. Испуская альфа-частицу, 1 грамм полония-212 распадется до свинца-208, теряя в результате 0,046 миллиграмма массы, то есть шестую часть массы, теряемой ураном. Значит, при распаде полония-212 выде-

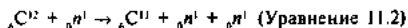
ляется лишь одна шестая часть энергии, выделяемой при распаде урана-238. При распаде полония-212 высвобождается менее 1 000 000 килокалорий. Столько же энергии выделяется при взрыве 1000 тонн тротила. Однако период полураспада полония-212 менее половины секунды, и вся эта энергия освобождается за один миг. Однако набрать целый грамм естественного полония-212 невозможно, даже если собрать весь полоний-212, содержащийся в земной коре.

В 1919 году необходимость поиска естественных источников высокоактивных изотопов отпала, так как появилась возможность их синтезировать. Образно говоря, путем бомбардировки альфа-частицами и ускоренными протонами стало возможно заставить стабильные изотопы лезть вверх по «энергетической горке» и превращаться в радионуклиды, после чего радионуклиды рано или поздно съезжали обратно к подножию горы. Можно ли использовать выделяющуюся при этом энергию?

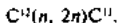
Конечно можно; она и используется каждый раз, когда счетчик фиксирует радионуклид или радионуклид выступает в роли источника бомбардирующих частиц. Однако это невыгодно: для того чтобы заставить изотопы взобраться по «энергетической горке», нужно гораздо больше энергии, чем та, что выделяется в результате его спуска вниз.

Но возможно ли сделать так, чтобы получаемая энергия была выше затрачиваемой? С одной стороны, можно уменьшить количество потребляемой энергии, если заставить образующийся радионуклид образовывать другие радионуклиды самостоятельно.

Так, в случае попадания нейтрона в ядро углерода-12 при определенных условиях ядро может поглотить нейтрон и испустить два нейтрона. Реакцию можно записать следующим образом:



или



Предположим, что каждый из двух нейтронов, выделяющихся при попадании нейтрона в ядро углерода-12, ударит еще по одному ядру углерода-12, — появятся уже 4 нейтрона и так далее. Ядерные реакции происходят менее чем за миллионную долю секунды, таким образом, если количество распадов увеличивается с 2, 4, 6, 16, 32 до нескольких миллионов за миллионную долю секунды, то весь запас углерода-12 смог бы принять участие в ядерной реакции за долю секунды. Углерод-12

очень распространен, а его энергия высвобождается так же быстро, как и энергия полония-212.

Это все равно что спалить целый лес одной спичкой. Энергии спички достаточно, чтобы поджечь один лист, под действием выделяемой при сгорании листа энергии воспламеняются близлежащие предметы и так далее. Ситуацию, когда продукт реакции необходим для продолжения реакции, химики называют *цепной реакцией*. С помощью (n , $2n$)-распада можно было бы вызвать *ядерную цепную реакцию*.

Однако этот способ не работает. Во всех случаях необходимы очень быстрые нейтроны высокой энергии. Хотя в результате попадания быстрого нейтрона в ядро-мишень углерода-12 два нейтрона и высвобождаются, они по сравнению с ускоренным нейтроном слишком медленные, чтобы вызвать новую реакцию.

Это все равно что пытаться поджечь мокрый лес. Можно зажечь небольшой огонек, но его энергии не хватит для того, чтобы высушить соседние участки дерева и поджечь их; огонек погаснет. Впрочем, все это не так уж и плохо. В воздухе всегда присутствуют свободные нейтроны низкой энергии. Если бы этой энергии было достаточно для возникновения ядерной цепной реакции, то на большей части земной поверхности постоянно происходили бы ядерные взрывы и планет в современном понимании просто бы не существовало. Сам факт существования Земли говорит о том, что (n , $2n$)-распад не может вызвать цепную реакцию атомов обычных элементов.

Ситуация не менялась до 1939 года. Хотя физики и знали, что во Вселенной присутствуют колоссальные запасы ядерной энергии, использовать их на практике пока не представлялось возможным. Некоторые даже считали, что способа использовать эту энергию просто не существует. Резерфорд, например, был убежден, что об источнике ядерной энергии можно лишь мечтать. Он умер всего лишь за несколько лет до того, как эту мечту удалось воплотить в жизнь.

Деление ядра

В конце 1930-х годов ситуация с использованием ядерной энергии резко изменилась. Ферми решил, что в результате бомбардировки урана тепловыми нейтронами ему удалось получить элемент 93. В какой-то мере он оказался прав, но он также вызвал и другие ядерные реакции, спутавшие результаты и оставившие ученого в замешательстве.

Другие физики, занимавшиеся этой проблемой, также пребывали в недоумении. В процессе всех изученных до этого ядерных реакций, как естественных, так искусственных, испускались очень легкие частицы, самой тяжелой из которых была альфа-частица. Поэтому физики полагали, что различные виды радиоактивного излучения бомбардируемого урана принадлежат атомам, чьи размеры лишь ненамного уступают размерам атома урана.

В 1938 году немецкий физик Отто Ган вместе с австрийским физиком Лизе Майтнер обнаружили, что если добавить к бомбардируемому урану соединения бария, то после этого во время любых химических реакций барий проявлял определенные радиоактивные свойства. Так как с химической точки зрения барий очень похож на радий (в периодической таблице радий следует сразу за барием), Ган предположил, что они имеют дело с изотопом радия.

Однако что бы Ган ни предпринимал, он так и не смог разделить предполагаемую бариевую составляющую радия. Не помогли даже обычные способы выделения бария из радия. Постепенно Ган начал понимать, что он имеет дело не с изотопом радия, а с радиоактивным изотопом бария.

Вы только вдумайтесь в это. Атомное число изотопов бария равно 56, что на 32 единицы меньше, чем атомное число атомов урана. Для того чтобы превратиться в изотоп бария, атом урана нужно испустить целый поток из 8 альфа-частиц. Однако во время бомбардировки альфа-частиц это не было обнаружено. Видимо, во время поглощения нейтрона ядро атома урана, грубо говоря, просто-напросто раскалывается на две половинки. Этот процесс называют *делением ядра урана* или более общим термином — *делением атомного ядра*, так как делится не только атомы урана.

В результате деления ядра изотоп съезжает с вершины «энергетической горки» еще дальше, чем в результате обычных ядерных преобразований. В обычных условиях уран распадется до свинца, коэффициент уменьшения массы которого ниже; во время деления ядра уран превращается в барий и криптон, коэффициенты уменьшения массы которых еще ниже.

Таким образом, превращаясь в результате обычных ядерных преобразований в свинец, 1 г урана теряет около $\frac{1}{4}$ мг массы, в то время как при делении ядра 1 г урана теряет около 1 мг массы. Другими словами, в результате деления каждый грамм урана выделяет в 4 раза больше энергии, чем при обычном преобразовании.

Деление ядра урана легко объясняется с точки зрения модели структуры ядра Бора. Согласно этой модели, ядро представ-

лет собой нечто вроде капли жидкости. В отличие от модели оболочками, согласно которой нуклоны заполняют различные оболочки и ведут себя определенным образом, по боровской модели атомного ядра они хаотично соударяются, аналогично молекулам в капле жидкости.

Если в такое ядро попадает еще один нейтрон, то его энергия быстро распределяется между всеми нуклонами, поэтому ни у одного из них уровень энергии не повышается настолько, чтобы он мог вылететь из ядра. Ядро может испустить избыток энергии в виде гамма-луча, однако существует вероятность, что все ядро начнет колебаться, подобно тому как в аналогичных условиях начинает колебаться капля воды. В результате этого ядро может разделиться на два ядра.

Деление ядра урана не всегда идет одинаково. Коэффициент уменьшения массы у ядер среднего размера отличается не сильно, и в одном случае ядро может разделиться в одной точке, а в другом случае — в другой. Как результат, образуется множество различных радионуклидов в зависимости от того, каким именно образом прошло деление ядра. Все эти изотопы называются *продуктами деления*. В большинстве случаев ядро делится на неравные части: массовое число большего ядра колеблется в пределах от 135 до 145, а меньшего — от 90 до 100.

В 1948 году среди продуктов деления были обнаружены изотопы элемента 64. Элемент получил название «прометий», поскольку его удалось выхватить из «ядерной топки» так же, как греческому полубогу Прометею удалось выхватить огонь из Солнца.

В результате образования относительно небольших продуктов деления уран превращается в один из элементов, соотношение n/p которых меньше. Для образования ядер продуктов деления нужно меньше нейтронов, чем есть в ядре исходного атома урана, и эти избыточные нейтроны высвобождаются. Поэтому в результате деления ядра каждый атом урана высвобождает два-три нейтрона.

Возникает вопрос. Если в результате деления ядра атом урана испускает больше энергии, чем в результате обычного распада, тогда почему вместо распада не происходит спонтанного деления ядра урана? Скорее всего, для начала деления ядро атома урана должно поглотить небольшое количество энергии, за счет которой оно взберется на «энергетическую горку» и начнет скатываться, то есть необходимо что-то вроде «ядерного зажигания», подобно тому как для возгорания спички необходимо тепло от трения.

Чем выше энергетический порог, тем меньше вероятность того, что ядро сможет набрать необходимое для его преодоле-

ния количество энергии обычным способом — в результате хаотичного распределения и перераспределения энергии между субатомными частицами. Таким образом, чем выше «энергетическая горка», тем меньше ядер распадается за отдельно взятый промежуток времени и тем дольше период полураспада.

При делении ядра урана «энергетическая горка» гораздо выше, чем при обычном распаде атомов урана, и именно поэтому, несмотря на то что в результате деления ядра атом урана обретает большую стабильность, распад происходит гораздо чаще.

И все же иногда по совершенно случайному стечению обстоятельств (а не только в результате добавления еще одного нейтрона) ядру атома урана удается преодолеть энергетический порог, и тогда начинается деление ядра урана без участия нейтронов. *Самопроизвольное деление* атомов урана было обнаружено в 1940 году советскими физиками Флёрковым и Петряком.

Так как энергетический порог деления выше, выше и период его полураспада. В то время как период полураспада урана-238 в результате испускания альфа-частицы около 4 500 000 000 лет, период его полураспада в результате самопроизвольного деления равен 1 000 000 000 лет.

Период полураспада в результате самопроизвольного деления атомов трансурановых элементов меньше. Например, период полураспада в результате самопроизвольного деления атомов кюрия-242 равен 72 000 000 лет, а калифорния-250 — всего лишь 15 000 лет.

Глава 12

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

Уран-235

Когда Ган пришел к выводу, что нейтроны запускают процесс деления ядра урана, он не спешил опубликовывать свои умозаключения, так как считал их слишком далекими от истины. В это время его давней партнерше по работе Лизе Майтнер, еврейке по национальности, пришлось, скрываясь от гитлеровского режима, переехать в Стокгольм¹. Позиция самой Майтнер была не очень ясной, что снижало риск получения «далеких от истины» выводов, и 16 января 1939 года она на-

¹ До 1938 года Майтнер пребывала в относительной безопасности, так как она была подданной Австрии, однако в 1938 году Австрия в принудительном порядке присоединилась к фашистской Германии.

писала письмо в научный журнал «Нейчер», в котором рассуждала о возможности деления ядра урана.

Нильсу Бору Майтнер объяснила все лично, и тот во время своего визита в США рассказал о делении ядра урана на конференции по физике. Физикам быстро удалось проверить правильность выводов Гана, и деление атомного ядра стало главным открытием года.

Венгерского физика Лео Силарда (1898—1964) особенно заинтересовала возможность ядерной цепной реакции. Он был одним из тех, кто рассматривал эту проблему до открытия деления атомного ядра и даже запатентовал способ вызова такой реакции (оказавшийся, впрочем, нерабочим).

Оказалось, что деление ядра урана можно вызвать и другим способом: под действием тепловых нейтронов малой энергии реакция возникала чаще, чем под действием нейтронов высокой энергии. Образующиеся в процессе деления нейтроны обладали достаточной энергией для продолжения деления ядра. В всяком случае, скорость движения нейтронов нужно было понизить, что сделать достаточно просто.

К этому моменту Вторая мировая война уже началась, и Силард, сбежав от гитлеровской тирании, понимал, какая угроза нависнет над миром, если фашисты приручат ядерную энергию и научатся использовать ее в военных целях. Вместе с еще двумя физиками, Эугеном Вигнером и Эдвардом Теллером, Силард попытался привлечь интерес правительства США к разработке методов запуска ядерной цепной реакции и управления ею.

Они пришли к выводу, что Альберт Эйнштейн был единственным ученым, кто мог бы убедить далеких от науки людей. С большим трудом, преодолев лапифизм ученого, Силарду все же удалось заставить доброго физика написать президенту Рузвельту письмо на тему разработки нового вида оружия. В 1941 году ученым удалось убедить Рузвельта, и он согласился начать крупномасштабные исследования, целью которых было создание оружия, основанного на делении ядра урана. Приказ был подписан 6 декабря, за день до разгрома Перл-Харбора.

Для возникновения ядерной цепной реакции необходимо создать условия, отличающиеся от условий в земной коре. Хотя в земной коре уран и присутствует, атмосферные свободные нейтроны не вызывают в нем цепных реакций и, насколько нам известно, никогда не вызывали.

Причина этого в том, что при делении ядра урана (самопроизвольного или вследствие поглощения нейтрона) высвобождающиеся нейтроны поглощаются соседними атомами. Большинство соседних атомов не являются атомами урана и не

участвуют в процессе деления ядра. В результате этого выделяющиеся в результате деления ядра урана нейтроны поглощаются, новые не высвобождаются и цепной реакции не происходит.

Таким образом, в ядерной цепной реакции необходимо использовать чистый уран в форме металла или оксида. Металл состоит из одних лишь атомов урана, и в этом случае велика вероятность, что атом урана поглотит высвобождающийся нейтрон другого атома и реакция примет цепной характер.

Впрочем, это требование выполнить было достаточно сложно. До 1941 года уран особо нигде не применялся, поэтому его получали лишь в небольших количествах. Однако даже этот уран не был достаточно чистым. Как только были сделаны первые попытки получить чистый уран в большом количестве, возникли еще более строгие ограничения.

Сразу после признания возможности деления ядра урана Нильс Бор заявил, что с теоретической точки зрения вероятность ядерного деления урана-235 выше, чем урана-238. Вскоре это было подтверждено экспериментальным путем. Получалось, что заставить делиться атомы обычного, пусть даже и очень чистого, урана очень сложно, так как 993 из 1000 атомов урана были атомами урана-238, ядра которых поглощают нейтрон, не начиная при этом делиться, в результате чего цепная реакция не возникает.

Для того чтобы значительно повысить шансы возникновения ядерной цепной реакции, нужно получить уран с большим, чем в обычных условиях, содержанием урана-235. Для этого нужно произвести разделение изотопов, что в крупных масштабах сделать довольно сложно.

Химические свойства различных изотопов одного и того же элемента практически одинаковы, и единственное различие заключается в том, что атомы более тяжелого изотопа медленнее вступают в реакцию. Ярким примером этого является водород-2, масса которого ровно в два раза больше, чем у водорода-1, благодаря чему разделить их довольно легко. Разница же масс урана-238 и урана-235 составляет всего лишь 1,3%.

Лучшим методом разделения изотопов, массы которых мало отличаются, является пропускание содержащего их газа через пористый материал (*рассеивание*). Молекулы пройдут сквозь поры, причем молекулы, содержащие более легкие изотопы, сделают это быстрее, чем молекулы, содержащие более тяжелые изотопы.

Таким образом, часть газа, прошедшая сквозь пористый материал первой, будет «обогащенной», то есть с большим, чем обыч-

но, содержанием легких изотопов, в то время как часть газа, вышедшая последней, будет «обедненной», так как концентрация легких изотопов в них меньше, чем обычно. Разница между частями очень невелика, однако процесс можно повторить. Части газа с меньшим содержанием легких изотопов можно объединить и снова рассеять сквозь пористый материал. Если повторить процесс достаточное количество раз, то изотопы окажутся разделенными практически полностью. Чем меньше разница в массе изотопов, тем больше необходимо циклов.

Понятно, что для этого метода рассеивания необходим газ, однако ни сам уран, ни его обычные соединения не являются газообразными. Филип-Хауге Эйблсон предложил использовать гексафторид урана (UF_6), не являющийся газообразным веществом при нормальной температуре, однако превращающийся в летучую жидкость уже при $56^\circ C$, а значит, его можно без особых сложностей превратить в газ.

Молекулярный вес гексафторида урана-238 составляет 352, а гексафторида урана-235 — 349. Разница молекулярных весов всего 0,85%, поэтому процесс рассеивания должен быть действительно длинным. Для этих целей в Оук-Ридж (шт. Теннесси) в начале 1940 года были построены большие сооружения (*каскады рассеивания*), где UF_6 пропускали через огромное количество пористых преград, а части газа разделялись и объединялись автоматически. В итоге с одного конца образовывался обогащенный гексафторид, а с другого — обедненный.

Атомный котел

По мере продвижения работ по очищению и разделению изотопов стало понятно, что даже в идеальных условиях ядерная цепная реакция не возникнет в ограниченном объеме урана. Даже атомы урана-235 могут и не поглотить летящий нейтрон. Нейтрон может просто-напросто оттолкнуться от атома урана. Причем это может повторяться снова и снова и лишь сотый или даже тысячный атом урана-235 поглотит этот нейтрон.

Если в процессе отталкивания от атомов нейтрон вылетает из активной зоны, он потерян. Если вылетит достаточно большое количество нейтронов, ядерная цепная реакция прервется. Чтобы не допустить этого, нужно минимизировать шансы потерять электрон до поглощения его ядром урана с последующим делением этого ядра. Самым простым способом достичь этого является увеличение активной зоны урана, где происходит деление ядер урана. Чем больше размеры активной зоны, тем от

большого количества атомов необходимо оттолкнуться нейтрону до вылета за ее пределы и тем выше шанс поглощения нейтрона.

Если активная зона достаточно большая, из нее вылетает лишь небольшое количество нейтронов, не прерывая ядерной цепной реакции, ее размер называется *критическим*. Меньшие, *подкритические*, размеры активной зоны недостаточны для возникновения самоподдерживающейся ядерной цепной реакции.

Критический размер не является абсолютной величиной. Он зависит от природы активной зоны, ее формы и т. д. Критический размер активной зоны обогащенного урана меньше, чем у активной зоны обычного урана, так как чем выше концентрация урана-235, тем меньшее количество раз нейтрон оттолкнется от атомов урана до поглощения и тем меньше шанс вылета нейтрона за пределы активной зоны (любого размера).

Опять-таки критический размер можно уменьшить, если использовать вместо нейтронов высокой энергии нейтроны низкой энергии, так как ядерное сечение урана-235 для медленных нейтронов выше, и в этом случае количество отталкиваний будет ниже. Для замедления нейтронов необходимо использовать замедлитель (см. гл. 10), и для этих целей подойдет графит высокой очистки. Графитовый модератор также может служить отражателем нейтронов. Если вокруг активной зоны урана поместить замедлитель, то вылетающие из нее нейтроны будут отражаться от графита и возвращаться обратно. В этом случае критический размер будет еще меньше.

Для управления ядерной цепной реакцией и предотвращения взрыва урановой активной зоны необходимо устройство, противоположное замедлителю по функции. От атомов замедлителя нейтроны отталкиваются, а нам нужны атомы, которые бы улавливали нейтроны, не отталкивая и не испуская их. У некоторых изотопов кадмия ядерное сечение для нейтронов очень высоко, и из них можно изготовить «регулирующие стержни» для контроля за реакцией.

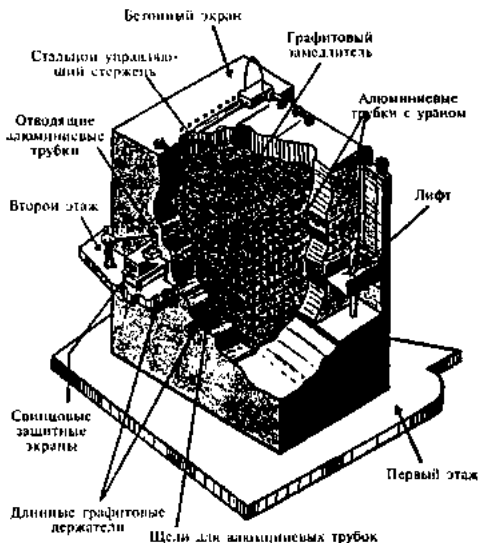
В конце 1942 года предпринята первая попытка вызвать первую самоподдерживающуюся ядерную цепную реакцию. Это произошло под трибунами футбольного стадиона Чикагского университета, а руководил всем Ферми (в 1938 году эмигрировавший из Италии в Штаты, но не получивший еще гражданства, почему его и можно считать «врагом»).

К тому времени было налажено производство чистого урана как в форме металла, так и в форме оксида. Такой уран не был обогащенным, поэтому его критические размеры были крайне высокими и для возникновения цепной реакции был необходим

очень большой «атомный котел». Название «котел» появилось из чисто визуального сходства: штабель кирпичей из урана, оксида урана и графита очень напоминал котел. Кроме того, термин «котел» был достаточно нейтральным и непонятным для непосвященных. После войны термин «атомный котел» еще какое-то время использовался, после чего был заменен на гораздо более подходящий «ядерный реактор».

Размеры первого ядерного реактора составляли 9,1 м в ширину, 9,7 м в длину и 6,5 м в высоту, вес — 1400 т, 52 т которого составлял уран. Слой урана, оксида урана и графита сменяли друг друга, оставляя щели, куда можно было поместить длинные стержни из кадмия.

Предположим, что во время такой реакции за определенный период делится определенное количество ядер атомов урана (n),



Ядерный реактор в Оук-Ридж

высвобождая при этом x нейтронов. У из этих x нейтронов либо поглощаются атомами урана, не вызывая деления ядра, либо улавливаются другими веществами, либо вылетают из реактора. Значит, по атомам урана-235 попадает $x-y$ электронов, вызывая деление их ядер. Соотношение $(x-y)/n$ называется *коэффициент размножения нейтронов*.

Если коэффициент размножения нейтронов меньше 1, тогда во время каждой последующей реакции делится меньше ядер и высвобождается меньше нейтронов. В этом случае цепная реакция быстро прерывается.

Если же коэффициент размножения нейтронов выше 1, тогда во время каждой последующей реакции делится большее количество ядер и высвобождается больше нейтронов. За долю секунды интенсивность цепной реакции становится очень высокой, что приводит к мощнейшему взрыву.

У построенного в Чикагском университете реактора коэффициент размножения нейтронов при задвинутых регулирующих стержнях был намного ниже 1. По мере выдвижения стержней внутри реактора оставалось меньше улавливающего нейтроны кадмия, соответственно больше ядер атомов урана делилось. Коэффициент размножения нейтронов рос.

Можно предположить, что по мере выдвижения регулирующих стержней и роста коэффициента размножения ничего не происходит до тех пор, пока коэффициент не становится чуть выше 1, и тогда котел взрывается вместе с половиной города Чикаго.

К счастью, этого можно избежать. Практически все (но не все) нейтроны, образующиеся в ходе ядерной цепной реакции, испускаются ядром урана сразу после деления. Это *мгновенные нейтроны*. Около 0,75% образующихся нейтронов испускаются продуктами деления через несколько минут после деления ядра. Это *запаздывающие нейтроны*.

Если коэффициент размножения нейтронов выше 1,0075, то количества мгновенных нейтронов вполне достаточно для увеличения интенсивности реакции, что неминуемо приводит к взрыву. Если же значение коэффициента колеблется в пределах от 1,0000 до 1,0075, то для увеличения интенсивности реакции мгновенным нейтронам необходима «помощь» со стороны запаздывающих. Это значит, что в течение очень короткого периода времени интенсивность деления ядер растет медленно. В это время необходимо задвинуть кадмиевые регулирующие стержни для уменьшения интенсивности деления. Автоматические системы управления кадмиевыми стержнями позволяют поддерживать коэффициент размножения в пределах 1,0000—

1,0075, не приводя к угасанию реакции или взрыву. Если в автоматической системе управления случается сбой, то кадмиевые стержни сами задвигаются внутрь реактора, прерывая цепную реакцию. Система получается безаварийной, и 25-летний опыт подтверждает безопасность ядерных реакторов при условии, что они грамотно спроектированы.

2 декабря 1942 года в 15 ч 45 мин кадмиевые стержни атомного котла Ферми были вытащены на небольшое расстояние, достаточное для возникновения самоподдерживающейся реакции. Этот день, эту минуту принято считать началом «атомного века». (Даже если бы стержни вытащили целиком, коэффициент размножения нейтронов составил бы всего 1,0006 — вполне безопасный уровень.)

Вашингтону (имеется в виду правительство США. — *Пер.*) эту новость сообщили шифрованной телеграммой: «Итальянский мореплаватель добрался до Нового Света». Вашингтон задал вопрос: «Как вели себя аборигены?» — и тут же получил ответ: «Очень дружелюбно».

Атомный век

Количество атомных реакторов выросло, выросла и их производительность (по сравнению с самым первым, созданным Ферми, котлом). Сегодня ядерные реакторы есть у многих стран, применяющих их в самых различных областях.

Количество образующихся в процессе деления ядра атома урана нейтронов просто огромно. Их используют для бомбардировки различных атомов и для производства радиоизотопов в количествах, которые в других условиях получить просто невозможно. После Второй мировой войны радиоизотопы появились в достаточном количестве и по довольно низким ценам, в результате чего стали бурно развиваться технологии их применения в биохимических исследованиях, медицине и промышленности.

Ядерные реакторы также можно использовать для производства электроэнергии. Выделяемое реактором тепловое излучение может нагревать какую-либо высококипящую жидкость (например, жидкий натрий), которая, в свою очередь, будет кипятить воду, а образующийся пар — крутить турбину, генерирующую электричество.

В 1954 году США спустили на воду первую ядерную подводную лодку «Наутилус». Ее двигатели вращались за счет электроэнергии, вырабатываемой ядерным реактором, благодаря чему

отпадала необходимость часто всплывать для подзарядки батарей. Так как ядерная подводная лодка может находиться под водой длительное время, врагу сложнее ее обнаружить и атаковать.

Спущенный на воду в 1959 году американский корабль «Саванна» стал первым ядерным судном. Его атомные реакторы работали на обогащенном диоксиде урана, а 21 регулирующий стержень был выполнен из поглощающего нейтроны бора.

В середине 1950-х годов были разработаны первые ядерные электростанции для мирных целей. В 1954 году Советский Союз построил небольшую ядерную электростанцию мощностью 50 000 киловатт. Англичане построили электростанцию мощностью 92 000 киловатт и назвали ее «Калдер-Холл». В 1958 году в городе Шиппингпорт (шт. Пенсильвания) начала работу первая «мирная» американская ядерная электростанция.

Главной трудностью при использовании ядерных электростанций (за исключением стоимости, которая с развитием технологии обязана снизиться) является то, что продукты деления ядра урана сами по себе являются радиоактивными.

Более того, эти продукты распада накапливаются в активной зоне урана и мешают дальнейшей работе электростанции. Некоторые из них довольно хорошо поглощают нейтроны, что приводит к прерыванию цепной реакции. Поэтому раз в три года необходимо останавливать ядерный реактор (несмотря на то, что топлива еще предостаточно) и отделять уран от отходов, образовавшихся в результате его деления.

Период полураспада некоторых продуктов деления более 20 лет, поэтому должно пройти не менее века, прежде чем уровень их радиации станет неопасным. Поэтому захоронение радиоактивных отходов нужно проводить с особой тщательностью. Концентрированные соединения заливают бетоном, помещают в стальные ящики и закапывают в землю. В настоящее время разрабатывается технология переплавки продуктов деления с силикатами для получения «стекла». В этом случае будут исключены утечки, а значит, хранить отходы в этом виде гораздо проще.

Продукты деления хранят еще какое-то количество энергии, и на их основе изготавливаются легкие *атомные батареи* (их еще называют системами вспомогательных ядерных источников питания, или «Снэп»). В таких батареях тепловое излучение, возникающее в результате распада радиоактивного изотопа, используется для нагревания термопары (см. ч. II) и производства электроэнергии.

Первый «Снэп» был построен в 1956 году. С тех пор появилось более десятка его разновидностей. Некоторые из них уже давно применяются для питания искусственных спутников.

Батарея «Снэп» весом чуть более килограмма дает 60 Вт и работает в течение 10 лет.

Не любой радиоизотоп подходит для использования в атомной батарее. Он должен иметь период полураспада определенной длины, чтобы его тепловое излучение было не слишком интенсивным; не должен излучать опасные гамма-лучи; должен быть достаточно дешев. Всем этим требованиям удовлетворяет лишь небольшое количество радиоизотопов. Наиболее часто в атомных батареях используют стронций-90, представляющий огромную опасность для человечества (см. ниже).

Мечта о мире, где энергия деления ядер урана дополняет энергетические запасы угля и нефти, несколько омрачается тем, что уран-235 — основное ядерное топливо — встречается в природе довольно редко. Сам по себе уран не такой уж редкий элемент, однако он равномерно распределен по всей земной коре, и его залежи встречаются довольно редко. Кроме того, уран-235 составляет лишь небольшой процент всех атомов урана.

К счастью, уран-235 не единственный изотоп, процесс деления ядра которого можно запустить путем бомбардировки нейтронами. Другим таким изотопом является плутоний-239. В природе он встречается редко, однако его можно получить путем нейтронной бомбардировки урана-238. В результате такой бомбардировки вначале образуется нептуний-239, а затем плутоний-239.

Работать с образовавшимся плутонием-239 легко, так как период его полураспада более 24 000 лет, то есть по человеческим меркам он существует вечно. Более того, плутоний-239 является самостоятельным элементом, а не изотопом урана, поэтому выделить его намного проще, чем уран-235.

Во время Второй мировой войны, для того чтобы выявить возможность деления ядра плутония-239, его буквально собирали по крупичкам. Для возникновения в плутонии-239 самоподдерживающейся ядерной реакции достаточно одних лишь быстрых нейтронов. Плутониевые реакторы (*быстрые ядерные реакторы*) не требуют применения замедлителей и поэтому более компактны по сравнению с обычными ядерными реакторами.

Плутоний-239 можно получить в качестве побочного продукта работы реактора на основе урана-235. Вылетающие из активной зоны урана-235 нейтроны можно использовать для бомбардировки оболочки из обычного урана, окружающей активную зону. Содержащийся в оболочке уран-238 преобразовывается в плутоний-239. В конце концов количество образующегося ядерного топлива превысит количество потребляемого. Такой реактор называется *реактором-размножителем (бридерным реактором)*.

Этот реактор позволяет косвенно использовать уран-238 в качестве ядерного топлива и повышает доступные человечеству запасы ядерного топлива в сто крат.

Открытый Сибергом и его командой в 1942 году изотоп урана-233 также можно использовать в качестве ядерного топлива. Уран-233 является дочерним изотопом нептуниевого ряда и не встречается в природе. Однако период его полураспада превышает 162 000 лет, что облегчает его использование.

Во время бомбардировки нейтронами торий-232 превращается в торий-233 с периодом полураспада в 22 минуты и, испуская бета-частицу, становится протактинием-233, период полураспада которого составляет 27 дней. Испуская бета-частицу, протактиний-233 становится ураном-233. Поэтому если вокруг ядерного реактора повесить оболочку из тория, то в ней будет образовываться способный к ядерному делению уран-233, который легко можно отделить от тория. Как видите, к общему количеству ядерного топлива на Земле можно отнести и запасы тория.

Несмотря на применение деления атомного ядра и в мирных целях, нельзя забывать, что основной целью проекта 1941 года было создание атомной бомбы. Требовался реактор с максимально возможным коэффициентом размножения нейтронов. Кроме того, бомба должна быть удобоперевозимой, значит, ее критическая масса должна быть максимально малой. Следовательно, нужно использовать либо чистый уран-235, либо плутоний-239.

Для безопасной транспортировки атомной бомбы ее следует разделить на две части, так как в этом случае каждая часть будет иметь докритические размеры. В нужный момент с помощью взрывчатки обе половины «выстреливаются» друг в друга, а содержащиеся в воздухе электроны приведут к немедленному ядерному взрыву.

К 1945 году было получено достаточное количество изотопов урана и плутония для создания трех атомных бомб. 16 июля 1945 года в 5 ч 20 мин утра в Аламогордо (шт. Нью-Мексико) одна из них была взорвана. Успех был полным и ужасающим. Мощность взрыва была эквивалентна 20 000 тоннам (20 килотоннам) тротила.

Вторая мировая война в Европе к тому времени уже закончилась, однако война с Японией все еще шла. Было принято решение сбросить две оставшиеся бомбы на Японию. 6 августа 1945 года одна из них упала на город Хиросима, а 8 августа вторая бомба взорвалась над городом Нагасаки. Япония сдалась, и Вторая мировая война окончилась.

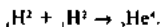
Ядерный синтез

Несмотря на все плюсы, у ядерного топлива есть и свои минусы. Уран и торий составляют всего лишь $\frac{1}{100\ 000}$ часть земной коры. Из этого топлива можно получить примерно в десять раз больше энергии, чем при сгорании всего имеющегося на Земле газа, нефти и угля.

Однако с относительной легкостью можно добыть лишь малую часть этого ядерного топлива. И даже если удастся использовать все это топливо, что делать с растущим количеством опасных ядерных отходов?

Стоит лишь посмотреть в самый конец кривой изменения коэффициента уменьшения массы, как решение напрашивается само. Энергию можно получать не только в результате распада более тяжелых атомов до более легких, но и путем соединения более простых атомов в более сложные. Этот процесс называется *ядерным синтезом*.

Простейшим примером является преобразование водорода — простейшего элемента — в гелий, ближайший к водороду элемент. Рассмотрим следующую реакцию:



Массовое число одного ядра водорода-2 равно 2,01410, двух — 4,02820. Массовое число обладающего необычно низким коэффициентом уменьшения массы гелия-4 равно 4,00280. Потеря массы составляет 0,0254 из общей массы 4,0282, или 0,63%, в то время как при делении ядра урана потеря массы составляет всего 0,056%. Другими словами, для одного и того же количества вещества при ядерном синтезе выделяется в 10 раз больше энергии, чем при делении ядра.

Люди узнали о ядерном синтезе благодаря небу. В XIX веке после открытия закона сохранения энергии перед физиками встал вопрос о происхождении огромной энергии Солнца. Немецкий физик Герман Гельмгольц (1821—1894) единственным возможным источником энергии Солнца видел силу гравитации и предположил, что солнечное излучение возникает в результате медленного сжатия звезды.

Однако если источником энергии излучения является гравитация, то Земля не просуществовала бы более сотни миллионов лет. Более того, для выделения энергии в результате сжатия в течение сотни миллионов лет Солнце должно было быть гораздо больше по размерам: его радиус равнялся бы орбите Земли.

Открытие радиоактивности позволило взглянуть на проблему по-новому. Гельмгольц и его современники ничего не знали о том, что атомное ядро может служить источником энергии. Со временем было сделано предположение, что солнечное излучение возникает в результате ядерных реакций.

Однако природа этих реакций оставалась неизвестной еще в течение нескольких десятилетий. Ученые уже знали о реакции распада урана и тория и делении ядра урана, однако вряд ли на Солнце происходили эти реакции, так как там мало урана и тяжелых элементов в целом. Кроме того, мощности выделяемой при делении урана энергии просто недостаточно для создания столь мощного излучения.

Действительно, 85% всех атомов Солнца составляет кислород, еще 10% — гелий. Так что если на Солнце и происходят ядерные реакции, то в них участвует водород.

Однако в условиях Земли водород не вступает в ядерные реакции. Условия на Солнце отличаются в основном температурой (температура на поверхности Солнца равна 6000 °С), но это отличие никакой роли не играет.

Дело в том, что еще самые первые эксперименты с ураном и другими естественными радиоактивными веществами показали, что, в отличие от обычных химических реакций, ядерные реакции не подвержены влиянию температуры. Период полураспада радия не меняется ни при низкой, ни при высокой температуре, а не вступающие в ядерные реакции атомы нагреванием до высоких температур реагировать не заставишь.

Конечно же многое зависит от того, что понимать под «высокой температурой». В начале XX века ученые не умели получать температуру достаточную для того, чтобы два атомных ядра прорвали электронные «бамперы» и столкнулись. Впрочем, для этого недостаточно даже температуры Солнца.

Однако английский астроном Артур Стэнли Эддингтон (1882—1944) привел ряд убедительных документов, доказывая, что если Солнце является газообразным объектом, то для того, чтобы оставаться стабильным, температура внутри светила должна быть очень высокой — миллионы градусов Цельсия.

Действительно, при настолько высокой температуре два ядра столкнутся, а немислимые при обычной температуре реакции станут обычным делом. Ядерная реакция, происходящая при столь высокой температуре, называется *термоядерной реакцией* (от греч. *thermo* — «тепло»). Понятно, что источником солнечного излучения являются термоядерные реакции. идущие внутри звезды.

В 1938 году немецкий физик Ханс Альбрехт Бете исключил из списка возможных термоядерных реакций те из них, которые идут слишком быстро и могут привести к взрыву Солнца или же, наоборот, идут слишком медленно и не могут поддерживать солнечное излучение. В конце концов он остановился на реакции, которая начинается с наиболее широко распространенного на Солнце водорода.

Бете предположил, что водород реагирует с углеродом, в результате сначала образуется азот, а в ходе еще нескольких реакций — кислород. Атом кислорода распадается на гелий и углерод, после чего углерод вступает в очередной цикл реакции, а поскольку он не претерпевает изменений, углерод можно считать «ядерным катализатором». Результирующим эффектом этого ряда реакций является преобразование водорода-1 в гелий-4. Позднее были предложены и более короткие цепочки преобразования водорода-1 в гелий-4¹.

Выделяемой в процессе синтеза гелия из водорода (в присутствии катализатора и без него) энергии вполне достаточно для поддержания излучения Солнца. Конечно же энергия образуется за счет уменьшения массы Солнца. Для поддержания излучения на обычном уровне Солнце теряет 4 200 000 тонн массы каждую секунду, преобразовывая 530 000 000 тонн водорода в гелий-4. Однако запасов углерода на Солнце настолько много, что, хотя оно уже и светит в течение 6 миллиардов лет, еще на несколько миллиардов лет водорода хватит.

Разрабатывая атомную бомбу, ученые научились, пускай и на очень короткий период времени, долучать температуры, достаточные для начала ядерного синтеза на Земле. Новое оружие (*водородная бомба*) должно было обладать настолько чудовищной разрушительной силой, что многие ученые не решались его разрабатывать. Среди них был и Оппенгеймер, которому в 1954 году пришлось поплатиться за это, лишившись расположения политиков и ученых, а также доступа к секретной информации. Наиболее выдающимся среди тех, кто порицал Оппенгеймера и настаивал на продолжении работы над водородной бомбой, был Эдвард Теллер. Он сделал настолько много, что впоследствии получил весьма незавидный титул «отца водородной бомбы».

В 1952 году на Маршалловых островах США провели испытания первой водородной бомбы. Чуть позже свою водородную бомбу разработал Советский Союз, а Великобритания стала

¹ Об этих реакциях, а также синтезе гелия и других реакциях жизненного цикла звезды уместнее говорить в учебнике по астрономии.

третьей ядерной державой. (Франция и Китай обладают лишь атомными бомбами.)

В то время как взрывная сила атомных бомб составляет 20 000 т тротила, успешно прошли испытания водородных бомб мощностью 50 000 000 тонн (50 мегатонн) тротила и более.

Лучевая болезнь

Водородная бомба представляет весьма «разностороннюю» опасность для человечества и жизни на Земле в целом. Мало того что взрыв водородной бомбы, пусть даже и экспериментальный, в мирное время сам по себе в несколько раз мощнее взрыва атомной бомбы, он имеет еще и долговременные и очень коварные последствия, так как образующиеся в результате взрыва продукты сильно облучают живую ткань.

Вскоре после открытия рентгеновского излучения было обнаружено, что в результате длительного воздействия лучей на коже образовывались очень медленно заживающие воспаления и ожоги. Это относилось и к излучению радиоактивных веществ. Пьер Кюри специально подверг себя радиоактивному облучению, а затем описал появившиеся позднее симптомы болезни.

В случае поглощения энергии рентгеновских лучей, гамма-лучей или быстрых субатомных частиц в молекуле разрушаются химические связи и образуются молекулярные «осколки» (*свободные радикалы*) высокой энергии. В случае поглощения субатомной частицы атомом может измениться его природа и соответственно природа молекулы, в состав которой он входит. Если образовавшийся атом радиоактивен, он может испустить частицу, которая разорвет молекулу, даже если та не пострадала до этого.

Подобные химические изменения могут нарушить сложную систему работы клетки и клеточного взаимодействия, в результате чего, например, начнут расти отдельные клетки за счет остальных, что приведет к раку. Особенно подвержены действию радиации кожа, лимфатические узлы и костный мозг, вырабатывающий кровяные клетки. (Вероятность рака кожи увеличивается даже в результате длительного пребывания под ультрафиолетовым излучением.)

В большинстве случаев в результате длительного воздействия радиации развивается лейкемия (белокровие), неизлечимая болезнь с летальным исходом, в ходе которой вырабатывается слишком много белых кровяных телец. Мария Склодовская-Кюри и ее дочь, Ирен Жоллио-Кюри, умерли от лейкемии, развившейся в

результате длительного воздействия излучений радиоактивных веществ.

Сильное радиационное излучение способно полностью нарушить работу клеток чувствительных тканей, что через несколько недель или месяцев приведет к смерти. *Лучевой болезнью* страдали все выжившие при взрыве атомных бомб жители Хиросимы и Нагасаки.

Но еще страшнее смерти опасность, которую представляет пострадавшая от излучения клетка для будущих поколений. Может получиться так, что несколько клеток с измененными молекулами не доставят особых хлопот пострадавшему, однако у его будущих детей измененная молекула может присутствовать в каждой клетке, то есть клетки ребенка окажутся *мутированными*.

Мутации могут происходить самопроизвольно, как следствие естественного фонового излучения (испускаемого содержащимися в земле радиоактивными веществами), под влиянием космического фонового излучения или же в результате произвольных дефектов при воспроизводстве ключевых молекул. Однако в случае повышения уровня фонового излучения в результате взрывов ядерных бомб количество мутаций возрастает. Большинство мутаций имеют негативные последствия, и если их количество увеличится, то среди людей будет слишком много мутантов.

Были предприняты попытки замерить безопасный для человека уровень радиации.

Единицей излучения является *рентген*, названный так в честь первооткрывателя рентгеновских лучей. Один рентген (R) — это количество рентгеновских или гамма-излучений, достаточное для образования ионов, равных одной единице электростатического заряда (см. ч. II) в 1 куб. см сухого воздуха при 0 °C и давлении в 1 атмосферу. (Это чуть больше 2 млрд положительных или отрицательных ионов.)

Вначале рентген применяли только для измерения электромагнитных излучений. Однако частицы высокой энергии обладают действием схожим с обычным излучением, поэтому была сделана попытка применить эту единицу и к радиоактивным излучениям. *Физический эквивалент рентгена* (ФЭР) — это количество радиации, оказывающей такое же влияние на живую ткань, как и 1 R рентгеновского или гамма-излучения.

Но одно и то же количество радиации оказывает одинаковое влияние не на все живые организмы. Говоря о человеке, стоит ввести понятие *«биологический эквивалент рентгена»* (БЭР), то есть количество излучения частиц, обладающих тем же действием на живые ткани, что и 1 R рентгеновских или гамма-лучей.

Тяжелые частицы особенно опасны для человека. Поэтому 1 *p* рентгеновских лучей можно также определить как 1 бэр. Однако 1 *p* альфа-частиц приравнивается к 10—20 бэр. Другими словами, поглощение одной альфа-частицы для организма по крайней мере в 10 раз вреднее, нежели поглощение ионизирующего излучения (бета-частиц).

Использовать рентгены не всегда удобно, так как они определяют лишь производство ионов, а необходимое для образования ионных пар количество энергии некоторых излучений иногда определить довольно сложно. Поэтому была введена еще одна единица — *рад* (сокращение от «радиация»), которая определяет непосредственно количество энергии. Один рад — это количество энергии, при поглощении которой поглощающее вещество выделяет 100 эрг энергии на грамм. В большинстве случаев 1 рад равен 1 рентгену.

Фоновое излучение — это излучение, порожденное содержащимися в почве радиоактивными веществами, пришедшее из космоса и т. д. Согласно подсчетам, человек в среднем получает 0,05 бэра в год космического излучения и еще 0,05 бэра в год фонового излучения земли. Кроме того, в теле человека содержится калий-40 и углерод-14, облучающие человека еще 0,025 бэра в год. Таким образом, все мы подвержены общему фоновому излучению около 0,125 бэра в год, существовавшему всегда, в том числе и до зарождения жизни на Земле. Однако в тех частях земного шара, где уровень фонового излучения выше и где особое географическое положение усиливает космическое излучение, уровень фонового излучения достигает 12 бэр.

Конечно же выяснить, какой уровень фонового излучения является допустимым для человека экспериментальным путем, невозможно, однако ученые полагают, что человек может переносить излучение около 500 бэр в год. Среди людей, работающих с радиоактивными веществами, каждую неделю проводятся проверки с целью выяснить, не превысила ли доза поглощенного ими излучения дозированной безопасной нормы (предположительно, в течение короткого времени, а также в случае облучения отдельных участков тела организм может выдерживать излучение в 500 бэр и более). Для контроля используются, например, специальные значки, прикрепляемые на грудь, которые состоят из полосок фотопленки, помещенной за различными фильтрами, выделяющими только «нужное» излучение. Чем большую дозу излучения получил человек, тем сильнее почернеет пленка.

Излучение в 100 рентген за несколько дней убивает практически любого млекопитающего, однако для полной стерилиза-

ции пищи от всех микроорганизмов необходимо излучение в несколько миллионов рентген. Столь мощное излучение в результате ядерных испытаний получить не удалось, а все взрывы ядерных бомб за всю историю атомного оружия подняли уровень фонового излучения на очень маленький процент.

Однако уровень фонового излучения все-таки повысился, поэтому под давлением общественного мнения ядерным державам пришлось выработать соглашение о запрете ядерных испытаний, приводящих к повышению уровня фонового излучения.

Наибольшую опасность представляет термоядерное оружие. Во время взрыва атомной бомбы осколки деления разлетаются на очень далеко и представляют опасность (пусть и страшную) лишь на относительно небольшом расстоянии от эпицентра взрыва. Водородная же бомба намного мощнее атомной, и осколки деления ее атомного взрывателя поднимаются взрывной волной высоко в атмосферу, где могут циркулировать в течение нескольких лет, медленно оседая на всей площади планеты. Наибольшую радиационную опасность для человечества представляет именно *выпадение радиоактивных осадков* (термин был придуман в 1945 году после взрыва первых атомных бомб).

В опасности выпадения радиоактивных осадков убедились сразу после испытания первой большой водородной бомбы на Маршалловых островах 1 марта 1954 года, когда зараженными оказались 12 500 кв. км.

Самыми опасными осколками деления являются стронций-90 и цезий-137. Период полураспада стронция-90 — 28 дней, а уровень его радиации остается опасным более 100 лет. Так как стронций по своим химическим свойствам идентичен кальцию, стронций-90 попадает в богатое кальцием молоко животных, питающихся зараженной растительностью. Кальций входит в состав костей, и у детей, употребляющих зараженное стронцием молоко, накапливается в них стронций-90. Обмен атомов в костях идет относительно медленно, поэтому у стронция-90 очень длинный период *биологического полураспада* (то есть даже если тело зачищено от дальнейшего заражения, организму понадобится много времени для выведения и половины зараженных атомов). Кроме того, в костях стронций-90 находится в близком контакте с производящими кровь тканями, что также очень опасно.

Период полураспада цезия-137 составляет 30 лет, и он также является опасным осколком деления. Цезий-137 накапливается в мягких тканях, и, хотя период его биологического полураспада короче, атомы цезия-137 испускают внутри тела гамма-лучи, что наносят организму значительные повреждения.

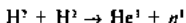
Термоядерная энергия

Понятно, что интерес к процессу ядерного синтеза вызван не только его высокой разрушающей способностью. Если научиться контролировать скорость протекания реакции синтеза, то в обозримом будущем у человечества не возникнет недостатка в энергии.

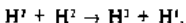
Преимущество ядерного синтеза перед делением ядра заключается прежде всего в топливе. Для реакции деления ядра необходимы встречающиеся довольно редко металлы — уран и торий, в то время как топлива для ядерного синтеза — водорода — предостаточно. Для человечества было бы очень удобно, если для реакций ядерного синтеза требовался бы наиболее часто встречающийся изотоп водорода-1. К сожалению, для того чтобы реакция синтеза с участием водорода-1 шла с достаточной для полезного действия скоростью, необходимо нагреть его до невероятно высокой температуры. Даже при температуре внутри Солнца водород вступает в реакции синтеза очень медленно. Излучение Солнца поддерживается на высоком уровне исключительно из-за огромного количества участвующего в реакции водорода. (Более того, если бы скорость реакции синтеза водорода-1 была выше, Солнце и все остальные звезды взорвались бы.)

Водород-2 (дейтерий) вступает в реакцию синтеза при более низкой температуре, а водород-3 — при еще более низкой. Однако водород-3 очень нестабилен, поэтому нужное его количество собрать сложно. Значит, в качестве топлива остается один лишь водород-2.

Реакция слияния двух атомов дейтерия может с равной вероятностью идти по двум направлениям:



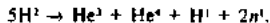
и



В последнем случае образующийся H^3 быстро реагирует с H^2 :



Поэтому реакция в конечном счете выглядит так:



Энергия, образующаяся в результате слияния ядер пяти атомов дейтерия (назовем их «квинтетом дейтерия»), равна 24,8 Мэв.

А так как 1 Мэв равен $1,6 \times 10^{-6}$ эрг, в результате слияния квинтета дейтерия выделяется $4,0 \times 10^{11}$ эрг.

В одной грамм-молекуле водорода-2 содержится $6,023 \times 10^{23}$ атомов. Так как грамм-молекулярный вес водорода-2 равен 2 г, в 1 г водорода-2 содержится $3,012 \times 10^{23}$ атомов. Разделив это число на 5, получаем $6,023 \times 10^{22}$ квинтетов дейтерия в 1 г водорода-2. Общая энергия, выделяемая в результате полного синтеза 1 г водорода-2, равна $2,4 \times 10^{11}$ эрг. В одной килокалории $4,186 \times 10^{10}$ эрг, значит, в результате полного синтеза 1 г водорода-2 выделяется $5,7 \times 10^7$ килокалорий.

Из 7000 атомов водорода только один является атомом водорода-2. При условии, что этот единственный атом весит в два раза больше, чем остальные 6999, в 1 л воды, весящем 1000 г, содержится 125 г водорода, 43 мг которых являются атомами водорода-2. Получается, что в результате синтеза всего содержащегося в 1 л воды водорода-2 высвобождается $2,5 \times 10^6$ килокалорий.

Это означает, что в результате синтеза водорода, содержащегося в 1 л воды, выделяется столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 300 л бензина.

Учитывая огромные размеры Мирового океана (из вод которого можно легко получать водород-2), запасы водорода-2 на Земле составляют около 80 000 куб. км. Из этого количества водорода-2 можно получить столько же энергии, сколько выделяется при сгорании бензина, объем которого в 450 раз превышает объем земного шара.

Очевидно, что, если найти безопасный способ «приручить» реакцию синтеза и использовать ее на практике, человечество будет обеспечено энергией на многие миллионы лет вперед. И довершает эту картину беззаботного будущего тот факт, что продуктами реакции синтеза водорода-2 являются безопасные и стабильные водород-1, гелий-3 и гелий-4 плюс несколько легко поглощаемых нейтронов.

Единственной загвоздкой на пути к раю является то, что для начала реакции синтеза водород-2 нужно нагреть до 100 000 000 °С. Эта температура намного выше температуры внутри Солнца (15 000 000 °С), но у Солнца есть одно преимущество: водород там находится под очень высоким, недостижимым в земных условиях давлением.

На Земле любой газ, нагретый до такой температуры, просто расширится до ненасыщенного пара и тут же охладится. На Солнце этого не происходит из-за его огромной массы, вызывающей силу притяжения, достаточную для удержания газов даже при 15 000 000 °С.

На Земле столь мощной силы притяжения достичь конечно же невозможно, поэтому для удержания газа нужно использовать какие-то другие методы. Контейнер не подойдет, так как любой газ при контакте со стенками сосуда тут же охладится... или расплавит контейнер. Невозможно одновременно нагревать газ до необходимой для начала синтеза температуры и удерживать его сосудами из твердых веществ.

К счастью, существует и другой метод. С повышением температуры атомы «снимают» свои электроны и газ распадается на заряженные частицы: отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные ядра. Вещество, состоящее из электрически заряженных частиц, а не из целых атомов, называется *плазмой*.

Физика плазмы привлекла интерес ученых в основном из-за возможности управления термоядерным синтезом. Однако сегодня становится ясно, что большая часть Вселенной состоит из плазмы. Плазмой являются, например, звезды. На Земле плазма также встречается: шаровая молния — не что иное, как плазма, на время ставшая стабильной. Плазма присутствует и в искусственных устройствах, например в неоновых лампах.

Состоящей из заряженных частиц плазме с помощью магнитного поля можно придать форму «нематериального» контейнера. Сегодня физики делают попытки создать магнитное поле, способное достаточно долго удерживать плазму в стабильном состоянии, и нагреть ее до необходимой для начала термоядерной реакции температуры. Согласно подсчетам, при использовании газа, плотность которого при нормальной температуре составляет всего лишь $1/100$ плотности атмосферы, оказываемое на магнитное поле давление в критической точке в момент начала термоядерной реакции составит 100 атмосфер.

Требования довольно строги, и ученым пока не удалось добиться успехов. За минувшие десятилетия удалось получить температуру 20 000 000 °С и создать магнитное поле, способное выдержать необходимое давление. К сожалению, одновременно поддерживать нужное давление и температуру удается только в течение одной миллионной доли секунды, а для начала первой искусственно управляемой реакции термоядерного синтеза, согласно подсчетам, необходимо поддерживать температуру и давление в течение хотя бы одной десятой доли секунды.

Насколько известно, на пути к достижению не стоит никаких препятствий, нужно лишь время.

Глава 13 АНТИЧАСТИЦЫ

Космические лучи

Итак, пока в нашем с вами атомном мире живут лишь электроны, протоны и нейтроны, однако даже с помощью лишь этих частиц мне удалось многое вам объяснить. В начале 1930-х годов эти частицы были единственными известными субатомными частицами. С помощью электронов, протонов и нейтронов очень легко было объяснить устройство Вселенной в целом, и ученые надеялись, что больше никаких субатомных частиц не существует. Однако некоторые теоретики предположили существование и других типов частиц, которые и были обнаружены в бомбардирующем Землю излучении из космоса. Об этих излучениях мы сейчас и поговорим.

В начале XX века физики занимались поисками новых видов излучений. Открытие радиоволн, рентгеновских лучей и разнообразных радиоактивных излучений заставило ученых, так сказать, повысить чувствительность к этому феномену¹.

Тем не менее самое знаменательное открытие в данной области было сделано при попытке исключить излучение, а не обнаружить его. Используемый для обнаружения проникающего излучения электроскоп с золотыми листками (см. гл. 7) работал слишком уж хорошо. В 1900 году несколько ученых, среди которых стоит отметить Вильсона (изобретателя камеры Вильсона), обнаружили, что электроскоп медленно терял свой заряд, даже когда поблизости не было радиоактивных веществ. Наиболее вероятным объяснением этого явления казалось то, что в почве повсеместно присутствуют небольшие количества радиоактивных веществ, порождающие паразитные излучения.

Однако было обнаружено, что, даже если вывезти электроскоп далеко в море или, еще лучше, закрыть экраном из металла, непроницаемого для известных излучений и не испус-

¹ В одном случае чувствительность была слишком уж сильной. В 1903 году уважаемый французский физик Проспер Блондло сообщил о существовании нового типа излучения, возникающего при растяжении металлов. Он и его коллеги сделали массу докладов об этом излучении, и Блондло назвал его «Н-лучами», по названию города Нанси, где располагался университет, в котором он работал. Несомненно, Блондло действительно считал, что открыл новое излучение, однако Н-лучи оказались всего лишь иллюзией, доклад был бесполезным, и карьера физика была загублена. Этот эпизод является ярким примером того, что и ученые могут ошибаться, и не всему тому, что «научно доказано», стоит верить.

кающего проникающих излучений, потеря заряда электроскопом хотя и замедлялась, но не останавливалась.

В конце концов в 1911 году австрийский физик Виктор Гесс (1883—1964) сделал решающий шаг: он поднял электроскоп на несколько километров вверх на воздушном шаре. Воздушная прослойка послужила экраном от слабых излучений земной поверхности. К его удивлению, скорость разряда электроскопа не только не понизилась, но и, наоборот, резко возросла. Последующие запуски шаров с электроскопами на борту подтвердили это, и Гесс заявил, что, какова бы ни была природа нового излучения, оно исходило из космоса, а вовсе не с Земли.

Роберт Милликен (измеривший заряд электрона) сыграл ведущую роль во время самых первых исследований этого нового излучения и в 1925 году предложил назвать их космическими лучами, так как они исходили из космоса.

Проникающая способность космических лучей выше, чем рентгеновских, и Милликен выяснил, что они являются формой электромагнитного излучения, длина волны которого короче, а частота — выше, чем даже у гамма-лучей. Физики предположили, что это излучение является потоком частиц. Так как излучение исходило из космоса, появлялся способ выяснить, является ли оно потоком частиц или же электромагнитным излучением. Если космические лучи являются электромагнитным излучением, то они будут падать равномерно на всю поверхность Земли (в том случае, если они приходят со всех сторон) и электромагнитное поле Земли не окажет на них никакого влияния.

Если же космические лучи являются потоком заряженных частиц, они будут отклоняться магнитными линиями Земли, причем частицы, энергия которых меньше, будут отклоняться сильнее. В этом случае ближе к магнитным полюсам концентрация космических лучей будет усиливаться, а на магнитной экватор они падать практически не будут.

В 1920-х годах американский физик Артур Комптон (1892—1962) занимался изучением этого *широтного эффекта*. В начале 1930-х годов ему удалось доказать, что широтный эффект действительно существует, а космические лучи являются потоком частиц, а не электромагнитным излучением. Поэтому можно смело говорить о *космических частицах*.

В 1930 году итальянский физик Бруно Росси высказал предположение, что раз космические лучи являются метельчатыми по своей природе, то магнитное поле должно отклонять их на восток, если космические частицы обладают положительным зарядом, то есть больше космических лучей будет падать с за-

падной стороны, и наоборот, если космические частицы заряжены отрицательно.

Для подтверждения существования этого эффекта недостаточно просто обнаружить появление космической частицы, нужно определить направление, откуда она появилась. Для этого был использован разработанный немецким физиком Вальтером Боте (1891—1957) *счетчик совпадений*. Такой счетчик состоит из двух и более счетчиков Гейгера, установленных на одной оси. Когда вдоль этой оси движется космическая частица, она проходит сквозь все счетчики. Электрическая цепь построена таким образом, что частица будет зафиксирована и посчитана только тогда, когда она пройдет сквозь все счетчики (прочем скорость быстрой частицы настолько высока, что для прохождения сквозь все счетчики ей требуется одно мгновение). Направляя ось счетчиков в разные стороны, получим «телескоп для космических лучей».

На оси счетчиков также можно поместить камеру Вильсона и настроить электрическую цепь так, чтобы при обнулении счетчиков камера расширялась. Капли расширяющейся камеры Вильсона «поймают» недолго существующие нейтроны. А если к цепи подключить еще и фотокамеру и настроить ее так, чтобы при каждом расширении она автоматически делала снимок, то космическая частица сама себя сфотографирует.

В 1935 году американский физик Томас Джонсон с помощью счетчика совпадений доказал, что с запада приходит больше космических лучей, чем с востока. Ученые решили, что космические частицы обладают положительным зарядом.

Пониманию подлинной природы космических частиц мешал тот факт, что многие из них не долетали до поверхности земли, ударяясь о то или иное атомное ядро в атмосфере, в результате чего происходили ядерные реакции и появлялось *вторичное излучение* очень высокой энергии. Часть этого излучения состоит из нейтронов, которые могут в результате (n, p)-реакции с азотом-14 образовывать углерод-14 или же, выбивая из азота-14 ядра трития (H^3), образовывать углерод-12 в результате (n, p)-реакции. Эти ядра трития и являются источником небольшого количества существующего на Земле H^3 .

Космические лучи вызывают и другие явления, которые невозможно воспроизвести в лабораторных условиях, так как человечество пока еще не научилось ускорять частицы до скоростей космических частиц с наиболее высокой проникающей способностью. Современные ускорители способны разгонять частицы более чем до 30 млрд электронвольт, а то время как космические частицы обладают энергиями в миллиарды миллиардов электронвольт.

Столь высокая энергия сверхбыстрых частиц вызвана, с одной стороны, их большой массой, а с другой — высокой скоростью, которая приближается к предельной скорости, то есть скорости света в вакууме. Когда такие быстрые частицы проходят сквозь прозрачные вещества (воду, слюду, стекло), их движение практически не замедляется. Сам же свет, наоборот, тормозится этими веществами очень сильно — обратно пропорционально коэффициенту преломления (см. ч. II). Таким образом, в некоторых веществах заряженная частица перемещается быстрее, чем свет, но ее скорость никогда не превышает скорость света в вакууме.

Такая «сверхсветовая» частица отбрасывает контровое излучение, аналогично тому, как сверхзвуковая пуля отбрасывает назад конус звуковых волн. Это явление было обнаружено в 1934 году советским ученым Павлом Алексеевичем Черенковым (1904—1990) и получило название *черенковского излучения*.

По длине волны черенковского излучения, его яркости и направлению можно опеределить массу, заряд и скорость движущейся частицы. В конце 1940-х годов американский физик Иван Геттинг предложил схему *черенковского счетчика*, позволяющего по излучению выделять частицы высокой энергии из потока обычных частиц. Черенковские счетчики дали ученым массу сведений о быстрых частицах.

В 1940-х годах началось исследование космического излучения с помощью высотных шаров и ракет. На больших высотах удалось зафиксировать первичное излучение, то есть сами космические частицы, а не излучения, появляющиеся в результате столкновения космических частиц и атомных ядер. Оказалось, что большая часть (около 80%) космических лучей являются частицами очень высокой энергии, а большая часть остальных — альфа-частицами. Около 2,5% составляют ядра более тяжелых элементов, вплоть до железа.

Все это указывало на то, что космические частицы являются голыми ядрами основного вещества, из которого состоит все во Вселенной. Элементы космических лучей содержатся в пропорции, схожей с пропорцией элементов внутри большинства звезд, например Солнца.

В действительности Солнце является одним из источников космических частиц. Мощные солнечные вспышки приводят к образованию космических лучей, падающих на Землю. Однако Солнце — не единственный и далеко не самый мощный источник космических лучей, так как иначе они падали бы на Землю исключительно со стороны Солнца, а этого не происходит. Более того, энергия испускаемых Солнцем космических частиц сравнительно невысока.

Встает вопрос: каким образом космические частицы получают свою огромную энергию? В результате ядерных реакций не выделяется такого количества энергии. Даже при полном переходе массы в энергию энергия космических лучей все равно выше.

Предположим, что космические лучи являются протонами и ядрами других элементов пусть высокой, но не необыкновенно высокой энергии. Эти частицы разгоняются каким-либо естественным ускорителем «космического масштаба». Магнитные поля солнечных пятен могут разогнать частицы до средних скоростей. Звезды с более интенсивными магнитными полями или даже общее магнитное поле галактики способны ускорять частицы и до более высоких скоростей.

Галактику в этом отношении можно рассматривать как гигантский циклотрон, по которому вихрем проносятся протоны и атомные ядра, набирая энергию и двигаясь по расширяющейся спирали. Если они не сталкиваются с каким-либо материальным объектом, то через некоторое время уровень их энергии возрастает настолько, что они покидают галактику.

Земля прерывает разгон этих частиц. Самыми быстрыми частицами, скорее всего, являются частицы, прилетевшие к нам из других галактик. Возможно, что некоторые галактики с необыкновенно интенсивными магнитными полями могут ускорять космические частицы до больших скоростей, чем наши, и могут являться важными источниками самых быстрых частиц. Однако обнаружить такие галактики пока не удалось.

Позитрон

Давайте вспомним, какие микрочастицы были известны в начале 1930-х годов, когда ученые впервые заговорили о природе космического излучения. Итак, были конечно же протоны, нейтроны и электроны, кроме того, была еще безмассовая «частица» фотон, формирующая электромагнитное излучение.

Фотон позволяет не утруждать себя размышлениями о действии электромагнитного излучения на расстоянии (см. ч. II) и дает почву для обоснования еще одного действующего на большом расстоянии явления — гравитации.

Некоторые физики полагают, что гравитационное взаимодействие включает в себя испускание и поглощение частиц, которые они называют *гравитонами*. Гравитоны, как и фотоны, считаются безмассовыми частицами, распространяющимися, как и все безмассовые частицы, со скоростью света.

Однако гравитационная сила невероятно слабая. Например, сила электростатического притяжения между протоном и электроном в 10^{40} раз превосходит силу гравитационного притяжения между ними. Соответственно гравитон намного слабее среднего фотона, причем настолько, что его так и не удалось обнаружить, и вряд ли это удастся в ближайшем будущем. Тем не менее, допуская его существование, можно составить полную картину Вселенной.

В табл. 13 представлены все эти пять частиц и даны некоторые их свойства. (Свойства гравитона предсказаны, а не измерены практическим путем.)

Таблица 13

СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ СУБАТОМНЫХ ЧАСТИЦ

| Частица | Обозначение | Масса (электрон = 1) | Спин (фотон = 1) | Электрический заряд | Период полуразпада, с |
|----------|-------------|-------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| Гравитон | g | 0 | 2 | 0 | Стабильный |
| Фотон | γ | 0 | 1 | 0 | Стабильный |
| Электрон | e | 1 | $1/2$ | -1 | Стабильный |
| Протон | p | 1836 | $1/2$ | +1 | Стабильный |
| Нейтрон | n | 1839 | $1/2$ | 0 | 1013 |

Начиная с 1950-х годов принято называть все легкие частицы *лептонами* (от греч. «малый»), а тяжелые — *барионами* (от греч. «тяжелый»). Согласно этой классификации, гравитон, фотон и электрон являются лептонами, а протон и нейтрон — барионами.

Было бы очень удобно, если бы во Вселенной вся материя и вся энергия состояли лишь из этих трех лептонов и двух барионов и из них же строились бы все 100 с хвостиком элементов, из которых, в свою очередь, состояло бы все остальное: от звезд до человеческого мозга.

Первый признак того, что не все во Вселенной так просто, был обнаружен еще до открытия нейтрона. В 1930 году английский физик Поль Дирак (1902—1984), рассматривая электрон теоретически, предположил, что электрон должен существовать в одном из двух различных энергетических состояний: в одном состоянии он является обычным электроном, а во втором — несет положительный, а не отрицательный заряд.

Какое-то время это утверждение оставалось сугубо теоретическим. В 1932 году американский физик Карл Андерсон (1905—1991) занимался изучением космических частиц, используя камеру Вильсона, разделенную пополам свинцовой пе-

регородкой. Андерсон предполагал, что, проходя сквозь свинец, космическая частица потеряет значительную часть своей энергии, на выходе будет сильнее отклоняться магнитным полем и изучать ее свойства станет проще. Однако некоторые космические лучи, проходя сквозь свинец, ударились об атомные ядра, вызывая вторичное излучение.

На одной из сделанных Андерсоном фотографий частица была запечатлена в момент выхода из свинца. Судя по кривизне траектории, ее масса равнялась массе электрона, однако она отклонялась в противоположную сторону. Эта частица и является положительно заряженным электроном, о котором говорил Дирак.

Андерсон назвал частицу *позитроном*, и это название прижилось. Позитрон, обладая свойствами, противоположными более распространенной частице, принадлежит к классу частиц, которые мы сегодня называем *античастицами*. Если бы позитрон был обнаружен сегодня, его назвали бы *антиэлектроном*, впрочем, иногда его именно так и называют.

С обозначением позитрона все немного запутанней. Можно использовать полное обозначение, подписывая в нижнем регистре заряд, а в верхнем — массу, то есть обозначая электрон как ${}_{-1}e^0$, а позитрон как ${}_{+1}e^0$. Основным недостатком такой записи является ее громоздкость. Большинство физиков считают, что им совсем не обязательно все время напоминать о заряде и массе (особенно потому, что масса не равна, а лишь близка к 0). Поэтому электрон часто обозначают просто как e^- , а позитрон как e^+ . Но и у такого обозначения есть свои недостатки. Как выяснилось позже, у некоторых античастиц заряд такой же (или он также отсутствует), как и у противоположных им частиц. Поэтому в некоторых случаях удобнее обозначать античастицу полусой над символом. Таким образом, электрон обозначается как e , а позитрон как e^+ .

Позитроны определенным образом связаны с радиоактивностью. Для того чтобы понять, как именно, давайте вспомним, как с радиоактивностью связаны электроны.

Когда количество нейтронов слишком велико и ядро начинает терять устойчивость, положение можно исправить, преобразовав нейтрон в протон путем испускания электрона. В полной записи (с обозначением массы и заряда) этот процесс выглядит так:



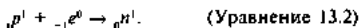
В результате образования еще одного протона атомное число нуклида увеличивается на единицу, однако массовое число

остается неизменным, так как протон образуется за счет исчезновения одного нейтрона.

Возьмем, например, фосфор, единственным стабильным изотопом которого является фосфор-31 (15 протонов, 16 нейтронов). Радиоактивный фосфор-32 (15 протонов, 17 нейтронов) в силу избытка нейтронов должен испустить один электрон в виде бета-частицы, что и происходит. Фосфор-32 испускает бета-частицы и превращается в стабильный изотоп серы-32 (16 протонов, 16 нейтронов).

Все встречающиеся в природе радиоактивные изотопы, как долгоживущие, так и живущие недолго, обладают избытком нейтронов и в процессе перестройки ядра для достижения устойчивости испускают электроны (а также альфа-частицы).

А что произойдет, если искусственным путем создать радиоизотоп с дефицитом нейтронов в ядре? Для достижения устойчивости необходимо увеличить количество нейтронов за счет протонов. Этот процесс можно описать формулой, обратной формуле 13.1. Происходит поглощение электрона протоном, аналогичное К-захвату (см. гл. 8).



Однако существует вероятность и другого процесса. В то время как нейтрон может превратиться в протон путем испускания электрона, протон, по аналогии, может превратиться в нейтрон путем испускания позитрона:

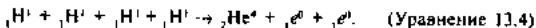


Испускание позитрона (или положительно заряженной бета-частицы) приводит к обратному испусканию электрона результату. Атомное число нуклида уменьшается на единицу вследствие исчезновения протона, а массовое число остается опять-таки неизменным, так как на месте протона появляется электрон.

Фосфор-30 — самый первый полученный искусственным путем радиоизотоп — имел дефицит нейтронов в ядре. В то время как ядро стабильного фосфора-31 состоит из 15 протонов и 16 нейтронов, ядро фосфора-30 состоит из 15 протонов и всего лишь 15 нейтронов. Фосфор-30, период полураспада которого 2,6 мин, испускает позитрон и превращается в стабильный кремний-30 (14 протонов, 16 нейтронов). Получив фосфор-30, супруги Жолио-Кюри предвосхитили открытие позитрона Андерсоном.

В лабораторных условиях было получено большое количество излучающих позитроны радионуклидов. Наиболее известным из них является, пожалуй, углерод-11, использовавшийся в качестве изотопного маркера вплоть до открытия углерода-14.

В природе позитроны образуются в основном в ходе реакций ядерного синтеза с участием водорода на Солнце и других звездах. В процессе слияния четырех ядер водорода-1 в одно ядро гелия-4, которое имеет $2p/2n$ структуру, два протона преобразуются в нейтроны, испуская два позитрона:



Аннигиляция вещества

Электрон является стабильной частицей. Это означает, что самопроизвольно никаких изменений в нем не происходит. Согласно закону сохранения электрического заряда общий заряд остается неизменным. Электрон является самой малой частицей с отрицательным зарядом, и ученые предполагают, что меньшей отрицательной частицы, скорее всего, не существует. Распадаясь, электрон должен стать частицей с еще меньшей массой, а в этом случае для электрического заряда, так сказать, просто не останется места, поэтому электроны и не распадаются.

Это же утверждение относится и к позитрону, являющемуся самой малой частицей с положительным зарядом, который ей некуда девать в случае распада. Поэтому позитрон также считается стабильной частицей, и, если бы во Вселенной были одни лишь позитроны, они существовали бы вечно.

Однако позитрон вовсе не единственная частица во Вселенной. Позитроны образуются в мире, где электроны превосходят их по количеству. При обычных земных условиях не проходит и одной миллионной доли секунды, как позитрон сталкивается с электроном. Что же в этом случае происходит?

Сумма зарядов позитрона и электрона равна нулю. Значит, они могут слиться и нейтрализовать заряды друг друга. Кроме того, они компенсируют и массу друг друга. Такой процесс называется *взаимной аннигиляцией*. Но это не является аннигиляцией в чистом виде, так как согласно закону сохранения массы и энергии что-то все-таки остается, несмотря на нейтрализацию зарядов. Если пропадает масса электрона и позитрона, значит, должно выделиться соответствующее количество энергии.

Общая масса электрона и позитрона равна $1,822 \times 10^{-27}$ граммов. По формуле Эйнштейна $e = mc^2$ (см. ч. I) энергетический эквивалент массы этих двух частиц равен $1,64 \times 10^{-6}$ эрг, или 1,02 Мэв.

Нельзя забывать и о других законах сохранения, имеющих силу при данном преобразовании массы в энергию. Например, закон сохранения углового момента (см. ч. I) определяет спин.

Спин протона может принимать значение либо +1, либо -1. Если в результате взаимной аннигиляции электрона и позитрона образуется протон, энергии которого равна 1,02 Мэв (протон гамма-луча), то, предположив, что спин у электрона и позитрона одинаков, значение этого спина должно равняться 1/2. Если их спин равен $+1/2$, то образуется фотон со спином +1, а если их спин равен $-1/2$, то образуется фотон со спином -1.

Сложность заключается в том, что нужно соблюдать и закон сохранения количества движения (см. ч. I). Если общий импульс системы позитрон-электрон по отношению к окружающим объектам равен нулю, тогда единственный образующийся фотон не сможет сдвинуться с места. Но так как фотон должен двигаться, да еще и со скоростью света, значит, образуются несколько фотонов.

Вместо одного протона образуются три протона, по 0,34 Мэв каждый (они также являются гамма-лучами). Они появляются одновременно и разлетаются в разные стороны под углом 60°. Если спины протонов равны +1, +1 и -1, то и общий спин равен +1, а если -1, -1 и +1, то -1. И в том и в другом случае законы сохранения углового момента и импульса не нарушаются.

Если спины электрона и позитрона имеют одинаковое направление (то есть и у электрона, и у позитрона спин положительный либо отрицательный), то могут образоваться только три протона, но никак не два. Общий спин двух фотонов может быть равен 0 (+1 и -1), +2 (+1 и +1) или -2 (-1 и -1), в то время как общий спин электрона и позитрона может быть равен лишь +1 ($+1/2$ и $+1/2$) или -1 ($-1/2$ и $-1/2$). В данном случае закон сохранения углового момента не соблюдается.

С другой стороны, если спины электрона и позитрона имеют разное направление ($+1/2$ и $-1/2$), то они могут образовать два фотона (+1 и -1), так как угловой момент в обоих случаях равен 0, то есть закон сохранения углового момента соблюдается. Два протона являются гамма-лучами мощностью 0,51 Мэв, которые разлетаются в противоположном друг от друга направлении, то есть соблюдается и закон сохранения импульса.

Я так подробно рассказываю об этом, чтобы показать, как физики с помощью законов сохранения определяли, что на

субатомном уровне происходить может, и что не может. Они основывались на утверждении, что любое «ядерное» явление, если оно может произойти, произойдет обязательно, нужно лишь достаточно долго ждать и пристально наблюдать. Поэтому, если какое-то явление не происходит, несмотря на долгие и сложные исследования, однако оно не «запрещено» ни одним из законов сохранения, значит, нужно вывести новый закон. С другой стороны, если вопреки какому-либо закону явление все же происходит, значит, этот закон действителен только в определенных условиях и нужно вывести более общую формулу.

Было обнаружено, что при взаимной аннигиляции электронов и позитронов выделяются гамма-лучи, энергия которых в точности соответствует расчетной. Это — одно из самых красивых доказательств верности специальной теории относительности Эйнштейна, частью которой является формула $e = mc^2$.

Должен существовать и обратный процесс. Энергия должна каким-то образом переходить в массу. Энергия не может образовывать электрон или позитрон, так как неоткуда взяться заряду. Нельзя создать и лишь один положительный или отрицательный заряд.

Однако электрон и позитрон могут образоваться одновременно. Общий заряд такой *электронно-позитронной пары* все равно остается равным нулю. Для этого необходим гамма-луч мощностью по меньшей мере 1,02 Мэв, а в случае использования более мощного луча избыток энергии переходит в кинетическую энергию частиц — все по Эйнштейну.

Быстрые позитроны образуются благодаря большому избытку энергии космических лучей. Именно эти частицы и являлись первыми античастицами, открытыми Андерсоном.

Когда Дирак разработал теоретическое доказательство, вылившееся в концепцию античастиц, он посчитал, что противоположной электрону частицей является протон. Однако его предположение не подтвердилось, так как электрон и протон противоположны друг другу разве только что зарядом. Масса протона, например, в 1836 раз больше массы электрона. (Почему электрон легче и почему именно в 1836 раз? Эти два вопроса являются одними из самых интересных загадок ядерной физики.)

Электрон и протон притягиваются друг к другу, как и любые другие объекты с разноименными электрическими зарядами, но они не аннигилируют. В крайнем случае протон захватывает электрон и тот занимает самый нижний электронный уровень, то есть приближается к протону на минимальное рас-

стоянке. (В случае протонно-электронной аннигиляции такого соединения просто бы не существовало.)

Электрон и позитрон, которые могут аннигилировать друг друга, также могут захватывать друг друга на какое-то время без аннигиляции. Такой атом, состоящий из движущихся по орбите друг за другом вокруг общего центра притяжения электрона и позитрона (если рассматривать как обычную частицу, не принимая во внимание проявления волновых свойств), называется *позитронием*.

Существуют два вида позитрониев: ортопозитроний, частицы которого имеют одноименный спин, и парапозитроний, частицы которого имеют разноименный спин. Ортопозитроний существует в среднем одну десятую долю микросекунды, после чего происходит аннигиляция, а парапозитроний и того меньше — всего одну десятитысячную микросекунды. После аннигиляции ортопозитрония образуется три протона, а после аннигиляции парапозитрония — два. В 1951 году австрийскому физикку Мартину Дойчу (1917—2002) удалось обнаружить позитронии по испускаемым ими гамма-лучам.

Антибарион

В теории Дирака нет ничего из того, что можно было бы применить к электрону, но ее нельзя применить и к протону. Если у электрона есть античастица, то античастица должна быть и у протона. *Антипротон* взаимно аннигилирует с протоном, в результате чего, как и в случае с позитроном и электроном, образуются пары и тройки фотонов.

Однако так как масса протона в 1836 раз превышает массу электрона, а масса антипротона в 1836 раз превышает массу позитрона, энергия, выделяемая в результате аннигиляции протона и антипротона, должна быть в 1836 раз больше энергии, выделяемой при аннигиляции электрона и позитрона. Общий выход энергии составляет $1,02 \times 1836$, то есть 1872 Мэв, или 1,872 млрд эв. Как видите, мы в диапазоне миллиардов электронвольт.

Для обратного процесса, образования протонно-антипротонной пары, требуется 1,872 млрд эв энергии. В действительности энергии требуется намного больше, так как пара образуется за счет столкновения двух частиц на очень большой скорости, а избыток энергии повышает шансы образования антипротона. По подсчетам физиков, для успешного образования протонно-антипротонной пары требуется 6 млрд эв энергии.

Такой энергией обладают самые быстрые из космических частиц. Однако такие частицы встречаются крайне редко, поэтому сидеть и ждать их с детектором в надежде, что они тут же появятся, довольно глупо.

По этой причине антипротоны были обнаружены лишь тогда, когда физикам удалось построить ускорители частиц, способные разгонять частицы до миллиардов электронвольт. После установки и настройки детекторов ускоренные частицы можно направлять в цель. В Калифорнийском университете для этих целей был использован синхротрон, называвшийся «Беватрон».

Вылетающие из «Беватрона» быстрые частицы ударялись о медную плиту, где в результате столкновения образовывалось огромное количество частиц. Необходимо было выделить из всех этих обломков антипротоны. Для этой цели осколки подвергали воздействию магнитного поля, в результате чего отфильтровывались отрицательно заряженные частицы. Среди них антипротон является самой тяжелой и самой медленной частицей. Поток осколков направляли на расположенные на расстоянии 12,5 м два сцинтилляционных счетчика. Согласно расчетам, антипротон должен пройти это расстояние за 0,051 микросекунды.

В конце концов Эмилио Сегре (первооткрывателю технеция, к этому времени эмигрировавшему в США) и американскому физику Оуэну Чемберлену удалось обнаружить такую частицу в 1956 году.

Антипротон, как и ожидалось, является близнецом протона, равным по массе, но с противоположным зарядом. Протон обладает положительным зарядом, а антипротон — отрицательным. Протон и антипротон можно обозначить как p^+ и p^- , или как p и \bar{p} .

Протон является стабильной частицей и сам по себе может существовать вечно. Его стабильность не подчиняется законам сохранения. Может ли протон распасться до позитрона с энергией в 0,51 Мэв, а оставшуюся большую часть энергии испустить в виде фотонов? Сохранится ли его заряд?

На практике такого не происходит, поэтому мы вполне можем ввести новый закон сохранения — закон сохранения барионного числа. Согласно этому закону общее число барионов должно оставаться неизменным в любом случае. Основываясь на изученных субатомных явлениях, физики уверены в справедливости этого закона.

Если протон распадается до позитрона, количество барионов уменьшается с 1 до 0. Это противоречит закону сохранения барионного числа, поэтому протон и не распадается до позитрона. На самом деле протон является самой легкой частицей среди барио-

нов, поэтому он не может распадаться. Его стабильность является отражением закона сохранения барионного числа.

Аналогично антипротон является стабильной частицей и не может распадаться, например до электрона. Антипротон является самым легким из всех *антибарионов*, а закон сохранения барионного числа применим и к антибарионам.

Во Вселенной при столкновении антипротона с протоном (которых намного больше) тут же происходит аннигиляция. Общий заряд протонно-антипротонной пары равен нулю, поэтому аннигиляция происходит без нарушения закона сохранения электрического заряда. Кроме того, считается, что барионное число антипротона равно -1 , а протона $+1$. Значит, барионное число протонно-антипротонной пары равно 0 , и аннигиляция происходит без нарушения закона сохранения барионного числа.

Выделяемая в процессе аннигиляции протона и антипротона энергия может принимать участие в образовании не только протонов, но и других частиц. Если протон и антипротон проходят очень близко, но не попадают друг в друга, аннигилируется только их заряд, а масса остается. Можно предположить, что в этом случае образуется одна незаряженная частица. Но одна частица образовываться не может, так как барионное число протонно-антипротонной пары равно 0 , а в случае образования, скажем, нейтрона барионное число будет равно 1 , что противоречит закону сохранения барионного числа. На самом деле образуются две частицы — нейтрон и *антинейтрон*. Барионное число антинейтрона равно -1 , нейтрона $+1$, поэтому их общее барионное число равно 0 , то есть закон сохранения барионного числа соблюдается. Такой процесс «полуаннигиляции» был открыт в 1956 году, вскоре после обнаружения антипротона, послужившего толчком к открытию антинейтрона.

Исполне справедлив вопрос: «А как же различать нейтрон и антинейтрон?» Элементы других пар «частица—античастица» отличаются друг от друга полюсом электрического заряда. У электрона заряд отрицательный, у позитрона — положительный. У протона — положительный, у антипротона — отрицательный.

Впрочем, у всех обладающих спином частиц есть еще одно различие. Любую обладающую спином частицу можно представить в виде крошечной сферы, вращающейся вокруг своей оси и имеющей два полюса. Если смотреть на частицу с одного полюса (назовем его первым), то она будет вращаться по часовой стрелке, а если с другого (назовем его вторым) — то против. Давайте считать, что мы всегда смотрим на частицу со второго полюса.

Вращение частицы приводит к образованию магнитного поля и двух магнитных полюсов — северного и южного. Если мы

рассматриваем со второго полюса протон, то его северный магнитный полюс окажется сверху, а южный — снизу. Если же мы рассматриваем со второго полюса антипротон, то сверху окажется его южный, а не северный полюс. Другими словами, если направления спинов частицы и античастицы совпадают, то направления их магнитных полей обратно. То же относится к электрону и позитрону.

Хотя у нейтрона и нет электрического заряда, у него есть магнитное поле, так как, хоть заряд нейтрона и равен 0, отдельные его участки все-таки обладают электрическим зарядом. В 1951 году американский физик Роберт Хофстедтер (1915—1990) начал серию экспериментов по исследованию отдельных нуклонов с помощью пучков быстрых электронов. Ему удалось обнаружить, что и протоны и нейтроны состоят из обладающей электрическим зарядом оболочки и различаются между собой лишь общим зарядом.

Нейтрон и антинейтрон отличаются друг от друга противоположным направлением магнитного поля. Так как у нейтрона и антинейтрона нет электрического заряда, то символ n^0 применим и к той и к другой частице. Поэтому обычно их обозначают как n и \bar{n} .

Период полураспада нейтрона равен 1013 секундам. Нейтрон распадается на протон и электрон, то есть барион превращается в более легкий барион, при этом барионное число остается неизменным. Общий заряд также остается неизменным и равен 0. Помимо этого образуется еще и электрон, но тут есть одна тонкость, о которой мы поговорим в следующей главе, где подведем под закон сохранения и электрон.

Точно так же период полураспада антинейтрона равен 1013, и он распадается на антипротон и позитрон, сохраняя барионное число (-1) и электрический заряд (0). Графически этот процесс выглядит так:



и



Антивещество

Теперь мы можем добавить в табл. 13 еще три частицы: позитрон, антипротон и антинейтрон, каждая из которых является, так сказать, зеркальным отражением какой-либо частицы в

таблице. У оставшихся фотона и гравитона зеркального отражения нет и быть не может, поскольку с теоретической точки зрения безмассовые частицы одновременно являются собственными античастицами. Другими словами, «антифотон» и «антигравитон» идентичны соответственно фотону и гравитону.

Итак, мы имеем 4 лептона (1 из которых является антилептоном) и 4 бариона (2 из которых являются антибарионами).

Наша Вселенная (или, по крайней мере, та ее часть, которую мы имеем возможность изучать) крайне однобока в плане количества частиц по сравнению с античастицами. Практически вся она состоит из частиц, в то время как античастицы встречаются довольно редко, и существуют они всего лишь долю микросекунды.

Вполне закономерен вопрос: «А почему все так, а не иначе?» Большинство физиков считают, что все присутствующее во Вселенной вещество постепенно или мгновенно образовалось из энергии много-много лет назад.

Можно предположить, что вещество образуется в виде нейтронов, которые потом распадаются до протонов и электронов, или все эти три частицы образуются независимо друг от друга. А из избытка энергии образуются фотоны и гравитоны.

Но в случае образования нейтрона согласно закону сохранения барионного числа должен образовываться и антинейтрон. Затем в процессе распада этого нейтрона образуются антипротоны и позитроны, то есть общее количество образующихся частиц и античастиц будет одинаковым и любые мыслимые ряды образовавшихся Вселенную ядерных реакций будут иметь один и тот же результат.

Кроме того, если бы частицы и античастицы образовывались одновременно, они тут же бы перешли обратно в энергию в результате взаимной аннигиляции. В этом случае Вселенная образоваться бы не могла. Если частицы и античастицы и образовывались одновременно, то в условиях последующей полной изоляции друг от друга для исключения их взаимодействия.

Поэтому действие гравитации на отдельные субатомные частицы настолько мало, что его так и не удалось измерить. Существует вероятность того, что, в то время как частицы слабо притягиваются гравитационным полем, античастицы слабо им отталкиваются. Другими словами, античастицы создают «антигравитацию». В случае образования частиц и античастиц в огромных количествах их гравитационные поля начнут сильно отталкивать друг друга, в результате чего могут на огромном расстоянии друг от друга образоваться две Вселенные. Австрий-

ский физик Морис Гольдгабер много размышлял о таком варианте. Он дал двум Вселенным названия «космон» и «антикосмон». Мы живем конечно же в космоне.

В космоне атомные ядра состоят из окруженных электронами протонов и нейтронов. В состоящем полностью из античастиц антикосмоне атомные ядра состоят из окруженных позитронами антипротонов и антинейтронов. Из этих атомов образуется так называемое *антивещество*.

Вселенная антивещества, скорее всего не поддающаяся наблюдению, полностью аналогична нашей. Там есть и «антигалактики», состоящие из «антизвезд», вокруг которых вращаются «антипланеты», и на них, возможно, есть «антижизнь» и даже разумные «антисущества», изучающие свою Вселенную так же, как мы изучаем свою.

Они заметят, что их Вселенная почти полностью состоит из того, что мы называем античастицами, а частицы в их Вселенной встречаются редко и существуют очень недолго. Хотя, скорее всего, они решат, что это их Вселенная состоит из частиц и вещества, а наша — из античастиц и антивещества, то есть их предположение будет точно таким же, как и наше.

Можно также предположить, что Вселенная всего одна, а вещество и антивещество разделены в ней на две равные порции. Эти отдельные порции представлены в виде галактик (или скоплений галактик), состоящих либо из вещества, либо из антивещества; и те и другие существуют во Вселенной одновременно.

Если даже это и так, то проверить очень сложно. Единственные имеющиеся у нас сведения о других галактиках — это их гравитационное влияние и излучения, а передают нам эти сведения гравитоны и фотоны, долетающие до нас из этих галактик. Как мы знаем, гравитоны и фотоны являются античастицами самих себя, и их могут испускать как галактики, так и антигалактики. Другими словами, раз антигалактика испускает те же фотоны и гравитоны, что и галактика, значит, по этим частицам невозможно определить, из галактики какого типа они прилетели. (Разве только окажется, что между веществом и антивеществом действует сила гравитационного отталкивания и существует такая вещь, как антигравитон. Впрочем, вероятность этого очень мала.)

Конечно же существует вероятность того, что галактика и антигалактика могут приблизиться друг к другу. Тогда в результате взаимной аннигиляции выделится количество энергии, во много раз превосходящее выделяемое в обычных условиях. Существуют галактики, испускающие необычно большое количе-

ство энергии, что в очередной раз поднимает вопрос существования антивещества в головах физиков-теоретиков.

В 1962 году были обнаружены странные объекты, получившие название «квизизвезды», или *квизары*. Они испускают излучение, мощность которого равняется излучению 100 галактик, вместе взятых, в то время как их размеры не превосходят 1—10 световых лет в диаметре (диаметр галактики же в среднем составляет 100 000 световых лет).

Однако при попытке объяснить это явление никто еще не использовал термин «антивещество». К антивеществу прибегнут лишь в самом крайнем случае, так как такое объяснение очень трудно проверить.

Глава 14

ПРОЧЕ ЧАСТИЦЫ

Нейтрино

В гл. 11 мы говорили о том, что в ходе ядерных реакций масса переходит в энергию согласно формуле Эйнштейна $e = mc^2$. Это соответствие соблюдается и при полной аннигиляции частицы ее античастицей, и при образовании пары «частица—античастица» из энергии.

Несмотря на то что в большинстве случаев соотношение $e = mc^2$ выполняется полностью, в случае с радиоактивными излучениями существует одно исключение.

Альфа-излучение закону сохранения энергии подчиняется. Когда материнский атом самопроизвольно распадется на дочернее ядро и альфа-частицу, сумма образовавшихся продуктов отличается от массы исходного ядра. Это различие выражается в кинетической энергии быстрой альфа-частицы. Так как в результате распада ядра одного и того же элемента образуются одни и те же продукты, и разница в массе, и кинетическая энергия должны быть одинаковыми. Другими словами, пучок альфа-частиц должен быть *моноэнергетическим*, *хаковым* он в данном случае и является.

У некоторых веществ испускаемый пучок альфа-частиц можно условно разделить на две и более группы, каждая из которых будет моноэнергетической, но уровень ее энергии будет отличаться от уровня энергии другой. Объясняется это тем, что материнское ядро может существовать на различных энергетических уровнях. В возбужденном состоянии ядро обладает несколько большей энергией, чем в обычном, и образующиеся при распаде

такого ядра альфа-частицы обладают большей кинетической энергией. Каждому энергетическому уровню материнского ядра соответствует определенная группа моноэнергетических альфа-частиц, но соотношение массы и энергии остается неизменным (то есть соблюдается закон сохранения энергии).

Предполагалась, что все вышесказанное справедливо и для элементов, ядра которых распадаются на дочернее ядро и бета-частицу. Казалось вполне закономерным, что такие бета-частицы также образуют моноэнергетический пучок или в крайнем случае небольшую группу моноэнергетических лучей.

Однако в 1900 году Беккерель обнаружил, что разброс значений уровня кинетической энергии у излучаемых бета-частиц гораздо шире. В 1914 году Джеймс Чедвик доказал существование «непрерывного спектра бета-излучения».

Из потери массы была высчитана максимальная энергия бета-частицы, однако лишь у некоторых частиц уровень равнялся максимальному значению. (Ни у одной частицы уровень энергий не превышал максимальный, так как энергия, к сожалению, не образуется из ничего.)

Уровень энергии у бета-частиц был самым разнообразным (в пределах максимального). Некоторые вообще практически не обладали кинетической энергией. Более того, значительная часть энергии вообще куда-то исчезла, и в течение всех 1920-х годов ученые так и не могли обнаружить куда.

Исчезновение энергии так же невозможно, как и ее образование. Хотя некоторые физики, включая Нильса Бора, и готовы были признать закон сохранения энергии недействительным для субатомных частиц, остальные отчаянно искали какое-то другое объяснение.

В 1931 году Вольфганг Паули предложил свое объяснение. Он предположил, что во время образования бета-частицы образуется еще одна бета-частица, которая как раз и несет «недостающую» энергию первой бета-частицы.

В этом случае эта гипотетическая частица должна обладать определенными свойствами. При излучении бета-частицы сохраняется электрический заряд, то есть общий заряд образовавшихся частиц такой же, как и заряд исходных частиц. Соответственно частица Паули должна быть незаряженной. В этом был определенный смысл, так как если частица была бы заряженной, то во время своего движения она бы ионизировала окружающие атомы, то есть ее можно было бы обнаружить, например, в камере Вильсона. Но обнаружить ее не удалось.

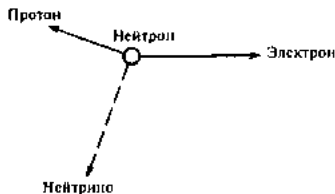
Кроме того, общий заряд предложенной Паули частицы был очень небольшим — равным недостающему количеству кинети-

ческой энергии электрона. От энергии частицы зависит ее масса, а значит, у частицы со столь низкой энергией и масса должна быть небольшой. Вскоре выяснилось, что масса новой частицы должна составлять менее 1% от массы электрона, то есть она уж точно являлась безмассовой.

Энрико Ферми, сразу заинтересовавшийся теорией Паули, хотел было дать название новой частице — «нейтрон», но к тому времени Чедвик уже обнаружил тяжелую незаряженную частицу, которую мы называем нейтроном. Тогда Ферми добавил к понравившемуся названию итальянский уменьшительный-ласкательный суффикс, и получился «нейтрино» («маленький и нейтральный»), и название прижилось.

Физики прозвали незаряженную безмассовую частицу «призраком», так как ее невозможно было обнаружить ни по заряду, ни по массе. Ее существование было бы очень сложно принять на веру, пусть даже и ради спасения закона сохранения энергии, если бы нейтрино не спасли еще три закона сохранения.

Это стало очевидным после применения нейтрино к теории распада нейтронов. Нейтрон имеет период полураспада 12 мкс и распадается на протон и электрон, причем кинетическая энергия вылетающего электрона может принимать различные значения. Тогда, по теории Паули, нейтрон распадается на три частицы: протон, электрон и нейтрино.



Распад нейтрона

Разница между распадом до трех частиц вместо двух очень важна с точки зрения закона сохранения количества движения (см. ч. I). Если нейтрон в состоянии покоя распадается лишь на две частицы, они должны разлететься в противоположном друг от друга направлении по прямой траектории. Только в этом случае закон сохранения количества движения будет соблюден.

Если же этот нейтрон распадется на три частицы, то две из них вылетят по одну сторону от проведенной через центр ядра

воображаемой прямой линии и их общий импульс будет компенсирован импульсом третьей частицы, вылетающей в противоположную сторону.

В результате проведенных исследований распада нейтрона выяснилось, что образующиеся протон и электрон вылетают по одну сторону от проведенной через центр ядра воображаемой прямой линии и что для сохранения количества движения просто необходимо существование третьей частицы, вылетающей по другую сторону от этой линии.

Как только удалось понять сущность спина частиц, стало ясно, что нейтрино очень удобно использовать и в связи с законом сохранения углового момента (см. ч. I). Спин нейтрона, протона и электрона может принимать значение $+1/2$ либо $-1/2$. Предположим, что нейтрон распадется только на протон и электрон. Общий спин протона и электрона может быть равен $+1$, 0 или -1 ($+1/2$ и $+1/2$, $-1/2$ и $+1/2$ или $-1/2$ и $-1/2$). При любом раскладе общий их спин отличается от спина нейтрона ($+1/2$ или $-1/2$), то есть угловой момент не сохраняется.

Теперь предположим, что спин нейтрино может быть равен $+1/2$ или $-1/2$. Тогда общий спин трех частиц может быть равен $+1/2$ или $-1/2$, например $+1/2$, $+1/2$ и $-1/2$, то есть угловой момент сохраняется.

И наконец, третий, более тонкий закон сохранения. В предыдущей главе я говорил о законе сохранения барионного числа. Барионное число протона и нейтрона равно $+1$, а антипротона и антинейтрона -1 . При распаде нейтрона барионное число сохраняется, так как из нейтрона (барионное число $+1$) образуется протон (барионное число $+1$).

А существует ли подобный закон для электронов, где число электрона будет равняться $+1$, а позитрона -1 ? Если мы рассматриваем только эти две частицы, то не будет. Например, в результате распада нейтрона образуется в том числе и один электрон, хотя в начале распада никаких электронов (или позитронов) нет.

Рассмотрим *семейство электронов*, включающее не только электроны и позитроны, но и нейтрино. Чтобы все сошлось, нам нужны еще и *антинейтрино*. Отличие антинейтрино от нейтрино заключается в направлении магнитного поля вращающейся частицы, как и в случае с нейтроном и антинейтроном (см. гл. 13). Электронное число нейтрино будет равно $+1$, а антинейтрино -1 .

Теперь рассмотрим распад нейтрона с точки зрения вышесказанного. Электронное число нейтрона равно 0 , так как он не является членом электронного семейства. Нейтрон распада-

ется на протон (электронное число 0) и электрон (электронное число +1). Если добавить сюда и еще антинейтрино (электронное число -1) вместо нейтрино, то действует закон сохранения электронного числа (электронное число равно 0 до и после распада нейтрона).

Так же как и нейтрино, антинейтрино спасает законы сохранения энергии, количества движения и углового момента, а кроме того, добавляет еще один — закон сохранения электронного числа. Обозначив нейтрино как ν , а антинейтрино как $\bar{\nu}$, можем записать следующую формулу распада нейтрона:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}^0. \quad (\text{Уравнение 14.1})$$

С другой стороны, продуктом преобразования протона в нейтрон с испусканием позитрона (см. гл. 13) является частица с электронным числом -1. Для компенсации необходимо добавить еще и нейтрино (электронное число +1). Запишем это:

$$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu^0. \quad (\text{Уравнение 14.2})$$

И действительно, допуская образование в ходе ядерных реакций нейтрино и антинейтрино, мы можем сохранить соблюдение четырех законов сохранения: энергии, количества движения, углового момента и электронного числа. Ради получения этой «компенсации в четырехкратном размере» придется признать существование нейтрино и антинейтрино независимо от того, можно их обнаружить или нельзя.

Взаимодействие нейтрино

Несмотря на косвенное доказательство существования нейтрино и антинейтрино через законы сохранения, физики решились успокоиться только после обнаружения этих частиц. Для того чтобы обнаружить нейтрино или антинейтрино, необходимо, чтобы эти частицы вступили в распознаваемое взаимодействие с другими частицами.

Например, в процессе распада нейтрона до протона испускается антинейтрон. А может ли происходить обратный процесс, то есть превращение протона в нейтрон в результате поглощения антинейтрино? Тогда в процессе поглощения антинейтрино могли бы остаться какие-либо распознаваемые следы.

К сожалению, вероятность поглощения антинейтрино очень мала. Период полураспада нейтрона до протона равен 12 мин.

Это означает, что существует 50%-ная вероятность испускания нейтроном протона за эти 12 мин. Отсюда следует, что, если антинейтрино находится в непосредственной близости от протона в течение 12 мин, существует 50%-ная вероятность поглощения его протоном.

Однако антинейтрино не может находиться в непосредственной близости от протона не то что 12 мин, а и одной миллионной доли секунды. Безмассовые частицы, такие как нейтрино, антинейтрино, фотон и гравитон, сразу же после образования начинают движение со скоростью света и продолжают двигаться с этой скоростью до самого момента поглощения. Это значит, что антинейтрино будет находиться в непосредственной близости от протона всего лишь в течение 10^{-23} с, а в этом случае вероятность взаимодействия между этими частицами крайне мала. Нейтрино и антинейтрино настолько малы, что для их поглощения необходимо таердое вещество толщиной в среднем 3500 световых лет.

Ситуация с фотоном диаметрально противоположна. Фотон также перемещается со скоростью света, однако, когда ситуация с энергией требует испускания атомов фотона, испускание происходит уже спустя 10^{-18} . Соответственно для успешного поглощения фотона частица должна находиться в непосредственной близости от атома в течение всего лишь 10^{-14} . Кроме того, длина волны фотона гораздо больше, чем нейтрино (если рассматривать обе частицы в виде волн), поэтому фотону для преодоления объекта необходимо больше времени, чем нейтрино, несмотря на то что обе частицы движутся с одинаковой скоростью.

Гамма-лучи поглощаются свинцовой плитой толщиной всего лишь 3 м. Видимый свет, длина волны которого еще больше, чем у гамма-лучей, настолько медленно проникает сквозь один атом, что поглощается веществом толщиной всего в несколько атомов.

Из этого вытекает одно очень важное для астрономии следствие. В процессе ядерного синтеза гелия из водорода протоны преобразуются в нейтроны, а вместе с фотонами образуются и нейтрино.

Фотоны несут 90—95% энергии, выделяемой солнечным ядром, в то время как нейтрино обладают лишь оставшимися 5—10% энергии.

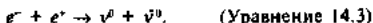
Сразу после образования фотоны поглощаются и снова испускаются солнечным веществом; это повторяется снова и снова, поэтому в среднем сформировавшемуся в ядре фотону требуется около миллиона лет для того, чтобы добраться до поверхности

Солнца и улететь в космос. Солнечное вещество является великолепным изолятором, о чем свидетельствует тот факт, что температура солнечного ядра составляет 15 000 000 °С, а температура поверхности, расположенной всего лишь на расстоянии 688 000 км, равна каким-то 6000 °С.

Однако образующиеся в ядре нейтрино не поглощаются солнечным веществом. Они пронзают солнечное вещество словно вакуум и со скоростью света вылетают наружу, достигая поверхности менее чем за 3 с. Столь быстрая потеря энергии снижает температуру солнечного ядра, но незначительно.

Некоторая часть солнечных нейтрино достигает Земли и проходит сквозь нее за $\frac{1}{135}$ долю секунды. Через каждый квадратный сантиметр поперечного сечения Земли (и через нас с вами тоже) проходит около 10 млрд нейтрино. Мы подвергаемся бомбардировке день и ночь, так как даже в ночное время стоящая на пути солнечных лучей Земля не защищает нас от нейтрино. С другой стороны, проходя через нас, нейтрино не вступают во взаимодействие с нашим организмом, поэтому они безвредны.

Существует возможность образования нейтрино и антинейтрино без участия протонов и нейтронов. Например, электронно-позитронная пара может образоваться из фотонов гамма-лучей, после чего электрон и позитрон вступают во взаимодействие и образуют нейтрино и антинейтрино:



В этой реакции энергия, заряд, количество движения, угловой момент, а также электронное число сохраняются. Общее электронное число электрона и позитрона равно 0, как и у нейтрино и антинейтрино.

Вероятность такого электронно-позитронного взаимодействия чрезвычайно мала даже при температуре солнечного ядра, поэтому его нельзя принимать за важный источник нейтрино. Впрочем, в ходе образования звезды ядро становится все горячее и горячее и вероятность преобразования фотонов в нейтроны через электронно-позитронную пару растет.

Подсчитано, что при температуре 6 000 000 000 °С преобразование фотонов в нейтроны идет настолько интенсивно, что нейтроны несут большую часть энергии ядра такой звезды. Нейтроны тут же покидают ядро, унося с собой столько энергии, что ядро взрывается. При этом выделяется огромное количество энергии. Предполагается, что именно в результате этого звезды взрываются, образуя сверхновые.

То, что вероятность взаимодействия нейтрино с другой частицей крайне мала, конечно же не означает, что такое взаимодействие невозможно. Необходимая для поглощения нейтрино толщина твердого материала в 3500 световых лет — это лишь усредненное значение. Для некоторых нейтрино требуется гораздо больше вещества, а для некоторых — гораздо меньше. Существует некоторая, пусть чрезвычайно малая, но не равная нулю вероятность того, что нейтрино поглотит вещество толщиной всего лишь в километр, а то и в несколько сантиметров.

В 1953 году американские физики Клайд Коуэн и Фредерик Райнес провели серию экспериментов, целью которых было доказать возможность такого взаимодействия. В качестве мишени для протонов они использовали огромные резервуары с водой (в воде много атомов водорода, ядра которых состоят из одного протона), поместив их на пути потока антинейтрино, испускаемых от термоядерного реактора. (Антинейтрино образовывались в результате быстрого преобразования нейтронов в протоны внутри ядер продуктов деления.)

Если согласно формуле, обратной формуле 14.1, для образования антинейтрино должен присоединиться к протону, протон должен одновременно присоединить и электрон. Именно необходимость присоединения двух частиц одновременно сводит вероятность такой реакции практически до нуля. Однако поглощение электрона эквивалентно испусканию позитрона, и поэтому вероятное взаимодействие нейтрино и протона приобретает следующий вид:



В ходе такой реакции барионное число сохраняется, так как вместо протона (+1) появляется нейтрон (+1). Сохраняется и электронное число — антинейтрино (-1) заменяется позитроном (-1).

Коуэн и Райнес подсчитали, что в используемой ими водной мишени взаимодействия антинейтрино и протона должны происходить 3 раза в час. Неудобство заключалось в том, что одновременно происходило и огромное количество других явлений, связанных с космическими лучами, паразитными радиоактивными излучениями и т. п. Вначале эти нежелательные явления происходили в несколько раз чаще, чем искомые реакции антинейтрино. Со временем их количество удалось сократить до допустимого предела с помощью мощного экранирования, отсеивающего большую часть поступающих извне субатомных частиц, но конечно же не представляющего преграды для антинейтрино.

Оставалось лишь точно и с максимальной долей уверенности зафиксировать взаимодействие антинейтрино. В процессе этого взаимодействия образуются позитрон и нейтрон. Позитрон сразу же вступает в реакцию с электроном, сопровождающуюся испусканием в противоположных направлениях гамма-лучей известного запаса энергии.

Образующийся в результате взаимодействия нейтрон через несколько миллионных долей секунды поглощается атомами кадмия (кадмий в форме соединения хлорида кадмия добавляется в воду как раз в целях поглощения нейтронов), после чего атом кадмия, приведенный лишним нейтроном в возбужденное состояние, испускает гамма-луч (а иногда и три гамма-луча) известной частоты. Именно эта цепочка событий — испускание двух гамма-лучей определенной частоты, а затем испускание еще одного гамма-луча определенной частоты — и является признаком существования антинейтрино. Насколько известно, никакая другая частица не вызывает аналогичной цепочки событий.

В 1956 году по этой характерной схеме гамма-излучения удалось обнаружить существование нейтрона. Предположение, сделанное Паули еще 25 лет назад, наконец-то подтвердилось.

Мيون

Пока Паули изучал непрерывный спектр бета-излучения, возник еще один, не менее сложный вопрос.

Объем атомного ядра составляет примерно 10^{-40} см. Сила электромагнитного отталкивания между находящимися столь близко друг к другу протонами колоссальна. Пока ученые считали, что в ядре также существуют и электроны, можно было предположить, что сила взаимного электромагнитного отталкивания электронов (которая также очень высока) компенсирует силу отталкивания протонов. Таким образом, электроны являлись «ядерным цементом». Внутреннее строение ядра объяснялось с точки зрения электромагнитных сил, как и взаимосвязь атомов и молекул.

Устойчивость ядра можно объяснить, лишь предположив, что между нуклонами существует действующая только на крайне небольшом расстоянии сила взаимного притяжения, гораздо сильнее силы отталкивания.

В начале 1930-х годов в результате развития квантомеханического анализа было сделано предположение, что сила, действующая на таком расстоянии, на каком действует электромаг-

нитная сила, возникает за счет испускания и поглощения фотонов. Обменивающиеся фотонами заряженные частицы испытывают *обменные силы*¹. Термин был предложен Гейзенбергом в 1932 году. По аналогии было сделано предположение, что сила гравитации действует за счет испускания и поглощения гравитонов (см. гл. 13).

И электромагнитные силы, и сила гравитации, разница между которыми заключается лишь в площади испускающей их поверхности, действуют на расстоянии космического масштаба.

Однако предполагаемая ядерная сила должна действовать лишь на крайне небольшом расстоянии: большом внутри ядра и незначительном — за его пределами. В большом атомном ядре ядерная сила должна действовать лишь в пределах его диаметра. Возможно, именно поэтому ядра более тяжелых элементов с такой легкостью вступают в реакцию деления ядра.

Японский физик Хидоки Юкава (1907—1981) задался целью выяснить механизм столь необычайно большой силы со столь коротким радиусом действия. Я расскажу вам о его умозаключениях в упрощенном виде, не вдаваясь в квантомеханические подробности. Согласно принципу неопределенности невозможно точно определить одновременно и местоположение, и импульс. Погрешность определения одного из них, умноженная на погрешность определения другого, приблизительно равна постоянной Планка. Местоположение и импульс можно заменить на энергию и время. Получается, что невозможно определить точное количество энергии системы в определенный момент времени. Всегда существует небольшой период, во время которого количество энергии невозможно определить точно. Погрешность измерения количества энергии, умноженная на погрешность определения времени, опять-таки приблизительно равна постоянной Планка.

В течение периода, во время которого невозможно точно определить количество энергии, протон, например, может испустить микрочастицу. Вообще-то у него для этого нет энергии, но за тот период, что мы не можем точно определить его энергию, протон легко может нарушить закон сохранения энергии, так сказать, совершенно безнаказанно, поскольку никто не может проконтролировать соблюдение этого закона.

К концу этого периода частица, которую испустил протон, должна вернуться на свое место, и протон снова уже будет под-

¹ Вообще-то физики постепенно отказываются от слова «сила», предпочитая для описания результатов испускания и поглощения фотонов использовать термин «взаимодействие».

чиняться закону сохранения энергии. Частица, испускание и поглощение которой прошло так быстро, что ее невозможно обнаружить, называется *виртуальной частицей*. Теоретически она должна существовать, но нет способа обнаружить ее на практике.

За время своей жизни виртуальная частица может удалиться от породившего ее протона, но на ограниченное расстояние, так как она должна успеть вернуться до окончания периода своего существования. Чем тяжелее частица (и больше ее энергия), тем выше погрешность измерения этой энергии и меньше период существования виртуальной частицы, так как их произведение является константой при любых обстоятельствах. Значит, в случае увеличения погрешности измерения одной единицы пропорционально уменьшается погрешность измерения другой.

Даже если виртуальная частица двигается со скоростью света, она не может далеко улететь от протона, так как значение постоянной Планка очень мало, соответственно время существования частицы крайне мало. Как правило, расстояние, на которое виртуальная частица уходит от протона, недостаточно для столкновения этой частицы с другой частицей, за исключением ситуации, когда нейтроны и протоны находятся в непосредственной близости друг от друга, как, например, внутри атомного ядра. В этом случае одна из испускаемых протоном частиц может быть поглощена нейтроном до ее возвращения к протону. Именно такое испускание и поглощение виртуальных частиц и приводит к возникновению ядерной силы.

В 1935 году Юкава сделал предположение, что виртуальная частица является частицей обмена ядерной силы. В отличие от частиц обмена электромагнитной силы и силы гравитации частица обмена ядерной силы должна обладать массой, чтобы допустимое время ее существования было достаточно малым для ограничения радиуса ее действия до нужного значения. Юкава подсчитал, что масса такой виртуальной частицы должна быть примерно в 270 раз больше массы электрона. В этом случае допустимое время ее существования будет достаточно коротким, чтобы радиус ее действия был таким, каким, согласно наблюдениям, и должен быть радиус действия ядерной силы.

Так как масса виртуальной частицы — нечто среднее между массой легких электронов и тяжелых частиц, частица получила название «мезотрон» (от греч., означающего «средний»), которое быстро сократили до *мезон*.

Согласно теории Юкавы, в процессе обмена протон становится нейтроном, а нейтрон — протоном. Другими словами, мезон, переходя от одной частицы к другой, должен нести с

собой электрический заряд. Получается, что такой мезон является положительным. В случае с антипротоном и антинейтроном ядро антивещества удерживает еще одна античастица — отрицательный мезон.

Вскоре выяснилось, что обменные силы действуют и между двумя протонами, и между двумя нейтронами, то есть должен существовать еще и нейтральный мезон. Такой нейтральный мезон является античастицей самого себя и связывает антипротон с антипротоном или антинейтрон с антинейтроном.

Протонно-нейтронные обменные силы больше протонно-протонных, а это значит, что коэффициент дефекта массы у ядра с комбинацией p - n меньше, чем у ядра с комбинацией p - p . Поэтому для преобразования комбинации p - n в p - p внутри ядра необходима энергия.

При переходе n в p небольшое количество энергии высвобождается (самопроизвольный распад нейтрона), но этой энергии не всегда достаточно для преобразования комбинации p - n в p - p . Поэтому в ядрах некоторых элементов нейтрон не превращается в протон, а остается неизменным; в этом случае ядро является стабильным.

Для доказательства мезонной теории Юкавы необходимо было, собственно говоря, обнаружить мезон. Внутри ядра его обнаружить невозможно, так как там мезоны являются лишь виртуальными частицами. Однако, если к ядру подвести достаточное количество энергии, можно получить мезон и без нарушения закона сохранения энергии. В этом случае мезон становится реальной частицей и может покинуть ядро.

Карл Андерсон, ранее обнаруживший среди оставленных космическими лучами в камере Вильсона следов позитрон, в 1936 году обнаружил след еще одной частицы, траектория полета которой отклонялась меньше, чем у электрона, но больше, чем у протона. Очевидно, что эта частица обладала средней массой, и сначала физики решили, что это и была предсказанная Юкавой частица.

Но они ошиблись. Обнаруженная Андерсоном частица была лишь в 207 раз тяжелее электрона, то есть намного легче мезона. Кроме того, эта частица существовала лишь в двух вариантах — с положительным зарядом и с отрицательным, причем исходными частицами являются как раз последние; не было даже намека на существование незаряженной разновидности. Но хуже всего то, что частица не вступала во взаимодействие ни с протонами, ни с нейтронами, а юкавская частица должна вступать во взаимодействие с любым встретившимся на пути нуклоном. Мезон же Андерсона практически не вступал ни в какие взаимодействия.

Со временем стало ясно, что существует не один, а несколько различных мезонов и что мезон Андерсона не является частицей обмена, о которой говорил Юкава. Названиями различных типов мезонов присвоили различные приставки (обычно буквы греческого алфавита), и обнаруженный Андерсоном мезон получил название *мю-мезон*, вскоре сокращенное до *мюона*.

В ходе изучения свойств мюона выяснилось, что мюон очень похож на электрон. Обе частицы обладали одинаковым зарядом: и у электрона, и у мюона частицей является разновидность с отрицательным зарядом, а античастицей — с положительным. Спин и магнитные свойства мюона и электрона также совпали. Отличались лишь масса и устойчивость.

Действительно, у любого взаимодействия с участием электрона есть аналог с участием мюона. До своего распада мюон может даже заменять электроны в атомах, образуя *мезоатом*. В этом случае должен сохраняться угловой момент. Если мы воспользуемся старомодным представлением об электроне как о вращающейся вокруг ядра частице и заменим электрон на мюон, то у вращающегося с той же скоростью, что и электрон, мюона орбита должна быть ближе к ядру. Тогда большая масса мюона компенсируется меньшим радиусом обращения и угловой момент сохраняется (см. ч. I).

Так как мюон в 207 раз тяжелее электрона, расстояние от ядра до мюона должно составлять $1/207$ расстояния от ядра до электрона. Это означает, что в тяжелых атомах орбита мюона первого энергетического уровня должна быть внутри ядра! Тот факт, что мюон свободно вращается внутри ядра, доказывает, насколько мала тенденция мюона вступать во взаимодействие с протонами и нейтронами.

Расстояние между мезонными энергетическими уровнями таких мезоатомов намного больше, чем между электронными энергетическими уровнями обычных атомов. Вместо испускаемых и поглощаемых обычными атомами фотонов видимого света мезоатомы испускают и поглощают фотоны рентгеновских лучей.

Мюон является нестабильной частицей, превращающейся в электрон спустя примерно 2,2 с. Однако по субатомным меркам 2,2 с — это довольно долго, поэтому в этом плане мюон не очень-то и отличается от абсолютно стабильного электрона.

В общем, мюон — это не что иное, как «тяжелый электрон». Но почему тяжелый электрон настолько тяжелее обычного, да и почему он вообще существует, до сих пор неясно.

Пион

Хотя мюон и не оказался частицей Юкавы, ее все равно нужно было продолжать искать. В 1947 году английский физик Сесил Пауэлл (1903—1969) поместил в Андах (Боливия) фотопластинки и с их помощью обнаружил среди космических лучей следы мезонов. Эти мезоны были намного тяжелее мезонов Андерсона: их масса была в 273 раза больше массы электрона. Почти как у юкавских частиц.

Оказалось, что они активно взаимодействуют с атомными ядрами, как и должны себя вести юкавские частицы. Частица нового мезона несла положительный заряд, а античастица — отрицательный, как и частицы Юкавы. В конце концов удалось обнаружить и нейтральную разновидность этого мезона, масса которой была чуть ниже массы заряженных частиц (масса незаряженного мезона в 264 раза больше массы электрона).

Новый мезон получил название *пи-мезон*, или *пион*. Пион — это и есть та самая частица обмена, о которой говорил Юкава. Нейтроны и протоны состоят из облаков пионов, что было доказано в 1950-х годах Робертом Хофстедтером. Для этого ученый провел бомбардировку нейтронов и протонов электронами, разогнанными в линейном ускорителе до 600 Мэв. Рассеиваясь, электроны проходили сквозь протон, пробывая внешнее облако пионов¹.

Спин пионов отличается от спина других частиц. Значение спина большинства частиц, о которых мы говорили выше, — нейтрино, электрона, мюона, протона и нейтрона, а также их античастиц — равно $\frac{1}{2}$. Частицы с таким нецелочисленным спином ведут себя согласно *статистике Ферми—Дирака* (математическому анализу, проведенному Ферми и Дираком), почему и получили общее название *фермионы*. Главное отличительное свойство всех фермионов — подчинение правилу запрета (см. гл. 5).

Спин фотона равен 1, а гравитона — 2. Эти и другие частицы с целочисленным спином, включая атомные ядра ряда элементов, ведут себя согласно *статистике Бозе—Эйнштейна*, разработанной Эйнштейном и индийским физиком Бозе (1904—1974). Такие частицы называются *бозонами*. Бозоны не подчиняются принципу запрета.

¹ Подобные открытия заставляют задуматься, какие же из субатомных частиц являются *элементарными*, то есть не состоящими из еще более мелких и простых частиц. Да и существуют ли такие частицы вообще? Справедливо ли термин «элементарные частицы»? В настоящий момент физики не могут дать ответа на эти вопросы.

Из всех открытых частиц первыми отдельными частицами, спин которых равнялся 0, и первыми бозонами, обладающими массой, стали пионы.

Легкость, с которой пион вступает в реакцию с ядерными частицами, — яркий пример *сильного взаимодействия реакции*, характеризующегося высокой скоростью ее протекания. Двигущийся практически со скоростью света пион находится в непосредственной близости от протона или нейтрона всего 10^{-22} с, однако этого времени вполне достаточно для сильного взаимодействия. Именно сильное взаимодействие удерживает микрочастицы внутри ядра, вопреки силам электромагнитного отталкивания.

Впрочем, существует и другой тип взаимодействия субатомных частиц, для начала которого необходимо гораздо больше времени — не менее одной стомиллионной доли секунды. Радиус такого *слабого взаимодействия*, как и сильного, очень мал, однако его интенсивность в триллион раз ниже интенсивности сильного взаимодействия. Хотя интенсивность слабого взаимодействия и ниже электромагнитного в 10 млрд раз, оно все равно гораздо сильнее гравитационной силы, которая считается самой слабой силой в природе.

Раз пионы являются частицами обмена при сильном взаимодействии, у слабого взаимодействия также должны быть свои частицы обмена. Такая «слабая частица обмена» (обозначается ν) должна быть еще более неуловимой, чем пион и фотон, но менее неуловимой, чем гравитон. Она должна быть бозоном, масса которого больше протона, но меньше пиона. Поэтому такую частицу и называют иногда *средним бозоном*. По некоторым данным, эту частицу удалось обнаружить, но информация еще не проверена.

Протон, антипротон, положительный пион и отрицательный пион могут вступать в следующие четыре вида взаимодействий: сильные, слабые, электромагнитные и гравитационные. Не обладающие электрическим зарядом нейтрон, антинейтрон и нейтральный пион не вступают лишь в электромагнитные взаимодействия, а электрон, позитрон, положительный мюон и отрицательный пион не вступают в сильные взаимодействия.

Больше всего в этом отношении «не повезло» нейтрино и антинейтрино. Они не вступают в сильные взаимодействия; они не обладают электрическим зарядом, поэтому не вступают в электромагнитные взаимодействия; не обладая массой, они не вступают в гравитационные взаимодействия. Нейтрино и антинейтрино вступают лишь в слабые взаимодействия. Поэтому появление в

ходе распада частицы нейтрино или антинейтрино является верным признаком слабого взаимодействия. Слабым взаимодействием является, например, распад нейтрона.

Период полураспада свободного положительного или отрицательного пиона равен одной двадцатипятимиллиардной секунды, то есть образовавшиеся свободные пионы тут же распадаются на мюоны и нейтрино. Обозначив пионы как π , а мюоны как μ (греческая «мю»), запишем формулу распада положительного и отрицательного пионов:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu^0, \quad (\text{Уравнение 14.5})$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}^0. \quad (\text{Уравнение 14.6})$$

Вначале физики предположили, что масса образующегося в ходе распада пиона нейтрино должна быть гораздо больше массы обычного нейтрино и, возможно, в 100 раз больше массы электрона. Какое-то время они называли такой нейтрино *мю-мезонным*, однако в ходе последующих исследований выяснилось, что продукт распада пиона является безмассовым нейтрино.

Что касается мюона, он является не только «тяжелым электроном», но полноправным членом семейства электронов. Поэтому отрицательному мюону можно присвоить электронное число +1, как у электрона, а положительному мюону электронное число -1, как у позитрона.

Тогда общее электронное число образующихся по формуле 14.5 положительного мюона (-1) и нейтрино (+1) равно 0, что совпадает с электронным числом исходного пиона (пион не является членом семейства электронов, поэтому его электронное число равно 0). Точно так же образование по формуле 14.6 отрицательного мюона (+1) требует образования и антинейтрино (-1), так как общее электронное число равно 0.

Трудность вызывает процесс распада мюона. Мюон распадается на электрон и два нейтрино. Если электронное число сохраняется, то один из нейтрино должен быть антинейтрино. Распад отрицательного мюона можно записать так:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu^0 + \bar{\nu}^0. \quad (\text{Уравнение 14.7})$$

Электронное число отрицательного мюона равно +1. Общее электронное число продуктов распада равно +1 (электрон -1, нейтрино +1 и антинейтрино -1). Электронное число сохраняется.

Но почему же тогда нейтрино и антинейтрино в некоторых случаях аннигилируют друг друга, превращаясь в энергию, а в других случаях происходит соединение частицы и античастицы? Если это так, то, возможно, в некоторых случаях мюон распадается только на электрон, а оставшаяся масса переходит в фотоны?

Впрочем, такого не наблюдается, и физики пришли к выводу, что образующиеся в процессе распада мюона нейтрино и антинейтрино не являются противоположными друг другу частицами. Возможно ли, что нейтрино образуется в связи с мюоном, а антинейтрино в связи с электроном и что мюоны и электроны образуют различные типы нейтрино?

В 1962 году это удалось проверить следующим способом. Пучок электронов очень высокой энергии направили на атомы бериллия, и в результате столкновения образовался поток интенсивных пионов. Пионы моментально распадались на мюоны и нейтрино, а затем все эти частицы ударялись о лист брони 13,5 м толщиной. Лист останавливал все частицы, за исключением нейтрино. Те свободно проходили сквозь броню внутрь детектора, где они вступали во взаимодействие с нейтроном, образуя протон и электрон или же отрицательный мюон.

Если существует лишь один тип нейтрино, то в процессе его распада отрицательные мюоны и электроны должны образовываться в равных количествах:

$$\nu^{\mu} + n^0 \rightarrow p^{-} + e^{-}, \quad (\text{Уравнение 14.8})$$

$$\nu^{\mu} + n^0 \rightarrow p^{+} + \mu^{-}. \quad (\text{Уравнение 14.9})$$

Как видите, и в том и в другом случае барионное число сохраняется. Сохраняется и электронное число, так как и электронное число исходного нейтрино, и электронные числа образующихся электрона и отрицательного мюона равны +1. Во время субатомных взаимодействий все, что может произойти, происходит, поэтому физики и были уверены, что если существует лишь один тип нейтрино, то мюоны и электроны будут образовываться в равных количествах.

Как бы не так! Образовывались лишь отрицательные мюоны.

Это означало, что нейтрино, образующиеся в результате распада пионов на мюоны и нейтрино, являются *мюон-нейтрино*, особой разновидностью нейтрино, которое может образовывать только мюоны, но никак не электроны. Аналогично обычные нейтрино, образующиеся в связи с электронами и позитронами, являются *электрон-нейтрино*, и они могут образовывать только электроны или позитроны, но никак не мюоны.

Обозначив мюон-нейтрино как $\bar{\nu}_\mu^0$, а электрон-нейтрино как ν_e^0 , перепишем формулы 14.1—14.6 следующим образом:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e^0, \quad (\text{Уравнение 14.10})$$

$$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e^0, \quad (\text{Уравнение 14.11})$$

$$e^- + e^+ \rightarrow \nu_e^0 + \bar{\nu}_e^0, \quad (\text{Уравнение 14.12})$$

$$\bar{\nu}_e^0 + p^+ \rightarrow e^+ + n^0, \quad (\text{Уравнение 14.13})$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu^0, \quad (\text{Уравнение 14.14})$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu^0. \quad (\text{Уравнение 14.15})$$

В формулах 14.10—14.13 электронное число сохраняется. В формулах 14.14 и 14.15 вступает в силу закон сохранения мюонного числа. Мюонное число отрицательного мюона и мюон-нейтрино равны +1, а положительного мюона и мюон-антинейтрино равны -1. Как видите, в формулах 14.14 и 14.15 мюонное число до, и после распада пиона равно 0.

Формула 14.7 описывает взаимодействие с участием и электронов, и мюонов. Мы можем переписать ее как:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu^0 + \bar{\nu}_e^0. \quad (\text{Уравнение 14.16})$$

В результате такого взаимодействия мюонное число сохраняется: мюонное число исходного отрицательного мюона и образующегося мюон-нейтрино равно +1. Кроме того, сохраняется и электронное число: среди исходных элементов членов семейства электронов нет, поэтому электронное число равно 0, а среди образующихся продуктов есть электрон (электронное число +1) и электрон-антинейтрино (электронное число -1), и их общее электронное число равно 0.

Точно так же распад положительного мюона будет выглядеть следующим образом:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu^0 + \nu_e^0. \quad (\text{Уравнение 14.17})$$

В результате распада положительного мюона образуются позитрон, электрон-нейтрино и мюон-антинейтрино.

В ходе распада отрицательного или положительного мюона не происходит взаимной аннигиляции нейтрино и антинейтрино, так как они не являются античастицами. Взаимная анни-

гиляции приведет к нарушению законов сохранения электронного и мюонного чисел.

И электрон-нейтрино, и мюон-нейтрино являются безмассовыми незаряженными частицами со спином $1/2$. До сих пор остается загадкой, чем же они отличаются друг от друга.

Рубеж

Были открыты и другие частицы, первая из которых была обнаружена в 1947 году. Все эти частицы, за исключением мюон-нейтрино (его существование не столько открыли, сколько осознали), являются тяжелыми нестабильными частицами и вступают в сильные взаимодействия.

Так, были открыты *K-мезоны*, или *каоны*, — целая группа частиц, масса которых в 996,5 раза больше массы электрона, то есть приблизительно равна среднему значению массы протона и пиона. Как и пионы, каоны имеют спин, равный 0, и являются бозонами, также существует положительный каон, являющийся частицей, и отрицательный, являющийся античастицей. Есть еще и чуть менее устойчивый — нейтральный каон, масса которого чуть ниже массы заряженного каона. Однако в отличие от пионов нейтральный каон не является собственной античастицей: существует нейтральный каон и нейтральный антикаон.

Были также открыты и более тяжелые, чем протоны и нейтроны, частицы. Все они делятся на три группы, получившие названия по трем буквам греческого алфавита: лямбда, сигма и кси.

В группе лямбда одна частица (нейтральная), в группе сигма — три частицы (положительная, отрицательная и нейтральная), и в группе кси — еще две частицы (отрицательная и нейтральная). У каждой частицы есть античастица. Масса частицы группы лямбда в 2182 раза больше массы электрона (то есть 1,18 от массы протона). Масса частиц группы сигма больше массы протона — примерно в 1,27 раза, а масса частиц группы кси еще больше массы протона — в 1,40 раза. Общее название всех этих частиц *гипероны* (от греческого «выше», так как их масса выше массы протона). Все гипероны являются фермионами.

Как и мюоны, которые могут замещать электроны внутри атома и образовывать мезоатомы, лямбда-гипероны могут замещать частицу внутри атомного ядра и образовывать короткоживущее *гиперядро*.

В 1960-х годах было обнаружено несколько крайне короткоживущих частиц, период распада которых равнялся всего

10^{-21} . Это — *резонансные частицы*. Пока неясно, являются ли они отдельными частицами. Возможно, это всего лишь кратковременные соединения двух и более частиц.

Огромное количество обнаруженных частиц привело физиков в замешательство, так как было очень сложно расположить их по порядку. Требовались новые законы поведения частиц.

Например, несмотря на то, что условия образования гиперонов свидетельствуют о том, что они являются частицами сильного взаимодействия, и несмотря на то, что продукты их распада также являются частицами сильного взаимодействия, тем не менее распад гиперона идет нехарактерно медленно. Распад, например, лямбда-гиперона можно представить в виде:



где λ (греческая заглавная «лямбда») обозначает лямбда-гиперон. В ходе этой реакции соблюдаются все известные законы сохранения. Сохраняется, например, спин, так как спин пиона равен 0. Сохраняется и барионное число, а гипероны являются барионами. (В данном случае пион не является членом ни одного из участвующих в реакции семейств частиц, числа которых сохраняются, поэтому он может совершенно свободно появляться и исчезать, не нарушая законов сохранения.) Так как по всем признакам описанное формулой 14.18 взаимодействие является сильным, оно должно происходить не более чем за 10^{-24} с (или около того). Однако взаимодействие длится в течение $2,5 \times 10^{-10}$ с, что в 10 трлн раз дольше, чем должно быть, — невероятно долго по субатомным меркам.

Объяснение этому в 1953 году предложили независимо друг от друга два физика — американец Марри Гелл-Ман и японец Кацухико Нисидзима. Они предложили новую сохраняющуюся величину, которую Гелл-Ман назвал *странность*.

Странность всех членов электронной и мюонной семей, а также пионов, нуклонов и их античастиц равна 0. Все остальные частицы, странность которых не равна 0, имеют общее название «*странные частицы*». Странность каона равна +1; лямбда-гиперона и сигма-гиперона —1; а кси-гиперона —2. Их античастицы имеют конечно же противоположное значение числа странности.

Значения странности не были присвоены частицам произвольно, они вычислялись экспериментальным путем. Если странность исходной частицы равна нулю, то при ее распаде до частицы со странностью +1 обязательно должна образовы-

ваться и частица с числом странности -1 . В этом случае странность сохраняется.

В описанном формулой 14.18 случае распада лямбда-гиперона (число странности -1) до протона (0) и пиона (0) странность не сохраняется, значит, такая реакция идти не может.

Однако закон сохранения странности распространяется только на сильные взаимодействия. Значит, распад лямбда-гиперона может иметь место, но только в результате слабого взаимодействия, для которого требуется гораздо больше времени. Поэтому, несмотря на все внешние признаки, формула 14.18 описывает все же слабое взаимодействие, что и объясняет долгий период полураспада лямбда-частицы.

Были обнаружены ограничения и у более старого закона сохранения четности.

Четность является величиной, которая сохраняется точно так же, как в мире цифр сохраняется четность/нечетность. Если четное число, например 8, представить в виде суммы двух меньших чисел, например $6 + 2$ или $5 + 3$, то оба этих числа будут либо четными, либо нечетными. Если в виде суммы двух меньших чисел представить нечетное число, например 7, то одно из них всегда будет четным, а второе — нечетным. Это же правило относится и к более сложным преобразованиям.

В 1956 году было обнаружено, что некоторые каоны распадаются на два пиона, а некоторые — на три. Так как пионам присвоена отрицательная четность, то два пиона являются четными, а три пиона — нечетными. Это означало, что существуют каоны с положительной четностью и каоны с отрицательной четностью.

Однако каоны отличались лишь способом распада, в то время как все остальные их свойства были абсолютно идентичны. Изучая эту проблему, два китайских физика Ли Цзундао и Ян Чжэньнин с теоретической точки зрения объяснили, почему четность должна сохраняться лишь при сильных взаимодействиях, а при слабых ею можно пренебречь.

Существовала возможность проверить это. Уже в 1927 году Эуген Вигнер, изучив проблему, доказал, что сохранение четности означало отсутствие различий между левым и правым, или (что тоже самое) между ситуацией и ее зеркальным отражением. Этого можно достичь только в том случае, если все взаимодействия будут происходить симметрично в пространстве. Например, если ядро испускает электроны, оно должно испускать их во все стороны, чтобы зеркальное отражение было неотличимо от реальности. Если же электроны испускают преимущественно в одну сторону (скажем, влево), то при зер-

кальном отражении они будут испускаться преимущественно вправо, и реальность можно будет отличить от ее зеркального отражения.

Китайский физик Ву Цзяньсюн проверила теорию Ли Яна, используя для этого кобальт-60. Кобальт-60 во время слабого взаимодействия отдает электроны. Ву Цзяньсюн охладила кобальт-60 практически до абсолютного нуля, после чего подвергла его действию магнитного поля. В результате этого все ядра кобальта повернулись северными магнитными полюсами в одну сторону, а южными в другую. При температуре около абсолютного нуля ядрам не хватало энергии для того, чтобы противостоять выравниванию.

Оказалось, что электроны вовсе не испускаются во всех направлениях. Из южного магнитного полюса вылетало гораздо больше электронов, чем из северного. Эту ситуацию можно отличить от ее зеркального отражения, значит, закон сохранения четности применительно к слабым взаимодействиям не работает.

Соответственно в случае слабого взаимодействия каон вполне может иметь то положительную, то отрицательную четность.

Более общий закон сохранения совмещает четность и *зарядовое сопряжение* — величину, определяющую взаимообмен частиц и античастиц. Это значит, что изменение четности ведет к соответствующим изменениям в связи с античастицами. Так, антивещество кобальта-60 будет испускать позитроны, причем преимущественно с северного магнитного полюса. При сильном взаимодействии четность и зарядовое сопряжение сохраняются раздельно, а при слабом — вместе.

Гелл-Ман развил свою теорию, и в 1961 году он (и независимо от него израильский физик Юваль Неэман) организовал десятки частиц сильного взаимодействия по восьми сохраняющимся при сильном взаимодействии свойствам. Обосновав свою теорию с точки зрения теории групп (раздел высшей математики), назвал ее *восьмеричный путь*.

Например, работая с *дельта-гиперонами* (еще одна группа частиц с зарядами -1 , 0 , $+1$ и $+2$), Гелл-Ман поместил их под более тяжелыми сигма-гиперонами (заряды -1 , 0 и $+1$), а над сигма-гиперонами — более тяжелые кси-гипероны (заряды -1 и 0).

По аналогии на вершину образующегося треугольника можно поместить еще более тяжелую частицу с зарядом -1 . Гелл-Ман назвал эту частицу *отрицательным омега-гипероном*, так как омега является последней буквой греческого алфавита. Омега-гиперон обладает уникальными значениями различных сохраняемых

величин, самым необычным из которых является значение странности (-3).

В 1964 году омега-гиперон был обнаружен, причем все его свойства, в том числе и странности, в точности совпадали с предсказанными. По своей значимости это открытие не уступает обнаружению элементов, существование которых было предсказано Менделеевым.

Именно на этом рубеже и находится сейчас физика — рубеже мира субатомных частиц, превратившемся за последние десятилетия в джунгли загадочных явлений. Возможно, если подобрать ко всем этим загадкам правильные отгадки, перед нами откроется разгадка всех физических тайн Вселенной.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|---|
| Предисловие переводчика | 5 |
| Таблицы перевода различных величин | 6 |

Часть первая ДВИЖЕНИЕ, ЗВУК И ТЕПЛОТА

| | |
|---|-----|
| <i>Глава 1. ПОИСК ЗНАНИЯ</i> | |
| От философии к физике | 9 |
| Представление греков о движении | 11 |
| Недостатки в теории | 15 |
| <i>Глава 2. ПАДЕНИЕ ТЕЛ</i> | |
| Наклонные плоскости | 19 |
| Ускорение | 23 |
| Свободное падение | 28 |
| <i>Глава 3. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ</i> | |
| Инерция | 33 |
| Силы и векторы | 36 |
| Масса | 41 |
| Взаимодействие тел | 45 |
| <i>Глава 4. ТЯГОТЕНИЕ</i> | |
| Комбинация сил | 48 |
| Движение Луны | 52 |
| Гравитационная постоянная | 59 |
| <i>Глава 5. ВЕС</i> | |
| Форма Земли | 64 |
| Вне Земли | 69 |
| Вторая космическая скорость | 73 |
| <i>Глава 6. МОМЕНТ</i> | |
| Импульс | 77 |
| Закон сохранения (импульса) количества движения | 79 |
| Вращательное движение | 85 |
| Крутящий момент | 89 |
| Сохранение углового количества движения | 94 |
| <i>Глава 7. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ</i> | |
| Рычаг | 97 |
| Умножение силы | 103 |
| Механическая энергия | 108 |
| Сохранение энергии | 113 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Глава 8. ВИБРАЦИЯ | |
| Гармонические колебания | 116 |
| Период колебаний | 119 |
| Маятник | 124 |
| Глава 9. ЖИДКОСТИ | |
| Давление | 131 |
| Плавучесть | 136 |
| Когезия и адгезия | 142 |
| Вязкость | 149 |
| Глава 10. ГАЗЫ | |
| Плотность | 153 |
| Давление в газах | 156 |
| Закон Бойля | 163 |
| Глава 11. ЗВУК | |
| Волны в жидкостях | 168 |
| Звуковые волны | 175 |
| Громкость звука | 180 |
| Глава 12. ВЫСОТА ТОНА | |
| Скорость звука | 184 |
| Музыкальная шкала | 189 |
| Преобразование звука | 197 |
| Отражение звука | 202 |
| Глава 13. ТЕМПЕРАТУРА | |
| Тепло и холод | 206 |
| Температурные шкалы | 211 |
| Расширение тел | 214 |
| Абсолютная температура | 219 |
| Глава 14. ТЕПЛОТА | |
| Кинетическая теория газов | 223 |
| Диффузия | 231 |
| Реальные газы | 235 |
| Удельная теплоемкость | 241 |
| Латентная (скрытая) теплота | 245 |
| Глава 15. ТЕРМОДИНАМИКА | |
| Тепловой поток | 249 |
| Второй закон термодинамики | 256 |
| Энтропия | 260 |
| Беспорядок | 265 |

Часть вторая

СВЕТ, МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

| | |
|----------------------------------|-----|
| Глава 1. МЕХАНИЗМ | |
| Ньютоновское представление | 273 |
| Воздействие на расстоянии | 275 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| <i>Глава 2. СВЕТ</i> | |
| Передача | 278 |
| Отражение | 284 |
| Кривые зеркала | 287 |
| Преломление | 295 |
| <i>Глава 3. ЛИНЗЫ</i> | |
| Передача фокуса | 300 |
| Очки | 304 |
| Камеры | 309 |
| Увеличение | 313 |
| Микроскопы и телескопы | 317 |
| <i>Глава 4. ЦВЕТ</i> | |
| Спектр | 321 |
| Отражающие телескопы | 326 |
| Линии спектра | 329 |
| Дифракция | 332 |
| <i>Глава 5. СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ</i> | |
| Интерференция | 337 |
| Скорость света | 342 |
| Эффект Допплера—Физо | 347 |
| Поляризованный свет | 351 |
| <i>Глава 6. ЭФИР</i> | |
| Абсолютное движение | 357 |
| Эксперимент Михельсона—Морли | 363 |
| Сокращение Фитцджеральда | 368 |
| <i>Глава 7. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ</i> | |
| Специальная теория | 372 |
| Равнозначность массы и энергии | 378 |
| Относительность времени | 383 |
| Общая теория | 389 |
| Гравитация | 391 |
| <i>Глава 8. КВАНТЫ</i> | |
| Излучение черного тела | 396 |
| Постоянная Планка | 399 |
| Фотоэлектрический эффект | 404 |
| Фотоны | 407 |
| <i>Глава 9. МАГНЕТИЗМ</i> | |
| Магнитные полюса | 411 |
| Магнитные области | 416 |
| Земля как магнит | 420 |
| Магнитное поле | 423 |
| <i>Глава 10. ЭЛЕКТРОСТАТИКА</i> | |
| Электрический заряд | 429 |
| Электрон | 434 |
| Электродвижущая сила | 438 |
| Конденсаторы | 442 |

| | |
|---|-----|
| Глава 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ | |
| Непрерывный поток электронов | 448 |
| Химические элементы питания | 452 |
| Сопротивление | 455 |
| Электроэнергия | 460 |
| Цели | 463 |
| Батарей | 469 |
| Глава 12. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ | |
| Опыт Эрстеда | 473 |
| Применение электромагнетизма | 478 |
| Измерение электрического тока | 484 |
| Генераторы | 487 |
| Глава 13. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК | |
| Якорь | 491 |
| Полное сопротивление, импеданс | 495 |
| Трансформаторы | 500 |
| Электромоторы | 503 |
| Глава 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ | |
| Уравнения Максвелла | 507 |

Часть третья ЭЛЕКТРОН, ПРОТОН И НЕЙТРОН

| | | |
|--|--|-----|
| Глава 1. АТОМ | | 511 |
| Происхождение атомизма | | 512 |
| Химические элементы | | 514 |
| Современная атомистическая теория | | 517 |
| Периодическая таблица | | 522 |
| Существование атомов | | 527 |
| Глава 2. ИОНЫ И ИЗЛУЧЕНИЕ | | |
| Электролиз | | 531 |
| Электрические частицы | | 534 |
| Спектр излучения | | 538 |
| Глава 3. ЭЛЕКТРОН | | |
| Открытие электрона | | 542 |
| Заряд электрона | | 545 |
| Электроника | | 547 |
| Радио | | 549 |
| Телевидение и радиолокация | | 552 |
| Глава 4. ЭЛЕКТРОНЫ В АТОМАХ | | |
| Фотоэлектрический эффект | | 557 |
| Атомное ядро | | 560 |
| Особенности рентгеновского излучения | | 563 |
| Атомные числа | | 566 |
| Электронные оболочки | | 568 |

Глава 5. ЭЛЕКТРОНЫ И КВАНТЫ

| | |
|----------------------------|-----|
| Спектральный ряд | 572 |
| Атом Бора | 576 |
| Электронные оболочки | 580 |
| Переходные элементы | 583 |

Глава 6. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ

| | |
|------------------------------------|-----|
| Полупроводники | 588 |
| Полупроводниковые устройства | 591 |
| Мазеры и лазеры | 595 |
| Материальные волны | 598 |

Глава 7. РАДИОАКТИВНОСТЬ

| | |
|------------------------------------|-----|
| Уран | 605 |
| Альфа-частицы | 608 |
| Обнаружение частиц | 611 |
| Нейтрон | 614 |
| Новые радиоактивные элементы | 617 |

Глава 8. ИЗОТОПЫ

| | |
|---------------------------|-----|
| Атомные превращения | 619 |
| Радиоактивные ряды | 623 |
| Период полураспада | 628 |
| Стабильные изотопы | 632 |

Глава 9. ЯДЕРНАЯ ХИМИЯ

| | |
|---------------------------------|-----|
| Массовое число | 638 |
| Радиоактивное датирование | 642 |
| Ядерные реакции | 644 |
| Электронвольт | 648 |
| Ускорители частиц | 650 |

Глава 10. ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

| | |
|---|-----|
| Радионуклиды | 654 |
| Использование изотопов в биохимии | 656 |
| Единицы радиоактивности | 660 |
| Бомбардировка нейтронами | 663 |
| Синтетические элементы | 666 |

Глава 11. СТРУКТУРА ЯДРА

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Нуклоны, четность и нечетность | 671 |
| Коэффициент уменьшения массы | 676 |
| Ядерная энергия | 680 |
| Деление ядра | 683 |

Глава 12. ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

| | |
|----------------------------|-----|
| Уран-235 | 686 |
| Атомный котел | 689 |
| Атомный век | 693 |
| Ядерный синтез | 697 |
| Лучевая болезнь | 700 |
| Термоядерная энергия | 704 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| Глава 13. АНТИЧАСТИЦЫ | |
| Космические лучи | 707 |
| Позитрон | 711 |
| Аннигиляция вещества | 715 |
| Антибарион | 718 |
| Антивещество | 721 |
| Глава 14. ПРОЧИЕ ЧАСТИЦЫ | |
| Нейтрино | 724 |
| Взаимодействие нейтрино | 728 |
| Мюон | 732 |
| Пион | 737 |
| Рубеж | 742 |

Научно-популярное издание

Айзек Азимов

ПОПУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

*От архимедова рычага
до квантовой механики*

Ответственные редактор *Ю.И. Щенная*

Художественный редактор *И.А. Озеров*

Технический редактор *Н.В. Травкина*

Корректоры *О.А. Левина, М.Г. Смирнова*

Подписано в печать с готовых диапозитивов 21.02.2006

Формат 60х90^{1/8} Вязема газетная. Гарнитура «Таймс»

Печать офсетная. Усл. печ. л. 47. Уч.-изд. л. 46,69

Тираж 6 000 экз. Заказ № 1189

ЗАО «Центриумграф»
125047, Москва, Оружейный пер., д. 15, стр. 3,
пом. ТАРП ЦАО

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов
в ОАО «ИПК «Ульяновский Дом печати»
412900, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14