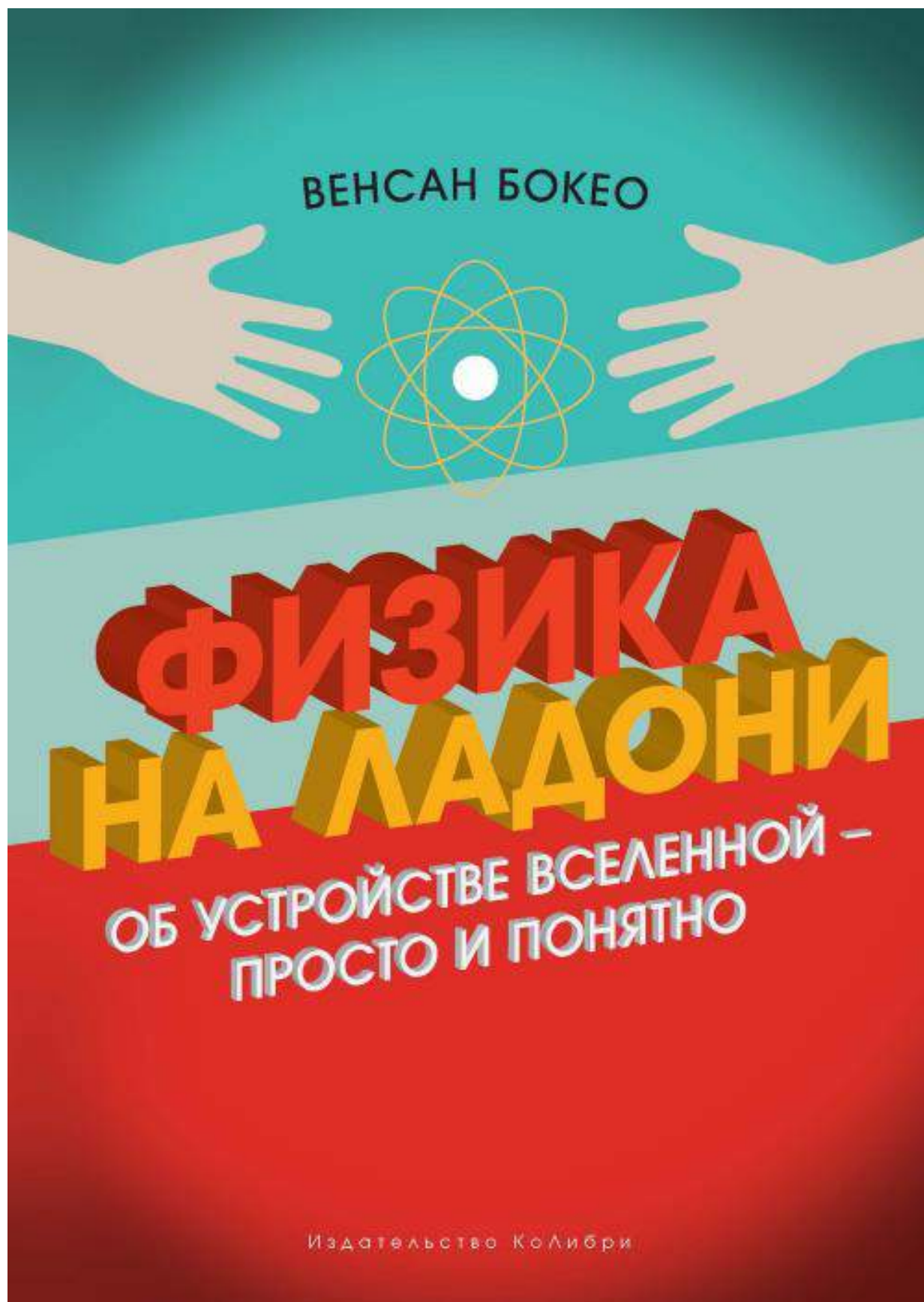


Венсан Бокео
Физика на ладони. Об устройстве Вселенной – просто и
понятно



«Физика на ладони. Об устройстве Вселенной – просто и понятно»: КоЛибри,
Азбука-Аттикус; Москва; 2018
ISBN 978-5-389-14907-6

Аннотация

Человечество каждый день на протяжении тысячелетий сталкивается с простыми и сложными вопросами: что такое материя и свет? Откуда берется электричество и что скрывается за таинственным словом «магнетизм»? В поисках ответов физика сделала великие открытия. Все, что нас окружает, – выражение четырех основных сил, управляющих всем во Вселенной, от бесконечно малого до бесконечно большого.

«Здесь представлен обзор большинства физических понятий, начиная со школьной программы (электричество, механика) до третьего курса университета (квантовая физика, теория относительности, ядерная физика). В то же время все разделы начинаются с азов, и чтение не требует специальной предварительной подготовки. Поэтому наша книга наверняка заинтересует и студента, и школьника старших классов, которым захочется закрепить полученные знания с помощью более общего и менее вычислительного взгляда на физику. Но она также пригодится каждому любознательному человеку, желающему понять суть и истоки повседневных явлений природы.

Обнаружить волшебное единство Вселенной за ее внешним разнообразием – ни с чем не сравнимое удовольствие. Мы надеемся, что эта книга сумеет пробудить в читателе стремление одним взглядом охватить всё...» (Венсан Бокео)

Венсан Бокео

Физика на ладони. Об устройстве Вселенной – просто и понятно

Vincent Boqueho
TOUTE LA PHYSIQUE À PORTÉE DE MAIN

© Dunod, 2010, 2013, 2016

© Чуракова О., перевод на русский язык, 2018

© Издание на русском языке, оформление. ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус», 2018 КоЛибри®

Посвящается моему отцу

Предисловие

Цель этой книги – представить законы природы в их совокупности и с их помощью объяснить большую часть явлений окружающего мира. Мы рассматриваем вопросы от самых наивных (почему мы не проваливаемся сквозь землю) до самых сложных (почему, для того чтобы освещать и согревать нас, Солнцу достаточно водорода), раскрываем суть природных явлений (почему небо и море синие), рассказываем и о творениях самого человечества (к примеру, как создается электричество и как благодаря ему работают транзисторы наших компьютеров).

Изучив эти явления во всех подробностях, мы убедимся, что в их основе – одни и те же фундаментальные причины и один и то же закон может дать ответ на все перечисленные

вопросы. Когда мы задумаемся о том, что лежит в основе всех этих явлений, природа, словно по волшебству, внезапно предстанет перед нами единым целым.

Нам хотелось показать вам эти почти невидимые связи, ставшие предметом исследования разных физических дисциплин, границы которых весьма условны: механики, термодинамики, электричества и магнетизма, оптики, квантовой физики и теории относительности...

Мы сами поставили перед собой, казалось бы, утопическую задачу – выстроить большинство окружающих нас явлений в единую линию, чтобы понятно их описать. К концу книги эта линия будет вычерчена, и в заключении мы подведем итоги нашего пути.

Постоянное обращение к первопричинам явлений требует, чтобы мы использовали прежде всего физические, а не математические термины. Математика необходима физике, чтобы наглядно продемонстрировать результат, но она порой заставляет забыть о реальном мире, который должна описывать. Конечно, всегда можно отложить карандаш и вспомнить о первоначальных физических причинах, из которых вытекает этот самый полученный результат. Однако все возможно объяснить и без математики, хотя этим порой пренебрегают...

Таким образом, основным правилом этой книги будет следующее: объяснять все процессы, происходящие в окружающем мире, вплоть до самых сложных, без использования математики. То есть мы будем придерживаться элементарных математических понятий, которые, как мы полагаем, знакомы читателю: речь идет о простых математических действиях (сложение, умножение, возведение в степень, извлечение корня...). Мы также используем понятие вектора, но только для наглядного изображения в схемах: никаких специальных знаний для этого не потребуется. Таких понятий, как производная, мы будем старательно избегать.

Таким образом, рассуждения в этой книге призваны не просто продемонстрировать, а объяснить «на пальцах» глубинные причины физических явлений. Наша цель – показать, что таким простым способом можно понять действующие механизмы, не прибегая к сложным математическим вычислениям.

Рассуждения о физических процессах в некоторых областях довольно сложны и требуют сосредоточенности. Для того чтобы это не задерживало чтение книги, самые сложные умозаключения мы вынесли в рамки (со значком ): только там мы позволим себе использовать математику в самой элементарной форме. Тем более что для читателей с математическим складом ума простое уравнение будет яснее и понятнее, чем длинные рассуждения... В других рамках (со значком ) поясняются конкретные вопросы, приводятся исторические факты и известные применения описанного закона.

Читатель может не обращать внимания на эти вставки, чтобы не терять нить повествования: нужно будет принять некоторые выводы, но это не мешает понять физические процессы, описанные в следующих главах.

Так ли необходимо прочесть все от начала и до конца? Разумеется, эта книга логически структурирована и интереснее будет следовать за нитью Ариадны. Однако если читатель уже обладает какими-то познаниями в физике, он может сразу перейти к главе, которая его интересует.

Кому же в итоге предназначена эта книга? Здесь представлен обзор большинства физических понятий, начиная со школьной программы (электричество, механика) до третьего курса университета (квантовая физика, теория относительности, ядерная физика). В то же время все разделы начинаются с азов, и чтение не требует специальной предварительной подготовки.

Так что эта книга заинтересует и студента, и школьника старших классов, которым захочется закрепить полученные знания с помощью более общего и менее вычислительного взгляда на физику. Но она также пригодится каждому любознательному человеку, желающему понять суть и истоки повседневных явлений природы.

Обнаружить волшебное единство Вселенной за ее внешним разнообразием – ни с чем

не сравнимое удовольствие. Мы надеемся, что эта книга сумеет пробудить в читателе стремление одним взглядом охватить ВСЁ...

Пролог: введение в физику

1. К какому виду принадлежит физик?

Что такое физика

Целью физики является ни больше ни меньше как определение фундаментальных законов, которые управляют Вселенной и ее развитием: знание прошлого, понимание настоящего, предвидение будущего. Помимо открытия механизмов, действующих в природе, именно физика обеспечила стремительный технический прогресс, который продолжается и сегодня: автомобили и самолеты, телевизоры и холодильники, компьютеры и музыкальные центры, различные промышленные машины, которые шьют одежду и производят бетонные блоки для наших домов...

Физика дает ответ на самые простодушные наши вопросы: что такое материя? Что такое свет? Почему мы, как и свет, не можем проходить сквозь стену, а звук может? Почему все вокруг окрашено в разные цвета, почему небо голубое? Почему Земля круглая и почему она вертится? Что скрывается за словом «магнетизм», что такое электричество и молния?

Сила физики, ее поистине волшебное свойство в том, что ответы на все – абсолютно все! – эти вопросы содержатся в одной-единственной фразе. Эта фраза также описывает все разделы физики, перечисленные выше. Вот как она звучит:

«От мира атомов до целых галактик во Вселенной существует две основополагающие силы – сила гравитации и электромагнитная сила».

Понятно, почему физики-исследователи XXI в. делают основную ставку на объединение этих двух сил: как прекрасно было бы привести все к единой Силе, управляющей Вселенной!

На самом деле существование этих двух сил, которое мы можем лишь констатировать, служит основой того, что мы называем классической физикой. Однако, произнеся фразу о силах Вселенной «от мира атомов до целых галактик...», мы немного схитрили, подразумевая, что это верно для материи любого масштаба. Это неправда!

Если заглянуть внутрь атома, мы обнаружим два новых вида взаимодействия: слабое и сильное. На этом уровне возникает совершенно новая физика, особенности которой на первый взгляд не имеют ничего общего с физикой классической: речь идет о квантовой физике. Законы этого измерения становятся затейливой игрой вероятностей, где даже вопросы «где?» и «когда?» теряют свой смысл.

Означает ли это, что следует различать две разные системы законов – физики квантовой и классической? Нет, потому что квантовая физика *охватывает* и физику классическую, которая является лишь частным случаем первой. Например, согласно квантовым законам, наше тело не имеет четких пространственных пределов. Но эта размытая граница имеет столь малую протяженность, что ее невозможно увидеть под микроскопом.

Именно поэтому не стоит использовать свайный молот (квантовую физику), чтобы убить муху (понять законы Вселенной нашего масштаба). И именно поэтому ответы на все вопросы, которые мы задали в начале этого раздела, мы находим в физике классической.

Разумеется, в данной книге мы позволим себе удовольствие также поговорить и о квантовых законах, потому что они помогают ответить на очень важные дополнительные вопросы: почему мы не светимся в темноте подобно пламени свечи? Откуда берется энергия Солнца? Что такое радиоактивность?..

Тем более что эти законы описывают странный и захватывающий мир – мир, в котором мы живем!

Думать как физик

Думать как физик означает применять научный подход, а именно: наблюдать, моделировать, экспериментировать.

Наблюдать

В отличие от математики задача физики состоит в том, чтобы понять реальность вещей, а не производить абстрактные построения. Таким образом, все начинается с тщательного наблюдения за явлениями вокруг нас.



ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ МАТЕМАТИКА НАУКОЙ?

Математика представляет собой совокупность понятий, развиваемых до бесконечности, которые формируют связную структуру с неоспоримой логикой. Но она остается абстрактной дисциплиной, по своей сути отделенной от реального мира. Ни наблюдений за природными явлениями, ни экспериментов: математика сама по себе не соответствует «научному подходу», который мы выдвинули на передний план.

Зато ее можно назвать набором инструментов, чрезвычайно полезных разным наукам, в частности физике: именно поэтому ее можно назвать научной дисциплиной.

Моделировать

Установление связи между изначально разными явлениями для получения единой синтетической теории – центральный этап физики!

Например, констатировать, что движение Луны по небу или падение яблока с ветки – проявления одного и того же закона, что с первого взгляда вовсе не очевидно. Однако установление этой связи открыло широкое поле для предсказаний, что сегодня позволяет посылать космические зонды на Марс и даже дальше...

Именно на этом этапе физикам так необходим этот исключительно полезный инструмент: математика... Но в данном случае мы предпочтем объяснять суть явлений, не пользуясь математикой. Мы увидим, что множество интересных выводов можно сделать и без нее!

Экспериментировать

Физика не должна наткаться на некоторые подводные камни. Порой абсолютно противоположные теории пытаются объяснить какое-то наблюдение. Какая же из них верна? Чтобы это узнать, необходимо провести опыты, которые проверят предположения этих разных теорий. Подобное «испытание огнем» мучительно для физиков-исследователей, ведь долгие годы напряженного труда могут закончиться вердиктом «не соответствует реальности, следовательно – ложно», который предаст теорию забвению... А искушение отринуть накопившиеся факты так сильно.

Если проведено достаточно опытов, в идеале должна выстроиться единственно правильная теория. Самые горячие споры современной науки касаются областей, где опыты проводить очень сложно – это мир бесконечно большого (астрофизика и космология) и мир бесконечно малого (физика элементарных частиц).



БРИТВА ОККАМА

Иногда две теории могут долго конкурировать друг с другом так, что ни от одной из них невозможно решительно отказаться. То же самое бывает, когда мы не можем решить, какое количество опытов будет достаточным.

История науки свидетельствует, что, как правило, верной оказывается теория, для построения которой использовалось наименьшее количество гипотез, если она подтверждается всеми последующими опытами: это правило «бритвы Оккама», названное так по имени философа Уильяма Оккама, который сформулировал его в XIV в. Другими словами, теория наиболее простая, наиболее «элегантная» является верной.

Самый знаменитый пример – соперничество теории, согласно которой Земля является центром Вселенной, с утверждением Коперника, что Земля вращается вокруг Солнца. По мере того как все новые измерения понемногу кое-что уточняли, традиционную теорию приходилось корректировать вновь и вновь, прибавляя все новые искусственные круги к небесному своду (эпициклы). Коперник же своей простой гипотезой (Земля вращается вокруг Солнца) объяснял все новые измерения с дьявольской точностью. Старая модель рассыпалась в прах, поскольку не могла предсказать новые наблюдения, и сегодня ее нарочитая сложность вызывает улыбку.

Но возможно, сейчас, в начале XXI в., история повторяется: ибо стандартная модель, которая описывает элементарные частицы и их взаимодействие, вынуждена объединять множество частиц, взятых наугад, чтобы соответствовать новым экспериментам. Однако есть такие, кто надеется когда-нибудь увидеть, как бритва Оккама порежет стандартную модель на мелкие куски...

Следует, однако, заметить, что, в отличие от эпохи Коперника, сейчас никакой конкурирующей теории не существует, следовательно, на данный момент стандартная модель является наилучшей.

Пределы физики

Как далеко может проникнуть физика в описании мира? Теоретически фундаментальные законы должны позволить объяснить всю совокупность явлений объективного мира. Но на практике речь уже не идет о физике как таковой, когда изучаемые системы становятся слишком сложными, а связь с фундаментальными законами Вселенной слишком тонкой.

Однако самой сложной из всех систем, по всей вероятности, является человеческое тело, а в более широком смысле – вообще все живое. Здесь начинается биология: ввиду сложности рассматриваемых процессов приходится довольствоваться эмпирической констатацией фактов, весьма далеких от фундаментальных законов природы.

Например, почему такой-то ген, состоящий из таких-то атомов, придает волосам каштановый цвет? Нам это неизвестно, и физике приходится признаться в своем бессилии, даже если в конечном итоге окажется, что причиной всему лишь два основополагающих взаимодействия, упомянутые вначале...

На границах физики и биологии находится химия: недаром все живое по сути лишь комплекс чрезвычайно сложных химических процессов. Химия также оперирует эмпирическими законами: существует множество объемных трудов по химии, которые начинаются таблицами, заполненными чисто экспериментальными величинами...

Химия изучает процессы на микроскопическом уровне: сюда же мало-помалу пытается проникнуть квантовая физика, чтобы понять и предсказать наблюдаемые реакции. Впрочем, химия позиционируется как составная часть «физических наук»¹, разумеется наряду с физикой.

¹ Физические науки – термин, изредка использующийся для обозначения естественных наук, которые не изучают живую природу. (Здесь и далее прим. науч. ред.)

Возвращаясь к биологии, заметим, что процессы, происходящие в мозге, – самые сложные, изучение их пока еще делает свои первые шаги. Например, как происходит переход между объективным и субъективным, то есть между телом и сознанием? Управляют ли нами только законы физики? Эти захватывающие, но пока неразрешимые вопросы открывают путь ко всем остальным дисциплинам: они лежат в основе законов, присущих тому, что мы называем «общественными науками».

Изучение работы мозга и связь с сознанием кажутся абсолютно не относящимися к теме данной книги; однако не исключено, что однажды физика сможет дать ответы на эти вопросы, как в прошлом она ответила на многие вопросы древних философов. А потому в конце вы обнаружите главу, посвященную этой захватывающей науке будущего...

2. Немного об истории наук

Наследие греков

Научный подход не свойствен нам с рождения: древнейшие цивилизации мира – Египет и Месопотамия – не были с ним знакомы, несмотря на свои знания. Люди ограничивались наблюдением за природой и непосредственным использованием результатов своих наблюдений. Например, египтяне видели, что ежегодные разливы Нила делают землю плодородной, но не стремились понять их причину, приписывая все божественному вмешательству.

Именно греки в VII в. до н. э. первыми объединили пристальное наблюдение с желанием понять и создать теорию. Большое преимущество хорошо выстроенной теории – в том, что она открывает новые сферы ее применения без очевидной связи с первоначальными наблюдениями. «Изобретая» научный подход, греки закладывают основу науки, в десять раз увеличивающей возможности инноваций, – физики. В эпоху Возрождения Европа сумеет извлечь из этого пользу...

Греки больше известны как математики (Фалес, Пифагор, Евклид) или как философы (Сократ, Платон, Аристотель), а не физики. Однако в ту эпоху великие мыслители были немного и теми, и другими, и третьими.

Так, в III в. до н. э. Эратосфен не только знал, что Земля круглая, но и с большой точностью вычислил ее окружность (40 000 км) примитивным, но вполне адекватным способом. Если бы спустя 1700 лет Христофор Колумб принял изыскания Эратосфена всерьез, он вряд ли отправился бы на поиски Индии на Запад, полагая, что размеры Земли гораздо меньше. Что уж говорить о некоторых мыслителях Средневековья, считавших, что Земля плоская...

Однако самым знаменитым греческим ученым-физиком остается Архимед (III в. до н. э.) с его открытием соотношения между объемом вытесненной жидкости и погруженного в нее тела.

По прошествии этого благоприятного периода римляне используют накопленные знания, однако сами научных талантов не проявляют. Затем, когда Европа погружается в Средневековье, эстафету принимают арабы, но важных открытий в физике не делают. К этому времени китайцы уже используют компас и пушечный порох, но также не стремятся постичь принцип их действия: как до них египтяне и шумеры, они являются скорее наблюдателями, нежели теоретиками. Позднее европейцы сумеют перенять их открытия, найдя им более выгодное применение...

Создание классической физики

В XVI в. Европа пробуждается: изгнав арабов из Испании, европейцы сумели воспользоваться их знаниями, унаследованными от греков, а изобретение книгопечатания

способствовало их распространению среди ученых: наступила эпоха Николая Коперника.



ГРЕКИ – ГЕНИАЛЬНЫЕ ФИЗИКИ?

Великие адепты сложных философских и математических рассуждений, греки порой пренебрегали опытами для подтверждения своих теорий...

Так, за пять веков до н. э. Пифагор считал, что Земля круглая, однако основывал свою теорию на непогрешимом совершенстве окружности (число π – отношение длины окружности к ее диаметру – абсолютно греческое). И только позднее эта гипотеза будет (к счастью!) подтверждена наблюдениями.

Еще один пример: Аристотель в IV в. до н. э. вследствие несколько поспешных утверждений полагал, что человек, находящийся в транспортном средстве, движущемся со скоростью 50 км/ч, будет в буквальном смысле пригвожден к стенке. К счастью, полеты на современных авиалайнерах со скоростью 900 км/ч эту теорию не подтверждают!

Даже если греки часто ошибались, выстраивая физические теории, все-таки они сделали значительный шаг вперед. Не будем забывать, что они добились в этом больших успехов.

И все же настоящий научный подход в Европе начали использовать не раньше 1600 г. Галилей, один из крупнейших физиков эпохи Возрождения, открывает множество физических законов, которые впоследствии уточнит и сформулирует Исаак Ньютон. Первейшая задача теперь – понять природу движения тел, что приводит к возникновению отдельной дисциплины – механики.

В этот же период Рене Декарт изучает свойства света, закладывая основы оптики; но он считает, что свет состоит из маленьких подвижных шариков, а значит, относится к сфере механики.

Следующее столетие проходит довольно спокойно. Антуан Лавуазье порывает с традиционной алхимией, наполовину смешанной с эзотерикой, в пользу истинно научной дисциплины – химии.

Настоящая научная революция происходит на рубеже XIX в.: именно в это время, на протяжении столетия окончательно оформилась почти вся классическая физика. Научные открытия сопровождаются появлением новых технологий: стремительное развитие физики вызывает промышленную революцию, последствия которой мы наблюдаем и сегодня.

В конце XVIII в. изобретена паровая машина: дисциплина, связывающая механику и термические процессы, называется термодинамикой. В последующие годы она станет основой множества других инноваций.

В это же время на первый план выходит существование некой странной силы – электромагнитной; она становится предметом пристального исследования. С ее изучением связаны имена таких ученых, как Шарль де Кулон, Андре-Мари Ампер, Карл Фридрих Гаусс и Никола Тесла. Джеймс Клерк Максвелл завершает их работу, сформулировав важное синтетическое понятие электромагнетизма.

Электричество, без которого сегодня невозможно обойтись, является одним из примеров его применения. Другая чрезвычайно важная область использования этого явления – изучение света и других излучений, таких как радиоволны и рентгеновские лучи. Внезапно становится очевидным, что информация и энергия могут почти мгновенно перемещаться из одного уголка земного шара в другой с помощью проводов (электричество) или без них (излучение).

В конце XIX в. физика перевернула мир и заняла свое место на пьедестале.

Прорыв в современной физике

На заре XX в. все как будто на своих местах. Природа кажется окончательно прирученной. Однако, с одной стороны, законы электромагнетизма содержат в себе противоречия, с другой стороны, некоторые оптические эксперименты не находят объяснения.

Именно тогда на сцене появляется молодой физик Альберт Эйнштейн: приняв за основу утверждение, что время не для всех течет одинаково, он выдвигает теорию, которая ставит все на свои места: теорию относительности. Наконец-то преодолены все теоретические противоречия физики, волнения XIX в. улеглись, отныне физика предстает единым целым и представляет собой совокупность двух основополагающих взаимодействий: гравитации и электромагнетизма.



ЭЙНШТЕЙН, ОДИНОКИЙ ГЕНИЙ?

Альберт Эйнштейн иногда представляется одиноким гением, столь велика была сила его ума. На самом же деле его специальная теория относительности (содержащая знаменитую формулу $E = mc^2$), выведенная в 1905 г., логически вполне соответствовала духу времени. Анри Пуанкаре и за ним Хендрик А. Лоренц уже заложили основу новой теории, а Эйнштейн лишь сформулировал ее. Его заслуга в том, что он признал то, что отказывались признать другие: время и пространство понятия относительные.

В последующей общей теории относительности Эйнштейн подтвердил свою гениальность, изменив традиционный взгляд на силу тяготения. И все же Эйнштейн целиком и полностью остается представителем классической физики: более того, именно он венчает собой дисциплину, основы которой заложил Галилей.

Что же касается квантовой физики, Эйнштейн остается одним из главных ее создателей в том же 1905 г. (для физики это год чудес!). Однако в дальнейшем он будет считать ее странной и неустойчивой.



ПЛАНК: У МОЕЙ ПОСТОЯННОЙ НЕТ БУДУЩЕГО

Квантовая физика определяет, что каждая частица находится в нескольких местах одновременно, но обретает конкретные координаты, как только становится объектом наблюдения...

Вначале создатели этой теории не слишком ей доверяли: так, Макс Планк считал, что просто «затыкает дыры» до тех пор, пока реальное положение вещей не будет понято до конца.

И все же постоянная Планка действительна до сих пор и является одной из фундаментальных констант наряду со скоростью света Эйнштейна. Сегодня, несмотря на свою парадоксальность, квантовая физика прочно обосновалась среди других наук, ибо только она подтверждается экспериментом, а физику никогда нельзя забывать, что природа всегда права...

Таким образом, квантовая физика завершает полтора столетия напряженных исследований. После 1925 г. развитие физики в основном состоит в открытии новых частиц и формулировании двух новых сил, действующих на уровне атомного ядра: слабого и сильного взаимодействия.

Теория, призванная связать воедино все новые открытия, дабы создать из них логичную систему, называется стандартной моделью. И все же она ограничивается применением квантовых законов начала XX в. к недавно открытым частицам, объединяя в себе две новые фундаментальные силы. Стандартная модель была оформлена в 1973 г. и до сегодняшнего дня не подвергалась сомнению.

Но природа жестока; когда физики радуются проделанной работе, она поворачивается к ним спиной. В 1900-е гг. результаты некоторых опытов выявляют серьезные затруднения. Даже свет обнаруживает странные и парадоксальные свойства, представляя то в виде шариков Декарта, то в виде волн Максвелла. Что еще более странно, сама материя начинает проявлять ту же корпускулярно-волновую двойственность. Короче говоря, вся устойчивая система рушится, по крайней мере на микроскопическом уровне.

И вот Макс Планк, сам того не подозревая, закладывает первый камень совершенно новой дисциплины, которой суждено разрешить все эти парадоксы, – квантовой физики. Чтобы понять и теоретизировать алогичные процессы, происходящие на микроскопическом уровне, требуются усилия множества ученых: кроме Макса Планка Альберт Эйнштейн, Луи де Бройль, Нильс Бор, Эрвин Шрёдингер, Вернер Гейзенберг, Вольфганг Паули и многие другие внесли свой вклад в общее дело.

С 1925 г. квантовая физика занимает свое место среди научных дисциплин. Несмотря на всю свою странность и парадоксальность, она соответствует критериям хорошей теории: с помощью ограниченного числа обоснованных постулатов она с величайшей точностью объяснила все наблюдения, сделанные до сих пор. Более того, сопоставление результатов релятивистской и квантовой теории позволило понять природу радиоактивности и бурных процессов, происходящих в атомном ядре: подчиненная человеку ядерная физика получила возможность продемонстрировать свою мощь в 1945 г. ...

Исследования в современной физике

Тем не менее в этом мире остается еще много процессов, которые нам предстоит понять хотя бы на уровне нашего измерения. Возьмем пример: магнитное поле Земли сильно менялось в прошлом, и всегда очень по-разному. До сих пор остаются малопонятными механизмы, управляющие этим феноменом, и мы не можем предсказать будущую эволюцию магнитного поля даже на ближайшие сто лет. Однако эти изменения наверняка сыграли свою роль в развитии жизни на Земле...

Это пример вопроса, который и по сей день остается без ответа. Очевидно, что достаточно знания фундаментальных законов, чтобы понять все эти процессы, однако явления эти столь сложны, что обнаружить управляющие ими механизмы чрезвычайно трудно.

Таким образом, следует различать две дисциплины: фундаментальную физику, которая изучает законы, управляющие Вселенной, чья структура оформилась в конце XIX – начале XX в., и прикладную физику, которая пытается понять сложные механизмы на основе законов, имеющихся в ее распоряжении.

Этим объясняется то, что смена технологических инноваций происходит безудержным темпом; их подавляющее большинство основано на физических законах, выведенных в начале XIX в. Это рождает иллюзию того, что развитие физики происходит непрерывно.

Разумеется, не исключено, что однажды будут открыты новые законы, которые создадут другие ветви физической науки. Они наверняка будут связаны с микромиром или с областью высоких энергий, и, возможно, это откроет новые области их применения, в том числе и в повседневной жизни.

Кроме того, остается выяснить, почему фундаментальные константы имеют такую величину, а не другую, почему новые частицы имеют такую массу и такой заряд – значения, которые нам представляются спорными. Так, стандартная модель базируется на двадцати девяти чисто экспериментальных параметрах. Для «унитарной» вселенской теории это довольно много, и вполне вероятно, что однажды появится новая теория, количество параметров которой будет меньше.

Наконец, общая теория относительности и квантовая физика несовместимы в сферах (весьма загадочных!), где огромная масса сосредоточена в очень маленьких объемах (черные дыры, Большой взрыв...). Сегодня происходит построение теорий, которым предстоит дать

ответы на эти вопросы. Среди прочих стоит упомянуть теорию струн как наиболее предпочтительную.

Вне всяких сомнений, у фундаментальных физических исследований впереди еще большое прекрасное будущее...

Часть 1

Механика

Силы и движение

1. Основы механики

Как мы видели, вся классическая физика представляет собой сочетание двух сил – силы тяготения и электромагнитной силы. Поэтому будет естественным для начала объяснить, что такое сила, и определить, как она влияет на движение тел. Для этого нам нужно заглянуть в историю и поинтересоваться механикой, сначала с Галилеем, затем с Ньютоном.

1. Относительность движения

Система отсчета

Необходимость ориентиров для описания движения

Зададим риторический вопрос: что такое движение? Мы видим объекты, которые движутся по отношению к нам (машины, пешеходы...), мы сами перемещаемся по отношению к дороге, к тротуару... «По отношению к» – ключевые слова для описания движения.

Если мы сидим рядом со спящим пассажиром в поезде, он по отношению к нам не движется; однако он движется по отношению к пейзажу, пролетающему за окном. Таким образом, необходим *ориентир*, чтобы уточнить, *по отношению к чему* движется объект. В физике подобный ориентир называется *системой отсчета*, которая является важнейшим понятием.

В предыдущем примере спящий пассажир движется в системе отсчета луга, находящегося снаружи («он движется по отношению к лугу»), но в системе отсчета поезда он не движется («по отношению к поезду пассажир неподвижен»). Если наша цель изучить движение пассажира по отношению к поезду, то мы перемещаемся в систему отсчета поезда. Если наша цель – узнать, когда мы прибудем к месту назначения, необходимо рассмотреть нашу скорость во внешней системе отсчета, то есть луга или просто земной поверхности.

Необходимо запомнить, что выражение «в системе отсчета» является синонимом «по отношению к». По своей природе объект всегда неподвижен в собственной системе отсчета: то есть поезд не движется по отношению к поезду.

Земная и геоцентрическая системы отсчета

В повседневной жизни нас чаще всего интересует движение по отношению к земле. Под словом «земля» имеется в виду «земная поверхность». Система отсчета земли, которая кажется нам такой неподвижной, называется «земной системой отсчета», и, по всей вероятности, она является самой главной из всех. Однако она не является абсолютной: Земля вращается вокруг собственной оси, а вместе с ней и ее поверхность... Таким образом, даже будучи неподвижным по отношению к земной поверхности, человек на экваторе преодолевает не менее 40 000 км (окружность Земли) в космосе за один день!

Система отсчета, в которой мы обладаем такой колоссальной скоростью, называется «геоцентрической системой отсчета» (центром является Земля). То есть в земной системе

отсчета дом неподвижен, но в геоцентрической системе отсчета он вращается вместе с Землей.

Взгляните на ночное небо: в течение ночи звезды на небе перемещаются. Они движутся по отношению к нам, то есть в земной системе отсчета. Но каждый знает, что их движение связано с вращением Земли: в геоцентрической системе отсчета звезды остаются неподвижны, это мы под ними перемещаемся².

Две точки зрения абсолютно идентичны: в повседневной жизни мы наверняка предпочтем считать, что звезды движутся по небу, потому что с нашей точки зрения мы видим это движение (согласно земной системе отсчета). Но космонавт, прилетевший на Марс, увидит, как Земля вращается в космосе, в то время как звезды покажутся ему неподвижными: он предпочтет геоцентрическую систему отсчета.

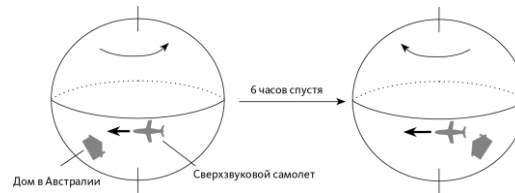


Рис. 1.1 – Движение дома и сверхзвукового самолета

Перед нами дом в Австралии на Земле и сверхзвуковой самолет, который движется на запад. Через 6 часов самолет, который был на востоке Австралии, окажется на западе Австралии.

Для космонавта, который наблюдает вращение Земли из космоса, в геоцентрической системе отсчета дом за 6 часов переместится, а самолет останется неподвижным. Разумеется, по отношению к земной поверхности (земная система отсчета) самолет переместился на запад, а дом остался неподвижным.

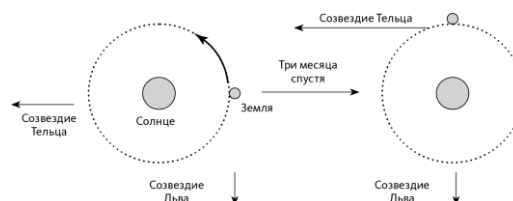
Возьмем в качестве примера сверхзвуковой самолет, летящий на запад, чья скорость равна скорости вращения Земли. С точки зрения космонавта самолет неподвижен, а Земля вращается под ним. Однако для человека на Земле самолет перемещается с огромной скоростью (→ рис. 1.1)...

Гелиоцентрическая система отсчета

Теперь поговорим о Солнце. Из-за вращения Земли кажется, что Солнце проходит по небу за 24 часа. Но не следует забывать, что Земля вращается еще и вокруг Солнца. Это составляет целый комплекс движений, которые к тому же зависят от разных систем отсчета!

Переместимся в горячую точку и представим себя на месте Солнца: Земля делает оборот вокруг нас за один год. Мы находимся в «гелиоцентрической системе отсчета» (Солнце расположено в центре). Однако с точки зрения геоцентрической системы отсчета Земля не перемещается, а лишь вращается вокруг своей оси, а вот Солнце как будто делает круг за 365 дней (→ рис. 1.2).

В конце концов, древнее представление о том, что Солнце вращается вокруг Земли, вероятно, не так уж неверно... с определенной точки зрения! В дальнейшем мы увидим, почему представление Коперника, несмотря ни на что, было обоснованным.



² Технически это не так. Земля и звезды движутся относительно друг друга, просто медленно.

Рис. 1.2 – Движение Земли и Солнца

С точки зрения космонавта, наблюдающего Солнечную систему со стороны, Земля вращается вокруг неподвижного Солнца (гелиоцентрическая система отсчета).

Человек на Земле видит, что Солнце, находившееся в созвездии Тельца, через три месяца переместилось в созвездие Льва: с точки зрения геоцентрической системы отсчета именно Солнце движется по отношению к звездам.

Мы могли бы продолжить путешествие по Вселенной и рассмотреть мир с точки зрения «галактикоцентрической» системы отсчета: по отношению к центру Галактики наша скорость просто феноменальна, поскольку Земля вращает нас со скоростью 0,5 км/с, вокруг Солнца со скоростью 30 км/с, а в составе Солнечной системы мы делаем виток вокруг центра Галактики со скоростью 217 км/с: то есть мы в среднем преодолеваем 217 километров каждую секунду!

Завершим на этом наше космическое путешествие. Благодаря ему мы познакомились с тремя системами отсчета: земной, геоцентрической и гелиоцентрической. Таких систем мы можем найти бесконечное множество: например, поезд или галактика... Однако чаще всего мы будем использовать земную систему отсчета.



А ЧТО ЖЕ АРИСТОТЕЛЬ?

Мы оставили Аристотеля, испуганного перспективой быть расплюснутым о спинку сиденья транспортного средства, движущегося со скоростью 50 км/ч. Но что же мы только что узнали? Что наша скорость 217 км/с, или 30 км/с, или 0,5 км/с, или же 0 км/с (в галактикоцентрической, гелиоцентрической, геоцентрической и земной системах отсчета соответственно).

Таким образом, становится ясно, что скорость *не является* ключевым параметром в понятии силы.



ВЫВОД: ТРИ ВАЖНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

- *Земная система отсчета:* поверхность Земли неподвижна. Солнце, Луна и звезды вращаются на небе. Такова наиболее распространенная точка зрения.

- *Геоцентрическая система отсчета:* Земля вращается вокруг своей оси, но не перемещается. Звезды неподвижны (на первый взгляд), но Солнце перемещается по небесному своду.

- *Гелиоцентрическая система отсчета:* Солнце не перемещается, а лишь вращается вокруг собственной оси. Земля делает виток вокруг Солнца и вращается вокруг своей оси. Звезды кажутся неподвижными (на первый взгляд).

В первую очередь необходимо запомнить, что понятие движения и скорости связаны с системой отсчета: они относительны и имеют смысл только по отношению к какому-либо ориентиру.

Системы отсчета Галилея

Движение изолированного объекта

В предыдущем параграфе мы увидели, что, по всей видимости, абсолютной системы отсчета не существует: все точки зрения справедливы.

Это мы установили на примере движения сверхзвукового самолета, летящего на запад, противопоставленного вращению Земли: человек на Земле (земная система отсчета) видит

самолет, летящий с большой скоростью. Человек в космосе (геоцентрическая система отсчета) видит, что самолет неподвижен, а Земля вращается. *Оба человека правы.*

Однако две эти системы отсчета не равнозначны для всех точек зрения, и именно это мы попытаемся продемонстрировать ниже.

Первопроходцем в этой области был Галилей. Ему пришла в голову следующая мысль: каким будет движение одиночного объекта при отсутствии какого-либо окружения в зависимости от определенной системы отсчета?

Подобный одиночный объект называется изолированным. Проблема в том, что полностью изолированных предметов, с которыми можно было бы провести опыт, не существует, тем более на Земле! Как бы там ни было, Галилей попытался провести такой опыт, постаравшись максимально снизить влияние окружающей среды. Например, повинаясь земному притяжению, шарик мог бы упасть еще ниже, но его задерживает поверхность земли: эти два условия компенсируют друг друга, и объект называется псевдоизолированным.

Но что же произойдет, если покатить шарик по земле?

- Первый факт: шарик катится все время прямо, его траектория по отношению к земной поверхности прямолинейна.

- Второй факт: его скорость не уменьшается, по крайней мере если достаточно снизить сопротивление воздуха (необходимое условие для псевдоизолированного объекта). Такую скорость называют равномерной, она остается постоянной по отношению к земной поверхности.

Таким образом, естественному движению изолированного объекта в земной системе отсчета свойственна «равномерная прямолинейная» траектория.

Действительно, если наша машина поворачивает налево, нас прижимает к правой дверце, потому что наше тело «хочет» двигаться прямо, а машина нам в этом мешает (→ **рис. 1.3**).

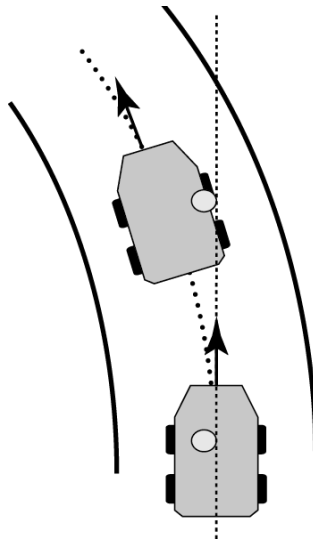


Рис. 1.3 – Машина поворачивает влево

На рисунке представлены положения машины до и после поворота. Тело человека, находящегося внутри (кружок), следует по прямолинейной равномерной траектории (пунктирная прямая) и оказывается прижатым к правой дверце.

Когда машина тормозит, наше тело наклоняется вперед, потому что мы не «хотим» терять равномерную скорость, с которой двигались (→ **рис. 1.4**). В любом случае наше тело стремится сохранить *прямолинейную равномерную* траекторию.

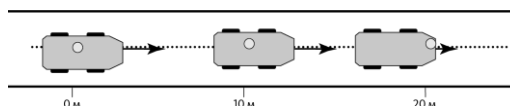


Рис. 1.4 – Машина в момент торможения

На рисунке представлены три положения машины в течение одной секунды. Между 2-й и 3-й позицией машина начала тормозить. Но тело человека, сидящего внутри (кружок), стремится сохранить прямолинейную равномерную траекторию, поэтому человек оказался прижатым к лобовому стеклу.

Очень необычная система отсчета

Выйдем из машины и положим мяч на горизонтальную земную поверхность: он останется лежать неподвижно там, куда его положили. На самом деле это частный случай «прямолинейной равномерной траектории», о которой уже говорилось раньше: слово «равномерный» означает, что скорость остается постоянной. А если скорость нулевая, она останется нулевой...

Проблема в том, что это справедливо только для земной системы отсчета. Сядем снова в машину и положим мяч на плоскую поверхность. Если машина повернет влево, наш мяч покатится вправо, так же как мы наклоняемся к правой дверце. Это видно на **рис. 2.3**: мяч (кружок) в определенный момент оказывается в правой части машины. Также если машина затормозит, мяч покатится вперед, как мы наклоняемся к лобовому стеклу. Это также наглядно показано на **рис. 2.4**, где мяч на секунду оказывается перед машиной.

Таким образом, в системе отсчета машины неподвижный предмет не остается неподвижным: поскольку он испытывает ускорение, его движение перестает быть прямолинейным и равномерным.

То есть законы движения зависят от системы отсчета, а прямолинейная равномерная траектория изолированного объекта применима лишь в некоторых особых системах отсчета. Эти особые системы отсчета очень важны, ибо мы видим, что наша старая добрая земная система отсчета *на первый взгляд* относится к этой категории. Такие системы называются «инерциальными системами отсчета».

Таким образом, движение изолированного объекта в инерциальной системе отсчета является прямолинейным и равномерным по определению этой системы отсчета.

Какие системы отсчета являются инерциальными?

Загвоздка в том, что земная система отсчета не такая уж инерциальная. Покатим наш мяч по плоской поверхности в несколько километров длиной, предположив, что трения не существует: если долго смотреть на его траекторию, мы увидим, что мяч немного отклоняется вправо и описывает широкую дугу. Причина этого в том, что Земля вращается вокруг своей оси: именно это явление заставляло наш мяч катиться вправо в машине, которая поворачивала налево.

Мы постараемся более детально вникнуть в точное движение мяча по отношению к Земле в следующей главе: а сейчас достаточно констатировать, что система отсчета не является инерциальной при длительном наблюдении за движением из-за вращения Земли.

Но если геоцентрическая система не вращается вокруг своей оси, является ли она инерциальной, в отличие от земной? Увы, Земля вращается вокруг Солнца, а вместе с ней и геоцентрическая система отсчета: это сопровождается теми же последствиями для движения тел. То же самое происходит с гелиоцентрической системой, которая «вращается» вокруг центра Галактики.

На самом деле ни одна из этих трех систем отсчета не является инерциальной, но более или менее к ней приближена. Земная система отсчета может в целом рассматриваться как инерциальная, кроме тех случаев, когда нас интересуют крупномасштабные пространственные явления (например, движение масс воздуха и океанов) или когда мы хотим очень подробно изучить некоторые движения. Геоцентрическая и гелиоцентрическая системы отсчета являются вполне инерциальными для большинства

изучаемых движений.



АБСОЛЮТНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА?

И последнее: поскольку инерциальная система отсчета так интересна, можем ли мы считать ее «абсолютной», считать ее системой отсчета Вселенной, в которой все предметы находятся в движении?

На самом деле можно продемонстрировать, что инерциальная система отсчета не единственная и существует множество других.

Возьмите лист бумаги и ручку, которая будет представлять изолированный объект. Проведите вертикальную черту сверху вниз, двигая ручку с постоянной скоростью: у вас получилась красивая равномерная прямолинейная траектория, а ваш лист представляет собой инерциальную систему отсчета.

Теперь сделайте то же самое, медленно передвигая лист влево с одинаковой скоростью: на этот раз черта будет диагональной, но по-прежнему прямой и нарисованной с постоянной скоростью. То есть лист, медленно перемещенный влево, также представляет собой инерциальную систему отсчета.

Таким образом, оба ваших листа представляют собой инерциальные системы отсчета, находящиеся в движении по отношению друг к другу.

В действительности любая система отсчета, которая равномерно перемещается по прямолинейной траектории по отношению к инерциальной системе отсчета, также является инерциальной: таким образом, существует бесконечное множество инерциальных систем отсчета, находящихся в движении по отношению друг к другу.

Идея «абсолютной системы отсчета» не имеет решительно никакого смысла.

Существует ли совершенная инерциальная система? Да, существует, но она представляет мало интереса... Как правило, мы стремимся изучить движение тела по отношению к чему-то конкретному (к земной поверхности, к планете Земля, к Солнцу), а вместе с этим возникает и определенная система отсчета.

Может возникнуть вопрос, зачем так подробно останавливаться на понятии инерциальной системы. В действительности, как мы увидим в дальнейшем, в этой системе отсчета законы механики наиболее просты: поэтому всегда приятно, когда можешь считать свою систему отсчета инерциальной...

2. Сила и инерция

Некоторые уточнения по поводу ускорения

В повседневной речи ускорение означает увеличение скорости. С точки зрения физика это не всегда верно по двум главным причинам:

- Ускорение – это алгебраическая величина, то есть оно может быть положительным и отрицательным, в зависимости от того, увеличивается скорость или уменьшается. Физик никогда не скажет «замедление», для него речь идет об «отрицательном ускорении»... То есть машина, которая тормозит, испытывает ускорение!

- Еще важнее то, что скорость представляет собой вектор, то есть стрелку, направление которой указывает направление траектории (например, на север), а длина указывает величину скорости (например, 50 км/ч обозначается стрелкой длиной 50 мм).

Однако физик считает, что ускорение наступает тогда, когда меняется вектор скорости:

то есть когда меняется скорость, но и когда меняется направление траектории.

Например, машина, которая поворачивает налево, испытывает ускорение, даже если ее скорость (50 км/ч) не меняется: зато меняется *направление* вектора скорости.

Итак, необходимо запомнить два очень разных влияния ускорения:

- Если ускорение параллельно траектории, оно меняет скорость, но не направление машины. В этом случае ускорение называется тангенциальным (→ рис. 1.5).

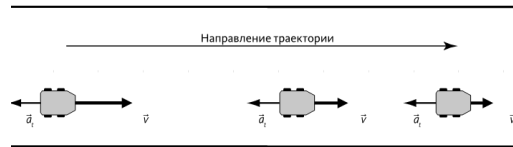


Рис. 1.5 – Векторы скорости и ускорения во время торможения.

Машина тормозит: с одной стороны стрелка вектора скорости $\vec{v}$; становится все короче, с другой стороны тангенциальное ускорение $\vec{a}_t$ направлено назад.

- Если ускорение перпендикулярно траектории движения, оно меняет направление машины, но не меняет ее скорость: в этом случае ускорение называют центростремительным (→ рис. 1.6).

Конечно, может быть и так, что оба ускорения действуют одновременно, меняя скорость *и* направление.

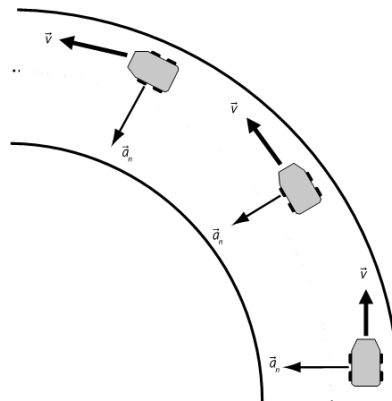


Рис. 1.6 – Векторы скорости и ускорения во время поворота.

Машина поворачивает влево: с одной стороны вектор скорости $\vec{v}$; все больше склоняется влево, с другой стороны вектор нормального ускорения $\vec{a}_n$ направлен влево.



ВЕЛИЧИНА УСКОРЕНИЯ

Тангенциальное ускорение показывает изменение скорости за секунду: так, если скорость машины меняется за секунду с 30 м/с на 20 м/с, ее ускорение равно – 10 м/с² (потеря скорости составляет 10 м/с каждую секунду).

А как обстоит с центростремительным ускорением? Как можно его измерить, если скорость машины не меняется? В этом случае необходимо значение, указывающее на «размер изменения направления».

Предположим, что за одну секунду вектор скорости меняется с $\vec{v}_1$ на $\vec{v}_2$, меняя только направление (см. схему справа). Мы видим, что стрелка вектора описала дугу, длина которой и составляет величину ускорения (математика очень точно нам это демонстрирует). Чем длиннее стрелки и больше угол между векторами, тем длиннее будет дуга.

Таким образом, центростремительное ускорение равно скорости, помноженной на изменение угла за единицу времени.

Испытание силы...

Действие окружающей среды

Снова возьмем наш объект, движущийся в инерциальной системе отсчета. Предположим, что это космический корабль, затерянный в безвоздушном межзвездном пространстве: то есть он является изолированным объектом, а его траектория равномерная и прямолинейная. А теперь представим, что он приближается к какой-то планете: его траектория искажается, несмотря на то что он не взаимодействует с планетой.

Если говорить в гораздо более широком смысле, мы наблюдаем, что малейшее материальное окружение искажает траекторию любого объекта. Это влияние может быть самым разным, например, стена жестко изменит нашу равномерную прямолинейную траекторию, если мы в нее врежемся. Если мы захотим пролететь по прямой линии с крыши одного дома на крышу другого, Земля может помешать нам проделать путь по прямолинейной траектории, заставив нас упасть. Или если мы едем на велосипеде, а ветер встречный, воздух может сильно тормозить наше движение, заставляя нас терять равномерную скорость, и т. д.

Таким образом, во всех случаях наша прямолинейная равномерная траектория искажается под действием окружающей среды:

- она или перестает быть равномерной, то есть на нас действует тангенциальное ускорение;
- или же она перестает быть прямолинейной, то есть мы испытываем влияние нормального ускорения.

В обоих случаях возникает ускорение, которого не существовало бы, если бы мы были изолированным объектом.

Запомним: в инерциальной системе отсчета присутствие материальной окружающей среды приводит к ускорению рассматриваемого объекта.

Два важнейших параметра: сила и инерция

Чем больше ускорение, тем больше мы уклоняемся от первоначальной равномерной и прямолинейной траектории, то есть воздействие на нас окружающей среды будет «сильнее». Следовательно, сила, с которой на нас воздействует окружающая среда, измеряется относительно нашего ускорения.

Таким образом, действующую на нас силу мы можем считать равной нашему ускорению. Однако интуитивно понятно, что это не так, и это можно продемонстрировать на простом примере.

Предположим, что вас попросили толкнуть детскую коляску так, чтобы она переехала улицу: вы сможете это сделать без особых усилий. Чуть погодя вас просят помочь подтолкнуть заглохшую машину: вам будет очень трудно сдвинуть ее – то есть придать ей ускорение – в одиночку. Таким образом, мы видим, что одна и та же сила, направленная на два разных объекта, приводит к двум различным ускорениям.

Каждый объект, испытывающий ускорение, обладает присущим ему свойством, а именно инертностью, которая является способностью объекта сопротивляться всякому ускорению в заданном пространстве.

Напрашивается вывод: чем более крупным и тяжелым выглядит объект (например, машина), тем сложнее, кажется, придать ему ускорение, а следовательно, тем больше его инертность. Вот почему инертность еще называют инертной массой («инертная» от слова «инерция») и выражают ее в килограммах.

Подведем итог: в инерциальной системе отсчета ускорение объекта тем больше, чем меньше его инертная масса и чем больше сила воздействия окружающей среды. Таким образом, ускорение является следующим соотношением силы (связанной с окружающей

средой) и инертной массы (присущей объекту): $\vec{a} = \vec{F}/m$ (где $\vec{a}$ – это ускорение, $\vec{F}$ – сила, а m – инертная масса).

Записывают также и по-другому: $(\vec{F} = m\vec{a})$ в инерциальной системе отсчета.



УТОЧНЕНИЯ ПО ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

До сих пор мы говорили об объектах, чья скорость была определена. Но как обстоит дело, к примеру, с вращающимся диском? Если нас интересует его центр, то в земной системе отсчета его скорость является нулевой. Если же нас интересует его поверхность, то она вращается с большой скоростью. По правде говоря, каждая точка диска имеет разную скорость и ускорение. Какая же сила приложена к этому объекту, если его ускорение в разных точках не является одинаковым?

Подобные вращающиеся объекты мы рассмотрим в главе 7. А пока ограничимся объектами, чья скорость и ускорение во всех точках одинаковы, то есть такими, которые находятся в *поступательном движении*, а не вращаются вокруг своей оси.

Та же проблема возникает, если объект деформируется (в каждой точке возникает разная скорость), и тем более если он распадается на две части. Например, так происходит с ракетой, теряющей сгоревшие газы по мере своего ускорения: газы, бывшие неотъемлемой частью ракеты, внезапно оказываются предоставленными самим себе и обретают собственную скорость.

Но подобные случаи, в общем, достаточно редки, и в дальнейшем повествовании мы с легкостью будем их избегать.

Это простое уравнение описывает дифференциальный закон механического движения, или второй закон Ньютона (см. врезку ниже). С тех пор в честь этого выдающегося ученого сила выражается в ньютонах: эту единицу измерения мы крайне редко используем в повседневной жизни, но для каждого физика она является основополагающей!

Заметим, что до сих пор мы не сказали ничего революционного: мы ограничились определением инерциальной системы отсчета и силы так, чтобы они наилучшим образом соответствовали интуитивному смыслу, имея при этом четко определенные рамки. Что касается инертной массы, мы чувствуем, что она тем или иным образом связана с весом объекта, однако пока что ограничимся тем, что речь идет о некоем загадочном свойстве, присущем каждому объекту.



СИЛА И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Сила, описанная во втором законе Ньютона, складывается из общего влияния окружающей среды. Но мы всегда ради интереса можем мысленно поделить эту силу на несколько составляющих.

Например, возьмем машину, которая движется по улице с ускорением. Поскольку она движется с ускорением, это значит, что на нее действует сила окружающей среды, направленная вперед. Мы можем разделить эту силу на четыре составляющих (см. схему ниже):

- сила тяги, которую создают мотор и колеса, направленная вперед;
- сила трения, которое создает воздух, направленная назад;
- вес машины, направленный вниз;
- сопротивление почвы, не дающее машине пройти сквозь нее, направленное вверх.

Эти четыре составляющих и создают силу $\vec{F}$, которая позволяет машине

двигаться с определенным ускорением ($\vec{F} = m\vec{a}$), где $\vec{F}$ – равнодействующая всех сил. В последующих главах мы более подробно остановимся на происхождении и выражении этих разных сил.

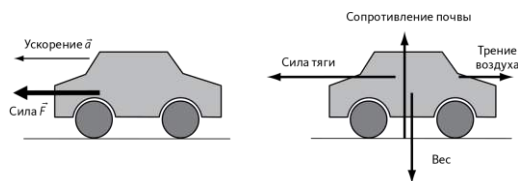


Рис. а. Общая сила, действующая на машину

Рис. б. Составляющие общей силы

Настало время четко понять, *как* окружающая среда оказывает влияние на объекты, что приведет нас к описанию двух основополагающих сил Вселенной: силы притяжения и электромагнитной силы. Нам кажется, что повседневной жизнью управляет множество других сил (когда мы ударяемся о стену, на нас действует некая самостоятельная сила, не правда ли?): мы увидим, что все они являются следствием этих двух фундаментальных сил.



ПОНЯТИЕ «ЗАКОНА» В ФИЗИКЕ

При описании дифференциального закона механического движения мы впервые столкнулись с понятием «закон»: в дальнейшем мы познакомимся и с другими. Необходимо усвоить, что «физические законы» ни в коем случае не являются эмпирическими константами, универсальность которых можно было бы допустить. Чаще всего речь будет идти об отношениях, вводящих новую величину, которые верны по определению, по своей природе определенные законы не могут быть ложными.

Например, дифференциальный закон механического движения позволил ввести такое понятие, как «сила» и «инертная масса». Также мы увидим, что «первый закон термодинамики» всего лишь описывает понятие «полной энергии», придуманное физиками.

Таким образом, нам станет ясно, что физика вовсе не является объемным каталогом экспериментальных законов: вся классическая физика действительно сводится к выражению двух фундаментальных сил.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Понятие движения имеет смысл только по отношению к определенной характеристике, которую физики называют системой отсчета.
- В большинстве случаев нас интересует движение по отношению к поверхности земли: земная система отсчета.
- В инерциальной системе отсчета движение объекта по определению является равномерным и прямолинейным. Земную систему отсчета можно считать инерциальной, учитывая большинство видов движения в повседневной жизни.
- С точки зрения физика ускорение приводит к изменению вектора скорости, а значит, к изменению величины скорости и/или ее направления.
- Инертная масса оказывает сопротивление ускорению объекта в инерциальной системе отсчета в заданном пространстве.
- В инерциальной системе отсчета сила, с которой окружающая среда воздействует на твердый объект в поступательном движении, определяется как произведение ускорения объекта и его инертной массы.

2. Сила притяжения

Из двух фундаментальных сил классической физики сила притяжения, удерживающая нас на поверхности Земли, выражена наиболее явно. Мы рассмотрим более подробно ее происхождение и последствия, что значительно расширит наше понятие о массе, с которым мы познакомились в предыдущей главе. Мы увидим, что существует три концептуально различных и тем не менее одинаковых массы, что является одной из великих загадок физики.

Рассмотрим феномен приливов и отливов, причиной которых является сила притяжения: мы увидим, что они касаются не только земных океанов, но также управляют множеством других явлений Солнечной системы.

1. Выражение силы притяжения

Три массы...

Притяжение между двумя телами

Сила притяжения управляет нашей повседневной жизнью: необязательно быть внимательным наблюдателем, чтобы понять, что земная поверхность неизбежно притягивает к себе все предметы. И что эта сила действует на расстоянии: спрыгните с летящего самолета, чтобы убедиться в этом! Но если мы выкопаем яму, наше падение вниз продолжится и там, то есть нас притягивает центр Земли.

А теперь вопрос: если все тела испытывают земное притяжение, то же самое должна испытывать и Луна: почему же она не падает?

Переместимся немного повыше и представим себя в геоцентрической системе отсчета: мы находимся в космосе и видим, как Земля медленно вращается у нас под ногами. Речь идет об инерциальной системе отсчета. Это значит, что при отсутствии воздействующей силы Луна должна иметь равномерную прямолинейную траекторию, а значит, должна была бы уже давно отдалиться от Земли. Однако Луна вращается вокруг Земли, то есть испытывает «нормальное ускорение», заставляющее ее описывать дугу (→ **рис. 2.1**). Но где ускорение, там и сила, направленная в сторону ускорения, то есть... прямо к Земле! А вот и результат!

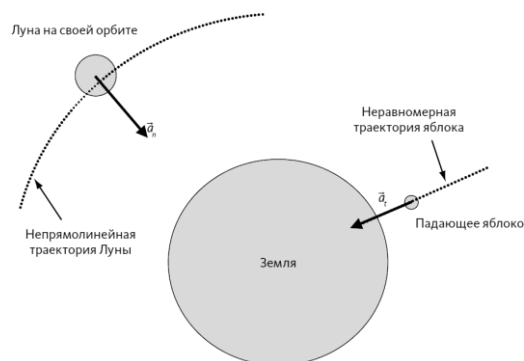


Рис. 2.1 – Сила Земли, воздействующая на Луну и на яблоко

Таким образом, Земля притягивает все, абсолютно все: это она заставляет яблоко падать с дерева, и она же удерживает Луну на ее орбите. К такому гениальному выводу пришел Ньютон, который первым сформулировал понятие гравитации.

Мы могли бы представить некое загадочное «притягивающее тело» в центре Земли, так же как в центре любой планеты и любой звезды. Но мы также можем предположить, что притяжение осуществляет обычная материя, из которой состоит Земля.

Напрашивается простой вывод: если обычная материя способна притягивать предметы на расстоянии, мы, человеческие существа, состоящие из материи, также должны притягивать к себе другие тела! Первый же прохожий на улице должен испытывать наше непреодолимое притяжение...

Так ли это? Ответ – да! Но это притяжение ничтожно и невидимо для нас. Зато его можно определить с помощью современных измерительных приборов: подвесьте к потолку два очень тяжелых шара на веревках так, чтобы они не касались друг друга (такой подвес называют маятником). Вы «увидите» (с помощью измерительного прибора), что оба маятника наклонены друг к другу, а вовсе не висят вертикально (впервые подобное измерение было проделано в 1798 г.).

Способность притягивать и способность притягиваться

Чем больше измерений мы сделаем, тем вернее убедимся в том, что чем большим весом и плотностью обладает тело, тем сильнее его способность притягивать окружающие предметы: это называют активной гравитационной массой, свойственной каждому объекту, которая отражает его способность притягивать другие объекты и выражается в килограммах.

Не следует путать ее с инертной массой, которая является инерцией объекта, то есть его сопротивляемостью ускорению. В то время как активная гравитационная масса представляет собой его способность притягивать другие тела. То есть на первый взгляд между ними нет никакой связи: единственный вывод – обе массы тем больше, чем больше вес и плотность объекта.

Это объясняет, почему Земля, которая представляет собой гигантское тело, с такой силой притягивает предметы, в то время как мы сами, хилые человечки, слишком малы, чтобы осуществлять видимое притяжение.

Таким образом, сила притяжения, действующая на объект, пропорциональна активной гравитационной массе притягивающего тела. Продолжим наше исследование новым опытом.

Поднимем два предмета: левой рукой теннисный шарик, а правой чугунное ядро каторжника. Ядро покажется нам гораздо тяжелее шарика. Поскольку ядро поднять сложнее, значит, сила притяжения, которая действует на него, больше, чем та, что действует на теннисный шарик.

Таким образом, сила притяжения также зависит еще от одного параметра, свойственного объекту, на который она воздействует: он называется пассивной гравитационной массой, выраженной в килограммах, которая точно соответствует интуитивному смыслу массы. В нашем случае чугунное ядро имеет гораздо большую пассивную гравитационную массу, чем теннисный шарик, потому что оно тяжелее: сила притяжения, действующая на него, гораздо больше, чем та, что действует на теннисный шарик.



ПРОГУЛКА ПО ЛУНЕ

На Луне астронавт чувствует себя очень легким: и действительно, активная гравитационная масса Луны гораздо меньше, чем у Земли, и сила ее притяжения слабее. Астронавт, прогуливающийся по Луне, может прыгать как кузнечик, все выше и выше, все дальше и дальше... пока со всего маху не натолкнется на первое же препятствие, которое перед ним возникнет.

На самом деле то, что астронавт стал легче, не означает, что его инертная масса стала меньше: масса тела является параметром, присущим каждому телу, и везде остается одинаковой. Инертность астронавта остается той же, что и на Земле, но, поскольку он чувствует себя легче, он забывает об этом. Прыгать он сможет выше, но от толчка инерция повлечет его с той же силой, что и на Земле. Соединение малого веса и большой инертности будет новым опытом для него, и ему придется двигаться с осторожностью.

Как же много получается разных масс! Пора подвести некоторый итог:

- инертная масса представляет собой сопротивляемость объекта ускорению;
- активная гравитационная масса представляет собой способность тела гравитационно притягивать к себе другие объекты;
- пассивная гравитационная масса представляет собой способность тела быть гравитационно притянутым другим телом.

Именно эту последнюю массу мы в повседневном обиходе именуем «весом»: когда мы говорим, что человек весит 60 кг, это означает, что его пассивная гравитационная масса равна 60 кг. А человек с весом в 100 кг испытывает двойное гравитационное притяжение по сравнению с тем, кто весит 50 кг.

Два довольно загадочных опыта

Чтобы следовать дальше и более подробно рассмотреть силу притяжения, ее необходимо изолировать от других сил: лучше всего переместиться на Луну, где трение воздуха не создаст помех, поскольку там нет атмосферы.

Там мы сможем провести два заключительных опыта, результаты которых ошеломляют...

Синхронное падение двух тел

Гордо помашем чугуном ядром в одной руке и теннисным шариком в другой на одинаковой высоте. Одновременно бросим на землю: против всякого ожидания и ядро и шарик достигнут пола в одно время. Это значит, что оба предмета получили одинаковое ускорение. (Опыт с перышком и молотком был проделан астронавтами корабля «Аполлон» в 1969 г.)

На предметы действуют две силы, противоположные друг другу:

- более высокая инертная масса ядра стремится замедлить его падение (ускорение затруднено);
- более высокая пассивная гравитационная масса ядра заставляет его испытывать более сильное притяжение Луны, что «толкает его вперед».

Поскольку ускорение обоих предметов одинаково, из этого следует, что действующие на них вышеупомянутые нагрузки уравнивают друг друга: следовательно, инертная масса равна пассивной гравитационной массе. Результат, который никак невозможно было предвидеть!

Взаимное притяжение двух тел

Теперь сделаем второй опыт, похожий на первый и с таким же поразительным результатом. Подцепим наше ядро и теннисный шарик к двум горизонтальным пружинам высокой растяжимости, расположенным друг напротив друга (→ **рис. 2.2**). Оба предмета притягиваются друг к другу благодаря силе притяжения, действующей между двумя телами, хотя этого и не видно невооруженным глазом. Чем сильнее растянута пружина, тем сильнее ее «тянет» предмет и, следовательно, тем больше сила притяжения предмета напротив.



УСКОРЕНИЕ ОДИНАКОВОЕ, СИЛЫ РАЗНЫЕ

Мы увидели, что чугунное ядро и теннисный шарик, сброшенные на Луне с одинаковой высоты, падали с одинаковой скоростью: означает ли это, что сила удара по поверхности Луны у обоих предметов одинакова? Ответ «нет», потому что, даже если их ускорение и одинаково, инерция (= инертная масса) у них разная:

когда ядро брошено, его уже очень трудно остановить, разве что приложить колоссальное усилие. Однако когда ядро касается поверхности Луны, его скорость внезапно меняется с 8 км/ч на 0 км/ч, что потребует от почвы огромной силы: возможно, ядро оставит небольшую вмятину на месте падения, в то время как теннисный шарик подскочит, не нанеся ущерба.

Чья пружина растянута больше, ядра или шарика? Ответ на этот вопрос однозначен: обе пружины растянулись одинаково, а это значит, что ядро и шарик с одинаковой силой притягивают друг друга.

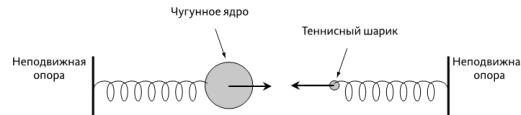


Рис. 2.2. – Гравитационное притяжение между ядром и шариком

Здесь также действуют силы, противоположные друг другу:

- активная гравитационная масса ядра больше массы шарика, то есть ядро сильнее притягивает шарик (который стремится сильнее растянуть пружину);
- пассивная гравитационная масса ядра больше массы шарика, поэтому ядро сильнее притягивается шариком (и старается сильнее растянуть пружину).

Поскольку обе пружины растянуты на одинаковую длину, значит, обе нагрузки компенсируют друг друга: то есть активная гравитационная масса равна пассивной гравитационной массе.

Загадочное равенство

Таким образом, оба наших эксперимента выявили совершенное равенство:

Инертная масса = пассивная гравитационная масса = активная гравитационная масса

Вот почему все три величины называют массой! Впрочем, в дальнейшем мы будем говорить просто о «массе» объекта, не уточняя, о какой именно.

Если результаты этих двух опытов кажутся вам «странными» и «волшебными», значит, вы все поняли!

Тождество «гравитационная масса = инертной массе» (а именно: «Два тела, брошенные одновременно, падают с одинаковой скоростью») всегда чрезвычайно интриговало физиков. Именно это и подтолкнуло Эйнштейна к созданию общей теории относительности, которая создает новую теорию гравитации: в дальнейшем мы обязательно к ней вернемся.

Равенство двух гравитационных масс («Силы, действие которых испытывают на себе два взаимодействующих предмета, равны») остается таким же загадочным с тех пор, как его открыл Ньютон. В дальнейшем оно позволит нам говорить просто о взаимном притяжении двух тел, не уточняя, кто кого притягивает, поскольку тела притягивают друг друга с одинаковой силой.



НЕВЕРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ?

Равенство двух гравитационных масс означает, что сила, с которой теннисный шарик действует на ядро, равна силе, с которой ядро действует на теннисный шарик (что подтверждается предыдущим опытом). Однако это справедливо для любого тела: например, сила, с которой вы действуете на Землю,

идентична той, с которой Земля воздействует на вас!

Вы не чувствуете себя настолько сильным? Такой результат поначалу кажется абсурдным, но все-таки он верен. Но важно понять, что ускорение будет очень разным: Земля обладает огромной инертностью (= огромной массой) и не сдвинется ни на миллиметр на ваших глазах, несмотря на огромную силу, с которой вы на нее воздействуете, в то время как ваша смехотворная инертность делает вас для Земли просто «игрушкой».

Возможно, все эти на первый взгляд странные заключения происходят от того, что определение, которое мы дали силе, неверно и не соответствует здравому смыслу. Мы представили силу в виде отношения $\vec{F} = m\vec{a}$; в инерциальной системе отсчета. Не лучше ли записать, что $\vec{F} = \vec{a}$?

И действительно, если ускорение объектов одинаково, учитывать инертную массу нет никакого смысла: определенное пространство (= «определенная $\vec{F}$ ») вызывает определенное ускорение (= «определенная $\vec{a}$ ») независимо от рассматриваемого объекта (= m не играет роли). В этом случае мы находим силу, с которой Земля действует на нас, большой, а силу, с которой мы действуем на Землю, – незначительной: а это все же гораздо более интуитивное ощущение.

На самом деле, как всякий уважающий себя физик, в дальнейшем мы будем придерживаться нашего первого определения $\vec{F} = m\vec{a}$. Почему? Потому что электромагнитная сила придает объекту ускорение, которое зависит от его параметров, что вновь придает смысл упомянутой « m » (инертности объекта). Между тем вопреки всякому ожиданию именно электромагнитная сила в большей степени управляет нашей повседневной жизнью, хотя на первый взгляд она кажется совершенно скрытой от глаз. Именно это мы увидим в следующей главе.

Сила, действующая на расстоянии

Мы еще не закончили с гравитацией, разберем-ка ее поподробнее.

Вполне естественно, что сила притяжения уменьшается, если расстояние между двумя объектами увеличивается. В противном случае Солнце притягивало бы нас гораздо сильнее Земли, и мы давно бы на нем изжарились.



ЗАГАДОЧНОЕ ДЕЙСТВИЕ НА РАССТОЯНИИ

Может показаться удивительным, что два тела, разделенные пустотой, могут взаимодействовать друг с другом. Например, как Луна может создавать приливы и отливы на Земле, если ни один «вестник» не сообщает океанам о присутствии Луны, находящейся в 380 000 км над нами.

Тем не менее современная физика полагает, что всякое массивное тело испускает во все стороны такие частицы «вестники», называемые гравитонами. Именно они, достигнув объекта, сообщают ему о присутствии притягивающего тела и создают таким образом силу притяжения.

Эта гипотеза позволяет проще понять, почему гравитация уменьшается пропорционально квадрату расстояния.

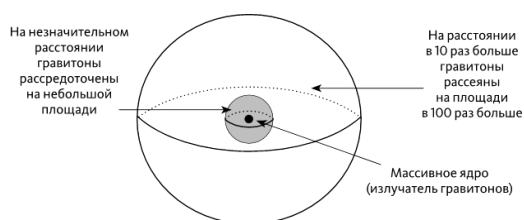
Возьмем массивное ядро, которое испускает, к примеру, сто гравитонов в секунду во всех направлениях. Когда гравитоны преодолеют расстояние в 1 м, они будут распределены по поверхности сферы с радиусом 1 м, центром которой является ядро, а площадь составит 12,5 м² (площадь сферы с радиусом r равна $4\pi r^2$).

Когда гравитоны преодолеют 10 м, они будут распределены по сфере с радиусом 10 м, то есть на площади 1250 м². Таким образом, на одной единице площади будет в 100 раз меньше гравитонов, если расстояние до ядра увеличится в 10 раз (см. схему ниже).

Мы видим уменьшение, пропорциональное квадрату расстояния. А если число гравитонов разделить на 100, сила притяжения будет в 100 раз слабее,

то есть сила притяжения подчиняется тому же закону уменьшения.

Гравитоны пока не были обнаружены из-за отсутствия достаточно точных приборов, но физики почти уверены, что они существуют. Им даже известна их скорость, которая равняется скорости света. Описание электромагнитной силы позволит нам понять, почему физики позволяют себе такую уверенность.



Если точнее, измерения показывают, что сила притяжения уменьшается пропорционально квадрату расстояния: если расстояние между объектами увеличилось в десять раз, сила притяжения уменьшится в сто раз.

Итак, теперь нам известно, что такое гравитация! Подведем итоги:

- Сила притяжения пропорциональна активной гравитационной массе притягивающего тела.
- Сила притяжения пропорциональна пассивной гравитационной массе притягиваемого тела.
- Сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Осталось уточнить размер силы для заданных массы и расстояния, чтобы представлять себе порядок величин. И результат довольно поразительный: сила, действующая между двумя объектами массой 1 кг, находящимися на расстоянии 1 м, в 10 миллиардов раз меньше, чем сила, необходимая, чтобы открыть дверь с хорошо смазанными петлями! Понятно, что притянуть прохожего на улице нам не удастся...

Частное значение этой силы, действующей между двумя объектами массой 1 кг на расстоянии 1 м, называется гравитационной постоянной и обозначается G : именно она является коэффициентом гравитационного взаимодействия, с помощью которого можно измерить силу притяжения, действующую на любое тело независимо от его массы и расстояния до него. G является одной из фундаментальных физических констант, чье значение может быть установлено без дополнительных пояснений.



ВЫРАЖЕНИЕ СИЛЫ ГРАВИТАЦИИ

Сила притяжения, осуществляемая телом с массой M на объект с массой m , находящийся на расстоянии d , выражается следующим образом:

$$F = G \frac{M \cdot m}{d^2}.$$

Чтобы найти силу, с которой объект с массой m действует на тело с массой M , достаточно поменять местами M и m : мы увидим, что выражение силы не меняется. Таким образом, два взаимодействующих тела подвергаются действию одинаковой силы благодаря тому, что их гравитационные массы равны (M и m взаимозаменяемы).

Поскольку сила выражена вектором, необходимо указать ее направление: она направлена в сторону ускорения в инерциальной системе отсчета, то есть в сторону притягивающего тела.

А какую же роль играет вес?

Другое название силы притяжения

В предыдущих параграфах мы самым подробным образом рассмотрели понятие различных масс, но лишь вскользь упомянули понятие «вес».

Определение веса не так уж сложно: весом объекта называется сила, с которой он действует на поверхность земли, находясь в неподвижном состоянии. Однако эта сила практически полностью складывается из земного притяжения. Таким образом, можно приблизительно констатировать, что *вес – это просто другое название силы притяжения*.

В основном мы употребляем слово «вес», когда говорим об объектах, находящихся в непосредственной близости к поверхности планеты (в повседневной жизни), но употребляем понятие «сила притяжения», когда речь идет о космических объектах (спутниках, планетах, звездах).

Таким образом, когда мы говорим, что «весим» больше, чем кто-либо, это означает, что мы испытываем большую силу притяжения.

То есть понятие «вес» отличается от понятия «масса», как мы уже говорили, – если вы попадете на Луну, ваша масса останется прежней (этот параметр свойственен объекту); но вы будете «весить» меньше, потому что сила притяжения, действующая на вас, будет меньше.

Вернемся на Землю, где все нам привычнее. От чего же зависит вес объекта?

- разумеется, от его массы;
- от массы притягивающего тела, в данном случае Земли (она одинакова для любого объекта, расположенного на Земле);
- от гравитационной постоянной G , одинаковой для всех, как и указывает ее название;
- от расстояния между двумя взаимодействующими телами, в данном случае между Землей и объектом.

Каково это расстояние? 0 км – раз объект находится на поверхности Земли? Поскольку Земля огромна, ее масса понемногу распределена повсюду под нами, то есть определять расстояние до Земли не имеет смысла. Однако можно продемонстрировать (спасибо математике!), что все происходит так, будто масса Земли сосредоточена в ее центре. Но от центра Земли нас отделяет ее радиус, равный 6380 км, а это означает, что, если бы вся Земля целиком находилась от нас на расстоянии 6380 км, она действовала бы на нас с той же силой.

Таким образом, радиус Земли и есть то самое расстояние от Земли до объекта. И оно одинаково абсолютно для всех: даже если вы подниметесь на вершину Эвереста (8,8 км), вы почти не удалитесь от центра Земли (6389 км вместо 6380 км).



СТРАШНАЯ СТРЕЛКА ВЕСОВ

Встаньте на весы: что они показывают? Значение в килограммах, которое соответствует массе. Однако не стоит торопиться...

На самом деле весы испытывают на себе силу, с которой вы на них воздействуете (например, с помощью маленьких пружин, которые сжимаются слабее или сильнее, в зависимости от комплекции и роста человека). Однако сила, с которой вы действуете на весы, возникает из-за земного притяжения, что и является вашим весом. Таким образом, весы измеряют вес, а не массу, но почему же в таком случае они показывают результат в килограммах, а не в ньютонах?

Причина в том, что вес и масса связаны отношением $P = mg$. Но на Земле $g = 10 \text{ мс}^{-2}$, то есть между весом и массой добавляется коэффициент 10. Поэтому вместо того, чтобы показать 600 ньютонов (величину веса), весы покажут 60 кг

(вашу массу). Коэффициент 10 в каком-то смысле заложен внутри весов.

Это значит, что ваши весы могут служить только на Земле, поскольку коэффициент $g = 10 \text{ м/с}^2$ существует только на Земле! Отвезите весы на Луну, где сила тяжести в 6 раз слабее, и весы покажут 10 кг, потому что измеренный вес будет равняться 100 ньютонам.

Но не радуйтесь раньше времени, потому что этот результат ложный! Ваша масса по-прежнему равна 60 кг, просто ваш вес был поделен на 6.

В конечном итоге все эти параметры постоянны, за исключением массы объекта, которая зависит... от самого объекта! Также мы констатируем, что вес равняется произведению массы объекта m и константы g , единой для всех. Эта константа называется ускорением свободного падения. Она присуща любой планете и зависит, как мы увидели, от ее массы и ее радиуса.

Если обозначить вес буквой P , мы получим формулу $P \rightarrow = mg \rightarrow$.

Стрелка представляет собой вектор, чье направление следует уточнить: сила направлена к центру Земли, а значит, ускорение свободного падения тоже.

Ускорение свободного падения

Выражение веса $P \rightarrow = mg \rightarrow$; очень похоже на выражение силы $F \rightarrow = ma \rightarrow$. Оно является верным для инерциальной системы отсчета, которой в первом приближении является земная система отсчета. Однако единственной силой, действующей на объект в свободном падении, является вес, то есть это можно записать как $F \rightarrow = P \rightarrow$; или, используя двойное соотношение, $ma \rightarrow = mg \rightarrow$. Получается, что $a \rightarrow = g \rightarrow$. Таким образом, поле тяготения соответствует ускорению свободного падения объекта, каким бы он ни был. Поэтому величина g также называется ускорением свободного падения. Мы обнаруживаем, что все объекты, брошенные одновременно, падают с одинаковой скоростью, если на них действует только их вес.

Между тем g является константой, которую легко вычислить: на Земле она составляет примерно 10 м/с^2 . Это означает, что в свободном падении на Земле скорость любого объекта каждую секунду возрастает на 10 м/с , то есть на 36 км/ч . То есть по прошествии 10 секунд объект движется уже со скоростью 360 км/ч !

Разумеется, на практике на объект действует и другая сила, которая его тормозит, – сопротивление воздуха. А значит, реальная скорость объекта будет гораздо ниже и даже стабилизируется, если объект сброшен с большой высоты: именно в этом состоит смысл парашюта, к которому мы вернемся в дальнейшем.



НЕВЕСОМОСТЬ

Вы едете в лифте, когда внезапно трос обрывается, и вы оказываетесь в свободном падении. Ускорение свободного падения одинаково для всех тел, поэтому и вы и лифт падаете с одинаковой скоростью. Это значит, что по отношению к лифту у вас нет никакого ускорения: не двигаясь, вы можете находиться внутри лифта в подвешенном состоянии. Иными словами, вы в невесомости.

Теперь перенесемся на Международную космическую станцию на орбите на высоте 350 км . Вы и космическая станция испытываете ускорение свободного падения, и именно оно удерживает вас на орбите, препятствуя вашему движению по прямой. Вы и станция подвержены одинаковому ускорению, то есть по отношению к станции у вас нет никакого ускорения. Так же как и в лифте, вы находитесь в состоянии невесомости.

Итак, если космонавты в космической станции находятся в состоянии невесомости, это не означает, что на них не действует гравитация (вес в космосе всего на 4 % меньше, чем на Земле): просто они испытывают такое же ускорение,

что и станция.

В конечном итоге, если для того, чтобы оказаться в невесомости, нужно полететь в космос, это потому, что необходимо выйти из атмосферы, трение которой заставило бы упасть станцию на Землю. Пример с лифтом показывает, что можно испытать невесомость и на Земле, но этот опыт будет гораздо более кратким.

На практике существует специальный аэробус, предназначенный для тренировки космонавтов в атмосфере, – какое-то время самолет находится в свободном падении, прежде чем выровняться, не достигнув земли.

2. Приливы и отливы

Влияние Луны

Рассмотрим гравитационное воздействие Луны на Землю (→ **рис. 2.3**). Сила воздействия Луны на объект будет различаться в зависимости от того, в какой точке Земли он находится. Если Луна на небе в зените, значит, объект находится от нее на кратчайшем расстоянии и испытывает наиболее сильное воздействие (точка А). Антиподы этой точки, находящиеся на противоположной стороне Земли, значительно удалены от Луны: их разделяет еще и диаметр Земли. То есть сила воздействия Луны на объект в этой точке значительно слабее (точка В). А если бы объект находился в центре Земли, сила воздействия Луны была бы средней (точка О).

Эта разница уровня силы обнаруживается в формуле ускорения ($\vec{F} = m\vec{a}$). В то же время любые тела, расположенные на определенном расстоянии от Луны, испытывают по отношению к Луне одинаковое ускорение вне зависимости от их массы.

Мы убедились, что Земля ведет себя так, словно вся ее масса сосредоточена в центральной точке О. Таким образом, Земля целиком испытывает ускорение средней силы: слабее, чем объект на ее поверхности в точке А (со стороны Луны), но более сильное, чем объект в точке В (антипод).

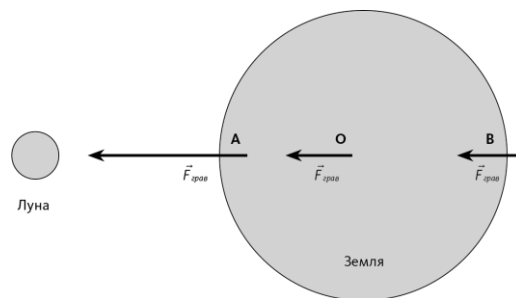


Рис. 2.3 – Сила воздействия Луны в различных точках Земли

В точке А Луна находится в зените, здесь ее воздействие максимально. Точка В – антипод, в ней воздействие Луны минимально. Точка О находится в центре Земли, здесь воздействие средней величины.

Мы говорим об ускорении *по отношению к Луне*; но рассмотрим теперь, каково оно *по отношению к Земле*. Объект в точке испытывает большее ускорение, чем Земля, то есть он стремится удалиться от Земли. Объект в точке В испытывает меньшее ускорение, чем Земля, то есть он тоже стремится удалиться от нее, но в противоположную сторону (→ **рис. 2.4**).

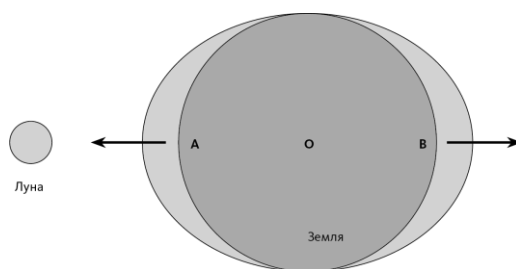


Рис. 2.4 – Приливные силы

Приливная сила достигается с учетом относительного ускорения объекта по отношению к Земле, которое является следствием притяжения Луны: в точке A объект испытывает большее ускорение, чем Земля ($\rightarrow$ рис. 2.3), то есть стремится от нее удалиться. В точке B объект испытывает меньшее ускорение, чем Земля ($\rightarrow$ рис. 2.3), то есть тоже стремится удалиться от Земли, но в противоположную сторону.

Отметим, что здесь не представлена сила земного притяжения, которая не дает океанам устремиться в мировое пространство во время приливов и отливов.

Чтобы вычислить силу, действующую на Землю, достаточно умножить ускорение на массу объекта ($F^{\rightarrow} = ma^{\rightarrow}$): полученные силы, которые стремятся «разорвать» Землю на части, называются приливными силами.

Приливные силы действуют на любые объекты на поверхности Земли: в частности, на воду океанов. Таким образом, океаны образуют две «возвышенности» на поверхности Земли: один находится там, где Луна в зените, другой на противоположной стороне Земли. В этих точках уровень воды наиболее высок: здесь наблюдается прилив.

Но через шесть часов Земля совершит четверть оборота вокруг своей оси. Человек, находившийся на «возвышенности», оказывается во «впадине»: наступает отлив. Таким образом, в одной и той же точке Земли за сутки происходит два прилива и два отлива.

Под воздействием приливных сил океан мог бы улететь в мировое пространство. Но нужно учесть и земное притяжение, действующее на воду океанов. Оно уравнивает приливные силы.

Высокие и низкие приливы

Следует отметить, что Солнце также вызывает приливы на Земле по тем же причинам. В сущности, это объясняет явление высоких и низких приливов.

Луна создает две возвышенности в точках-антиподах. Солнце делает то же самое. Поэтому, если два светила находятся по одну сторону Земли (новолуние) или по разные ее стороны (полнолуние), их воздействие объединяется, поскольку возвышенности, создаваемые обоими светилами, находятся в одном месте: когда возвышенности довольно значительны, это высокий прилив ($\rightarrow$ рис. 2.5).

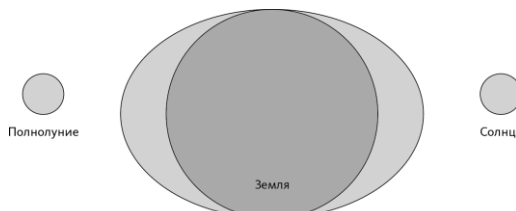


Рис. 2.5 – Приливы во время полнолуния

Если же Солнце и Луна находятся по отношению друг к другу под углом 90° , отлив, вызванный одним светилом, имеет ту же силу, что и прилив, вызванный другим. То есть двойное воздействие частично гасит друг друга: это вызывает низкий прилив ($\rightarrow$ рис. 2.6).

Луна совершает оборот вокруг Земли за 28 дней, и мы наблюдаем примерно по два

высоких и два низких прилива каждый месяц (высокие приливы происходят в новолуние и полнолуние, низкие – в первую и последнюю четверть).

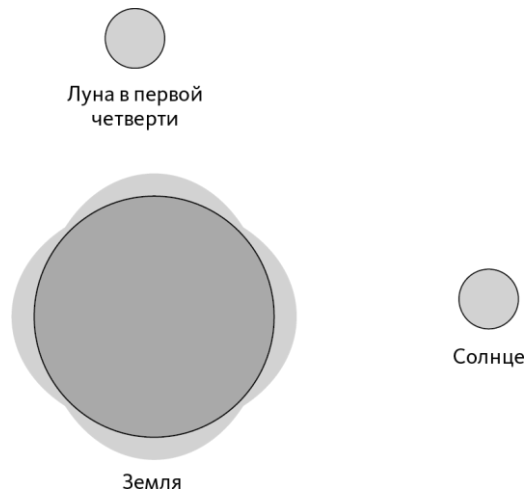


Рис. 2.6 – Приливы первой четверти Луны

Предел Роша

Выше мы упоминали, что приливные силы стремятся «разорвать» Землю на части. Так, океаны были бы унесены в космос, если бы их не удерживала гравитация.

Между тем приливные силы действуют в Солнечной системе повсюду, где есть два взаимодействующих тела. И может случиться так, что гравитация не сможет компенсировать «выталкивающую» силу прилива.

Так происходит с естественным спутником, когда он оказывается очень близко к своей планете: приливные силы, вызываемые этой планетой, будут очень сильны. До определенного расстояния, называемого пределом Роша, приливные силы превышают силу притяжения, которая удерживает спутник: спутник «раскалывается» (то есть в пределах этой зоны спутник существовать не может).

Это объясняет кольца Сатурна: они находятся внутри предела Роша, и материя не может сформировать здесь большой спутник. Она распределена по орбите в виде «булыжников». Кроме того, эта материя наверняка была принесена крупным планетоидом, который подлетел к планете слишком близко и был разрушен приливными силами...

Спутник Юпитера Ио также не далек от предела Роша. Более того, периодическое влияние других спутников то приближает, то отдаляет его от планеты. Таким образом, мощные приливные силы то уменьшают, то увеличивают то, что сильно давит на спутник. Результатом этого является постоянная вулканическая деятельность на Ио, выброс избыточной внутренней энергии, образованной этими трениями.

Скрытая сторона Луны

Вернемся к нашей системе Земля-Луна, чтобы описать заключительное последствие действия приливных сил. Если приливные силы Луны действуют на Землю, действие приливных сил Земли по отношению к Луне еще более значительно. Если бы Луна была очень твердым телом, на ней не образовывалось бы выпуклостей. Но планеты и их спутники всегда подвержены некоторой деформации: из-за приливных сил они своей формой напоминают мяч для регби (как видно на **рис. 2.7**).

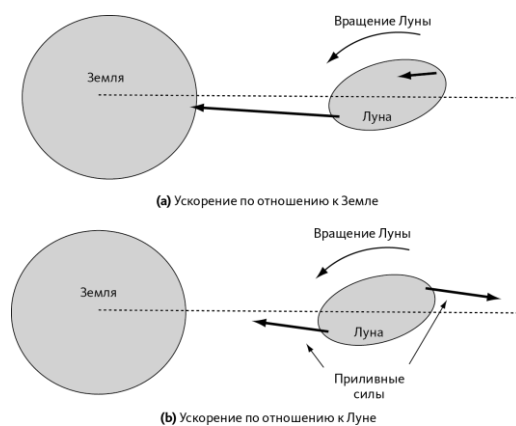


Рис. 2.7 – Влияние приливов на скорость вращения тела

Луна превратилась в мяч для регби из-за приливных сил; но благодаря инерции выпуклости достигают своей максимальной амплитуды, когда Земля уже не в зените (или в точке-антиподе), из-за вращения Луны.

В геоцентрической системе отсчета (а) ускорение, оказываемое на выпуклости, направлено в сторону Земли, а потому наклонено в сторону пунктирной оси. Ускорение, действующее на центр Луны, направлено вдоль оси. «Индивидуальное» ускорение выпуклостей по отношению к Луне направлено к пунктирной оси (б). Мы видим, что приливные силы противостоят вращению Луны в дополнение к тому, что стремятся ее разрушить.

Представим, что Луна очень быстро вращается вокруг своей оси. Поверхность вращается, а выпуклости по-прежнему обращены к Земле (и ее точкам-антиподам): а значит, эти выпуклости расположены не всегда в одном и том же месте лунной поверхности. Иными словами, выпуклости перемещаются по Луне.

Из-за действия инерции проходит довольно длительное время, прежде чем лунные горы разрушаются и формируют выпуклость. То есть образование выпуклости происходит с опозданием: когда выпуклость достигает максимальной амплитуды, Земля уже не в зените.

Из этого следует, что выпуклости направлены не совсем в сторону Земли, как показано на **рис. 2.7**. Мы также изобразили приливные силы, действующие на уровне этих выпуклостей, и видим, что из-за этого отклонения они не только стремятся «разрушить» Луну, но и препятствуют ее вращению. Такая Луна мало-помалу будет вращаться все медленнее из-за действия приливных сил.

В конечном итоге этот феномен действует до тех пор, пока скорость вращения Луны вокруг своей оси не будет равна ее скорости вращения вокруг Земли, а в этом случае Луна будет повернута к Земле всегда одной и той же стороной. Выпуклости больше не будут опаздывать, потому что всегда будут расположены на том же месте Луны: приливные силы больше не стремятся замедлить лунное вращение.

Именно это и произошло в истории системы Земля-Луна: Луна постепенно замедлила вращение вокруг своей оси, и теперь мы постоянно видим одну и ту же ее поверхность. Подобный феномен свойствен всем крупным спутникам в Солнечной системе.

Приливные силы Луны действуют также и на Землю, а потому с Землей происходит ровно то же самое. Иными словами, вращение Земли вокруг своей оси мало-помалу замедляется из-за приливных сил Луны. Во времена динозавров сутки длились меньше 24 часов.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Сила притяжения пропорциональна массам двух взаимодействующих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между двумя телами.

- Все тела, испытывающие притяжение одного и того же тела, подвержены равному ускорению. Такова специфическая особенность силы притяжения.
- Два тела, испытывающие гравитационное взаимодействие, действуют друг на друга с одинаковой силой.
- Вес является частным случаем силы притяжения вблизи поверхностей планет. Он равен произведению массы объекта на поле тяготения, также называемое ускорением свободного падения, которое зависит от радиуса и массы планеты и представляет собой ускорение тела в свободном падении.
- Гравитационная постоянная выражает коэффициент силы притяжения для двух тел массой 1 кг на расстоянии 1 м и является одной из фундаментальных констант физики.
- Приливные силы, возникающие из-за силы притяжения, действующей на спутник: точки на поверхности спутника испытывают разное ускорение, поскольку расположены на разном расстоянии от тела. То есть на эти точки действует определенная сила. Эта сила стремится «расчленил» спутник вдоль оси, связывающей ее с телом.
- Приливные силы объясняют не только приливы на Земле, но также и кольца Сатурна, вулканизм Ио, а также то, что Луна всегда обращена к нам одной и той же стороной.

3. Электростатическая сила

Пора обратить наше внимание на вторую основополагающую силу Вселенной: электромагнитную силу. В связи с этим нам представится возможность погрузиться в мир бесконечно малого, после того как мы с силой притяжения рассматривали мир бесконечно большого.

На первый взгляд электромагнитная сила выглядит сложнее силы притяжения, и в этой главе мы ограничимся простым примером: когда частицы, создающие эту силу, остаются в пределах определенной системы отсчета. Речь идет об «электростатической силе»: слово «магнитный» исчезло, потому что условием неподвижности частицы является отсутствие магнетизма.

Магнетические аспекты будут рассмотрены в следующей главе: эта тема немного сложнее. Более того, мы с некоторой относительностью убедимся, что магнетические аспекты есть не что иное, как частое проявление электростатической силы.

Электростатика сама по себе невероятно сильно влияет на нашу жизнь и окружающую среду: она управляет нашей повседневностью в гораздо большей степени, чем гравитация.

1. Описание электростатической силы

Открытие электростатической силы

Первые наблюдения

Влияние электростатической силы на нашу жизнь кажется нам редким, а то и вовсе не существующим, но на самом деле, чтобы ее увидеть, нужно ее создать.

Первые наблюдения за этим явлением принадлежат грекам: они обратили внимание, что, если потереть янтарь, он будет притягивать предметы, а иногда даже пускать искры. Так была открыта новая сила, притягивающая на расстоянии.

Следует отметить, что она явно не связана с гравитацией, поскольку это касается объектов, чья масса чересчур мала для гравитационного взаимодействия.

Первичный опыт можно проделать с пластмассовой линейкой, если потереть ее о шерстяной свитер, при этом желательно, чтобы воздух был довольно сухой: линейка будет

притягивать малейший клочок бумаги, который приклеится к ней. В таких случаях мы говорим, что линейка «наэлектризована». В сухую погоду происходит то же самое, когда вы снимаете шерстяной свитер, ваши волосы трутся об него, слышится треск, а в темноте можно увидеть искры, похожие на те, которые заметили древние греки.

Но систематические опыты в этом направлении начнут проводиться только в эпоху Возрождения. Подвергнув трению различные вещества, исследователи пришли к выводу: два идентичных наэлектризованных вещества отталкиваются, различные наэлектризованные вещества иногда притягиваются, иногда отталкиваются.

Дальнейшие наблюдения позволили разделить наэлектризованные вещества на две разные категории: с положительным зарядом и с отрицательным. Два вещества с одинаковым зарядом отталкиваются, вещества с разными зарядами притягиваются.

Происхождение этих «зарядов» в то время было тайной. Казалось, что подобно массе заряд является неким свойством, присущим объекту, но, в отличие от массы, заряд можно создать или погасить с помощью трения.

Взаимодействие заряженных объектов

Чтобы создать более сильное трение, мы вращали шары с большой скоростью и обнаружили, что вещество получило более мощный заряд, то есть:

- шары сильнее притягивали и отталкивали другие наэлектризованные предметы: по аналогии с гравитацией мы назовем это: более высокий «активный заряд»;
- они сильнее притягивались и отталкивались другими наэлектризованными предметами: тут мы говорим о более высоком «пассивном заряде».

Проделаем следующий опыт: прикрепим два одинаковых шара на пружины к горизонтальной опоре друг против друга (→ **рис. 3.1**). При помощи трения зарядим оба шара, придав левому шару заряд более сильный. Поскольку шары сделаны из одного материала, они будут отталкиваться, имея одинаковый заряд (например, положительный). Вопрос в том, какая пружина сжата сильнее или на какой из шаров действует большая сила.

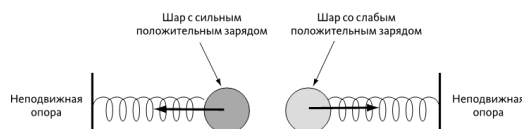


Рис. 3.1 – Отталкивание двух шаров с разной силой зарядов

Ответ очевиден – длина пружин абсолютно одинакова, что означает, что обе силы равны: воздействие предметов друг на друга уравнивается:

- более мощный активный заряд левого шара стремится сильнее оттолкнуть правый шар;
- более мощный пассивный заряд правого шара заставляет его сильнее отталкиваться от левого шара.

Из этого опыта мы заключаем, что активный и пассивный заряды одного предмета равны. В дальнейшем мы будем говорить просто о «заряде», без дополнительных уточнений. Мы также будем говорить просто о «силе взаимодействия», не уточняя, на какой из двух объектов она действует, поскольку оба они испытывают одну и ту же силу.

Подведем итог: электростатическая сила пропорциональна заряду притягивающего (или отталкивающего) объекта *и* заряду притягиваемого (или отталкиваемого) тела.

На данном этапе очевидна связь с наблюдениями за гравитацией, что не может не вызывать интерес... Но на этом аналогия не заканчивается! Опыт показывает, что эта сила уменьшается пропорционально квадрату расстояния между двумя телами: как и в случае с гравитацией, если расстояние умножить на десять, сила уменьшится в сто раз.



ЕЩЕ ОДНА СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА РАССТОЯНИИ

Мы объяснили действие на расстоянии силы притяжения существованием маленьких частиц-посланников – гравитонов, которые передвигаются от одного тела к другому. Это, в свою очередь, объясняло ослабление силы пропорционально квадрату расстояния.

То же самое справедливо и для электростатической силы! Только здесь частицы, испускаемые заряженным телом, называются фотонами. Фотоны не так скрытны, как гравитоны: нам предстоит убедиться, что фотоны являются частицами, из которых состоит свет и все прочие электромагнитные излучения. Эти частицы прекрасно видны: теоретически это единственные частицы, которые мы можем видеть, ибо речь идет о свете, который бросается нам в глаза!

Учитывая, что фотоны выявлены лучше других частиц, и учитывая аналогию между гравитацией и электростатикой, начинаешь лучше понимать, почему физики так уверены в существовании гравитонов, хотя они пока так и не были обнаружены...

Сила большой мощности

Продолжим аналогии, сравнив мощность электростатической силы и силы притяжения. Достаточно простого примера: линейка, «слабо» наэлектризованная вашим свитером, притягивает к себе клочки бумаги, чего не происходило до того, пока в ней не возник заряд, а это значит, что электростатическое притяжение во много раз превосходит силу гравитации между линейкой и бумагой.

Более того, опыт показывает, что вес бумаги меньше электростатической силы, поскольку клочки бумаги остаются подвешенными к линейке, не падая с нее. То есть всей огромной массы Земли недостаточно, чтобы уравновесить слабый разряд линейки, притянувшей бумагу.



ВЫРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИЛЫ

Сделанные нами наблюдения позволяют вывести формулу электростатической силы. Такая сила, исходящая от тела с зарядом Q и действующая на тело с зарядом q на расстоянии d , будет выражена как $F = k \frac{Qq}{d^2}$.

Величина k является коэффициентом мощности силы для определенного заряда и расстояния. По сути, это аналог гравитационной постоянной G , но существенная разница между ними в том, что k не имеет названия. По некоторым причинам, которые было бы слишком сложно здесь объяснять, физики считают, что $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. ϵ_0 является фундаментальной константой электростатики и называется диэлектрической проницаемостью вакуума.

Иными словами, электростатическая сила не просто мощнее, она полностью «подавляет» силу гравитации, которая рядом с ней выглядит смехотворно. Почему же электростатическая сила столь незаметна во Вселенной? Потому что не существует или существует слишком мало объектов, заряженных так, чтобы мы могли это заметить. Почему так мало объектов имеют заряд, если все они имеют массу? На этот ключевой вопрос мы попытаемся ответить в дальнейшем.

Поразительная связь с силой притяжения

Остается рассмотреть влияние электростатической силы на движение объектов. И здесь появляется фундаментальное различие с силой притяжения. Уравнение $a^{\rightarrow} = F^{\rightarrow} / m$ поможет

нам это понять.

Оно означает, что ускорение объекта зависит от его массы (= от его инертности) и от силы, действующей на него. Между тем электростатическая сила в том числе зависит от заряда объекта. Так, чем мощнее заряд и чем меньше масса объекта, тем сильнее будет его ускорение. Таким образом, при взаимодействии с одним и тем же заряженным телом два различных объекта будут иметь разное ускорение.

В случае с гравитацией ее сила пропорциональна массе объекта, что уравнивало его инертностью: при взаимодействии с одним и тем же массивным телом два различных объекта будут иметь одинаковое ускорение.

И вот перед нами величайшая тайна: почему ускорение объекта, на который действует только электростатическая сила, зависит от его массы, если масса связана с гравитацией, а не с электростатикой? Внимательный читатель заметит, что речь идет о тайне гравитационной и инертной масс, но в несколько другом аспекте.

Итак, есть гравитационная составляющая (масса) в электростатическом взаимодействии, но нет никакого составляющего электростатики (нет заряда) в гравитационном взаимодействии. Откуда же такое отличие?

Другое существенное отличие: заряженные тела могут притягиваться или отталкиваться в зависимости от знака их заряда, в то время как массивные тела могут только притягиваться, потому что все массы обладают одним знаком. Но куда же подевались объекты с отрицательной массой?

Невзирая на эти различия и нестыковки, между двумя силами все-таки существует сильная связь, и невольно хочется думать, что обе они суть проявление некой единой силы, управляющей Вселенной. Как мы указывали во введении, можно понять, почему объединение двух основополагающих сил в одну является одной из величайших целей физики XXI в.



ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ МАССА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Аналогии между электростатикой и гравитацией, естественно, заставляют нас задуматься о том, какой была бы Вселенная, в которой существовали бы положительная и отрицательная массы, подобно тому как существуют положительный и отрицательный заряды.

Тело с отрицательной массой все бы отталкивало, а тело с положительной массой все бы притягивало³. В итоге началась бы бесконечная гонка между положительными массами, убегающими от отрицательных, которые они притягивают⁴.

С другой стороны, в случае с отрицательной массой два тела с одинаковым знаком массы притягивались бы, а с противоположным знаком отталкивались бы, что создавало бы огромное количество тел с одинаковым знаком массы, которые свели бы на нет всю гравитацию.

В подобной вселенной не могла бы сформироваться планета, на которой есть жизнь. Так что не стоит жалеть, что в нашей вселенной отрицательной массы не существует.

Если электростатическая сила кажется настолько мощной по сравнению с гравитацией, видимое отсутствие в природе заряженных тел делает из нее силу, которая кажется почти

³ Тут надо сделать оговорку. Тело с положительной массой притягивало бы ВСЕ, кроме объектов с отрицательной массой.

⁴ Утверждение неверное. Положительные массы могут притягивать только (!) положительные, но никак не отрицательные. О чем, собственно, и говорится в следующем абзаце.

анекдотической. Все дело в том, что мы рассматриваем ее не в том масштабе.

Как мы видели, сила притяжения становится ощутимой только в случае с телами значительной массы, такими как планеты, их естественные спутники и звезды. Именно поэтому в предыдущем разделе мы заострили внимание на крупных объектах, то и дело обращаясь к открытому космосу.

Однако с электростатической силой все обстоит наоборот: она проявляет себя на микроскопическом уровне. Однако микроскопический мир, несмотря на всю его близость, очень мало знаком нам, ибо мы не можем наблюдать его невооруженным глазом (в отличие от Луны, Солнца и звезд). Вот почему мы совершим небольшой обзор мира малых величин, который нас окружает, чтобы понять, почему электростатическая сила является вездесущей.



СВЯЗЬ МЕЖДУ ГРАВИТАЦИЕЙ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИЛОЙ: ВЫВОДЫ

Обобщим аналогии между двумя основополагающими силами:

- Обе силы уменьшаются пропорционально квадрату расстояния между объектами.

- Обе силы зависят от параметра, свойственного объекту (массы или заряда). Более того, чем более мощное воздействие может оказывать один объект, тем более мощное воздействие он может испытывать: это свойство, управляющее обеими силами (идентичность масс – активная/пассивная, идентичность зарядов – активный/пассивный). Отсюда следует, что два объекта оказывают друг на друга одинаковое взаимное воздействие.

И различия:

- Существует два вида зарядов (положительный и отрицательный), а масса – только одного вида (положительная). Массы с одинаковым знаком притягиваются, тогда как тела с одинаковыми зарядами отталкиваются. Таким образом, гравитация – сила всегда притягивающая. Электростатическая сила может быть притягивающей и отталкивающей.

- В гравитации две различные массы в присутствии третьего объекта испытывают одинаковое ускорение. В электростатике два различных заряда испытывают разное ускорение. Более того, в электростатике ускорение объекта зависит от его заряда и *его массы*, тогда как в гравитации ускорение объекта не зависит ни от заряда, ни от массы.

Последнее утверждение позволяет предположить тесную связь между силами гравитации и электростатики, поскольку масса – гравитационная характеристика – вмешивается во взаимодействие чисто электростатическое.

2. Вездесущая сила

Погружение в микромир

Первые наблюдения

И снова именно греки первыми задумались о сути бесконечного малого: из чего состоит материя? Они выдвинули гипотезу, что всякий объект состоит из маленьких простейших кирпичиков, которые они называли атомами. Это объясняло тот факт, что материя может быть разделена на части до образования мельчайшей пыли, если одни атомы попросту отделить от других. С другой стороны, греки предполагали, что сам атом невозможно поделить, то есть он является зерном самой мелкой пыли, какую только возможно получить, и, соответственно, так мал, что его не видно невооруженным взглядом.

По мнению греков, атомы имели форму маленьких шариков (не будем забывать, как греки любят все круглое!)... Атомы должны иметь определенную массу: чем больше атомов, тем больше масса объекта. Это, в общих чертах, объясняло факт, что чем объект крупнее, тем он тяжелее.

Таким было положение вещей до эпохи Возрождения. Внести ясность помогли исследования в области химии, в частности с подачи Антуана Лавуазье.

Вклад химии

Было очевидно, что некоторые вещества имели довольно специфические химические свойства: например, некоторые жидкости сильно «разъедали» твердые тела. Эти жидкости были названы «кислотами», а твердые тела отнесены в категорию металлов. Кислоты наверняка содержали какие-то особенные вещества, которые отличали их от прочих жидкостей: микроскопические составляющие тел, придающие им особые химические свойства, назовут молекулами.

Но когда разные вещества смешивались, их химические свойства менялись, а значит, и молекулы менялись тоже. Одни исчезали, другие появлялись. Но поскольку масса вещества оставалась неизменной, значит, ничто по-настоящему не «исчезало»: молекулы просто менялись. Это и было фундаментальным открытием Лавуазье: «Ничто не теряется, ничто не создается, все меняется».

Если молекулы могли таким образом меняться, значит, они не являлись «простейшими кирпичиками», о которых говорили греки. Молекулы составлены из нескольких элементов, которые, выстраиваясь определенным образом, образуют молекулу: те самые, известные нам атомы.

Все более сложные химические реакции позволили мало-помалу изолировать эти атомы и описать их: каждый атом сообщает определенные химические свойства молекуле, частью которой он является. Обмениваясь атомами, молекулы могли меняться и менять свои свойства.

Возьмем пример: вода состоит из молекул, каждая из которых содержит два атома водорода H и один атом кислорода O. То есть ее формула H_2O . Если мы заставим водяной пар соприкоснуться с раскаленным железом, атомы молекул перегруппируются: атомы кислорода двух молекул воды соединятся, покинув водород, чтобы сформировать новую молекулу – O_2 , состоящую из двух атомов кислорода (газа столь важного для нашей жизни). Что же касается оставшихся четырех атомов водорода, они образуют две двухатомные молекулы водорода H_2 .

Уравнение записывается так: $2H_2O \rightarrow O_2 + 2H_2$

Молекулы воды исчезли, но масса осталась прежней, поскольку атомы просто перегруппировались. Любопытно, что, если мы поднесем спичку к новым образованиям O_2 и H_2 , это поможет атомам перестроиться заново и снова образовать... воду H_2O ! А еще во время этой реакции прогремит взрыв большой мощности...

Внутренность атома

Долгое время считалось, что атомы – элементарные частицы материи. Но в самом конце XIX в. один опыт подвергает эту аксиому сомнению. В этот период Джорджу Джону Томсону удастся выделить частицу из внутренности атома, нагрев металлическую поверхность. Опыт позволил констатировать следующие важные факты:

- Выделенная частица, которая получила название «электрон», обладает отрицательным зарядом. Но поскольку атом по своей природе нейтрален, следовательно, внутри его должна быть и частица с противоположным зарядом, чтобы свести общий заряд к нулю. Этой другой частицей является протон.

- Масса электрона гораздо меньше общей массы атома, что показывает, что в атоме содержатся другие, более тяжелые частицы. Дальнейшие опыты покажут, что протон в тысячи раз тяжелее электрона.

• Только электроны можно легко отделить от атома, протоны выглядят незыблемыми. В начале XX в. Эрнест Резерфорд предположил, что электроны движутся по орбите вокруг ядра гораздо меньшей величины, в котором сконцентрированы протоны и которое очень трудно разрушить. Он проводит аналогию с Солнечной системой, подавляющая часть массы которой содержится в Солнце, вокруг которого вращаются планеты. Опыт подтвердит наличие протонов и их скопление в крошечном ядре.

Дальнейшие рассуждения показали, что подобная модель атома несовершенна, и квантовая физика позволила лучше понять суть вещей. Но мы пока что удовольствуемся «планетарной» моделью атома: протоны действительно сгруппированы в ядре, размер которого в сотни тысяч раз меньше атома, остальное пространство занято электронами.

И только в 1932 г. после опытов с ядерными реакциями открыто существование еще одной частицы, содержащейся в ядре, – речь идет о нейтроне, тяжелом, но лишенном заряда.

Мы слегка коснулись элементарных частиц материи (более подробно мы остановимся на этом в главе о ядерной физике). Масса протона почти равна массе нейтрона, заряд протона противоположен заряду электрона: его называют «элементарный заряд».

Атом водорода содержит один протон и один электрон: это самый легкий из атомов. Атом урана содержит 92 протона, 92 электрона и 146 нейтронов – это самый тяжелый из атомов, существующих в естественном состоянии. Можно создать более тяжелые атомы, но они будут неустойчивы.

Мимоходом заметим, что определение атома, данное греками, устарело, потому что атомы уже не являются неделимыми частицами.

Таким образом, материя, которая в нашем масштабе представляется нейтральной, окажется глубоко заряженной, когда мы погрузимся внутрь атома, то есть в пространство в десятки миллионов раз меньше миллиметра.



СОСТАВ АТОМА: ОБОБЩЕНИЕ

Резюмируем факты о составных частях атома, которые мы упоминали:

	Масса	Заряд
Протон	m_p	e
Нейтрон	$m_n \approx m_p$	0
Электрон	$m_e \ll m_p$	$-e$

Любопытная разница в массе протона и электрона обнаруживается при их распределении в атоме: электроны занимают гораздо больший объем, чем ядро. Чтобы представить это наглядно, можно взять простой пример: если бы ядро было шариком с радиусом 10 см, размер атома составлял бы 10 км. В главе 24 мы увидим, что эта разница между объемами электронов и ядра в точности связана с разницей масс между двумя частицами.

Несмотря на кажущееся сходство, мы увидим, что электрон и протон две очень разные частицы, принадлежащие к двум совершенно различным категориям. Почему же заряд электрона точно противоположен заряду протона? Этого мы не знаем. Можно лишь констатировать, что, если бы это было не так, атом имел бы заряд, а тогда формирование звезд и планет было бы невозможно.

В связи с этим некоторые физики выдвигают на первый план так называемый «антропный принцип» (связанный с человеком). Согласно этому принципу, вселенные стремятся к формированию, но во вселенной, где электронам не противопоставлены протоны, не может возникнуть жизнь: этот процесс некому наблюдать, и все происходит так, словно их не существует.



НАЭЛЕКТРИЗОВАННЫЕ ОБЪЕКТЫ

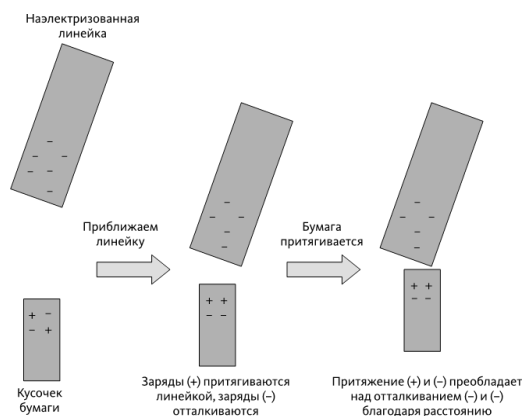
В итоге мы можем вернуться к нашему первоначальному опыту: почему линейка, которую потерли о шерстяной свитер, обретает заряд?

Когда вы трете один предмет о другой, это отрывает электроны первого предмета, которые скапливаются на втором предмете. Первый предмет становится положительно заряженным (из-за недостатка электронов), а второй отрицательно заряженным (из-за их избытка): это так называемый «трибоэлектрический эффект».

Способность терять и приобретать электроны при трении сильно зависит от рода вещества: со многими из них при трении ничего не происходит. В этом случае, если вы будете продолжать трение, попросту отделите целые атомы, что не изменит заряд предмета, но может его испортить.

И все же остается один вопрос: почему наэлектризованная линейка притягивает кусочки бумаги, если они не заряжены?

Отрицательный заряд линейки притягивает положительные заряды бумаги и отталкивает отрицательные заряды бумаги (см. схему ниже). Таким образом, если бумага в целом не имеет заряда (нейтральна), она содержит положительные заряды, которые гораздо ближе к линейке, чем отрицательные заряды. Электростатическая сила уменьшается с увеличением расстояния, и притяжение между «минусами» линейки и «плюсами» бумаги преобладает над отталкиванием «минусов» линейки и «минусов» бумаги: бумага прилипает к линейке.



Электростатическая сила в повседневной жизни

Если мы сравним силу гравитации, действующую на два протона, и электростатическую силу, действующую на те же протоны, мы увидим, что она в миллиарды, миллиарды, миллиарды и миллиарды раз слабее! Нет смысла уточнять, что на микроскопическом уровне электростатическая сила преобладает над всеми явлениями.

В конечном итоге если сила притяжения выглядит преобладающей в мире больших величин, то это потому, что отрицательной массы не существует. По мере того как мы соединяем атомы друг с другом, масса только увеличивается, пока на уровне планеты не достигнет огромных размеров. В то время как протоны (со знаком $+$) притягивают к себе электроны (со знаком $-$), это делает общую систему нейтральной на уровне атома. В конечном итоге, притягивая противоположные заряды одни за другими, электростатическая сила гасит сама себя.

К счастью, это не мешает ей в нашем масштабе иметь колоссальное влияние на нашу повседневную жизнь. Если вы не проваливаетесь сквозь землю, это происходит именно потому, что электроны внутри атомов электростатически отталкивают электроны атомов ваших подошв. Если бы сила гравитации была мощнее, вы провалились бы под Землю до самого центра, но, к счастью, как мы можем убедиться, этого не происходит.

Таким образом, всякие силы, возникающие «при контакте», являются в широком масштабе проявлением электростатической силы на атомном уровне: когда вы идете, когда

открываете дверь, когда едете на велосипеде против ветра, когда тормозите... Каждый раз, когда существует «контакт», это значит, что электроны, присутствующие в атомах двух тел, сблизилась настолько, чтобы взаимодействовать друг с другом и отталкиваться электростатической силой. Конечно, электростатическая сила – сила, действующая на расстоянии, но расстояние в данном случае атомного уровня, то есть микроскопическое, а значит, действует как при полноценном контакте.



ПРИНЦИП ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В случае с гравитацией и электростатикой силы двух тел, воздействующих друг на друга, равны. Поскольку это две основополагающие силы, управляющие нашей жизнью, это значит, что это справедливо также для «контактных» сил нашего масштаба.

Этот закон, просто выведенный из выражения двух фундаментальных сил, был сформулирован Ньютоном: он состоит из «закона действия и противодействия», называемого также «законом взаимодействия». Если вы действуете на предмет с определенной силой, он действует с той же силой на вас. Например, если вы бросаете мяч вперед в бассейн, ваше тело слегка отклонится назад.

На этом принципе строится функционирование ракеты: газы, сгорающие в сопле, выбрасываются вниз, в свою очередь толкая ракету вверх, что позволяет ей взлететь!

Необходимо усвоить, что этот закон можно рассматривать как простое следствие проявления двух фундаментальных сил.

Электростатическая сила также лежит в основе электричества: оно есть не что иное, как перемещение электронов, движимых электростатической силой. Более подробно мы остановимся на нем в соответствующем разделе.

Если добавить к этому, что фотоны, из которых состоит свет, являются посланниками электростатической силы, станет ясно, что электростатика превалирует в нашей жизни в наимельчайших деталях.



ПОСЛЕДНИЙ ВЗГЛЯД НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ

Пытаясь определить сущность силы, мы убедились, что ускорение объекта, вероятно, зависит от свойственного объекту параметра, называемого «инертной массой», откуда выражение $F^{\rightarrow} = m a^{\rightarrow}$; (где m – инертная масса).

На самом деле это справедливо только для одной из двух фундаментальных сил – электростатической. При гравитационном взаимодействии, как мы убедились, ускорение не зависит от инертности объекта.

Почему же в конечном итоге мы пишем, что $F^{\rightarrow} = m a^{\rightarrow}$, а не $F^{\rightarrow} = a^{\rightarrow}$? Потому что все «контактные» силы, управляющие нашей повседневной жизнью, являются выражением электростатической силы и приводят к ускорению, зависящему от инертности объекта.

Если бы в нашей жизни превалировала гравитация, равное ускорение двух объектов в свободном падении нас ни капли не удивило бы. Но нас сильно бы озадачило, что толкнуть массивный объект гораздо труднее, нежели какую-то безделушку.

Равное ускорение двух объектов в свободном падении, может, и не так уж таинственно. А вот равенство гравитационной и инертной массы выглядит по-прежнему загадочно, ибо оно предполагает, что гравитационная масса участвует в электростатическом взаимодействии.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Электростатическая сила прямо пропорциональна зарядам взаимодействующих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния, которое их разделяет.
- Одинаковые заряды отталкиваются, противоположные – притягиваются.
- Как и гравитация, она подтверждает закон о взаимодействии, который, таким образом, оказывается применим к любой силе.
- В основном она касается протонов и электронов на атомном уровне, но тем самым позволяет объяснить все «контактные» силы, действующие в нашем масштабе.
- Фотоны, составляющие свет и все электромагнитные излучения, являются частицами-посланниками этой силы.
- Электричество – особая область применения, где электроны приводятся в движение посредством электростатической силы.

4. Контактные силы

Теперь, когда мы объяснили природу электростатической силы, мы сможем представить различные контактные силы, существующие на нашем уровне, которые из нее проистекают.

Они включают контакт с воздухом или водой, что позволит нам ввести понятие давления и объяснить природу силы Архимеда. Это поможет нам понять, почему на высоте давление понижается, как летают воздушные шары и как плавают некоторые предметы.

Электростатическая сила покажется нам далекой. И действительно, в каждом кубе материи со стороной 1 мм заключено примерно сто миллиардов миллиардов атомов, то есть невозможно рассмотреть действие электростатической силы для каждого из них в отдельности, чтобы вывести результат для нашего масштаба. Так что придется обойтись эмпирическими законами, выведенными с помощью опытов. Эти законы не являются фундаментальными, ибо они лишь следствие электростатической силы.

1. Взаимодействие твердых тел

Влияние шероховатости

Сила реакции опоры

Когда мы стоим прямо и неподвижно, на нас действует сила почвы. Согласно формуле $ma^{\rightarrow} = F^{\rightarrow}$; наш вес должен сообщать нам ускорение, направленное вниз: если этого не происходит, значит, сопротивление почвы полностью компенсирует наш вес.

Не существует никакого специального выражения, описывающего силу, не дающую нам провалиться сквозь землю: каждый раз эта сила такой мощности, чтобы объект не мог пройти сквозь опору (мы рассматривали причину этого на атомном уровне).

Таким образом, чем больше вес предмета, поставленного на поверхность, тем больше сила, с которой поверхность действует на тело, чтобы свести ускорение к нулю.

Если предмет ни в коем случае не может иметь перпендикулярного ускорения на плоской поверхности, зато он может иметь ускорение, направленное вдоль поверхности. Например, если мы положим кусок льда на наклонную поверхность (**→ рис. 4.1 а**): часть его веса побуждает его пройти сквозь поверхность, но эта часть встречает противодействие

поверхности. Другая часть веса влечет лед вниз по склону, эту часть ничто не уравнивает, и лед скользит вниз. Теперь заменим лед на что-нибудь более шершавое, например на резину (→ **рис. 4.1 б**): при условии, что склон будет не слишком крутым, мы убедимся, что резина останется на месте. Это означает, что на этот раз «что-то» оказывает некоторое дополнительное воздействие, которое мешает весу заставить тело пройти сквозь опору. Чтобы таким образом нейтрализовать действие веса, эта новая сила направлена вдоль склона и вверх.

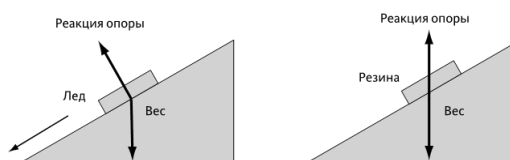


Рис. 4.1 – Силы, действующие на лед и резину на наклонной поверхности

(б) – действие веса и реакция опоры вместе составляют силу, толкающую лед вниз по склону. **(б)** – в реакции опоры одна из составляющих сил, благодаря контакту с шершавой поверхностью, направлена вверх, что сводит общую силу к нулю.

В итоге мы можем разделить реакцию опоры на две составляющих:

- «нормальная» составляющая (перпендикулярная поверхности), которая не дает объекту пройти сквозь опору;
- тангенциальная составляющая (действующая вдоль поверхности), препятствующая скольжению объекта вдоль поверхности (→ **рис. 4.2**).

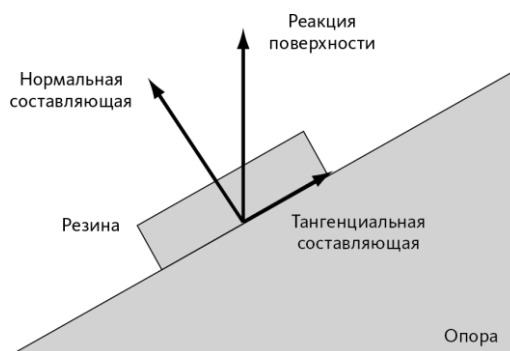


Рис. 4.2 – Составляющие реакции опоры

Микроскопические аспекты контакта

Как поверхность может проявлять тангенциальную силу? Чтобы точно понять, что происходит, нужно ближе присмотреться к месту соприкосновения резины и поверхности, на микроскопическом уровне (этот уровень будет промежуточным между размером атома и резины).



Рис. 4.3 – Соприкосновения двух твердых тел: вид под микроскопом

На **рис. 4.3** показано, что мы рассматриваем в данном случае: поверхность соприкосновения двух твердых тел, которая при взгляде невооруженным глазом кажется гладкой, но на деле вся состоит из бугорков. Даже хорошо отполированная поверхность на микроскопическом уровне представляет собой ту же картину.

Мы убедились в следующем:

- Прежде всего, контакт происходит на уровне маленьких бугорков двух твердых тел, а вовсе не вдоль поверхности. То есть, несмотря на видимость, два твердых тела прикасаются друг к другу лишь частично, а большую часть так называемой «контактной зоны» занимает воздух.

- Затем мы видим, что «бугорки» в какой-то степени цепляются друг за друга, что не дает двум поверхностям скользить друг по другу. Именно это объясняет неподвижность резинки даже на наклонной поверхности: таким образом, мы видим, что сила, с которой поверхность действует на предмет, проявляется не только перпендикулярно, но и вдоль.

Трение твердых тел

Продолжим наш опыт и положим резину на плоскую поверхность, которую будем постепенно наклонять: мы убедимся, что при определенном угле наклона резина поедет вниз. Это значит, что существует предел, за которым соприкосновение с шершавым предметом перестает уравнивать силу, придающую ускорение, в данном случае вес. Тангенциальная реакция опоры проявляется здесь в виде трения: она препятствует скольжению предмета и тормозит его.

Проведем пару небольших опытов, чтобы определить силу этого трения твердых тел. Возьмите какой-нибудь предмет (например, эту книгу) и заставьте ее скользить по поверхности, просто подталкивая ее: если все идет нормально, это будет нетрудно...

Теперь сделайте то же самое, сильно надавив на предмет, который вы заставляете скользить: тем самым вы увеличиваете нормальную реакцию поверхности, которая не дает предмету пройти сквозь нее. Теперь вы чувствуете, что двигать предмет стало намного труднее.

Если точнее, сила трения твердых тел прямо пропорциональна силе нормальной реакции опоры (→ **рис. 4.4**).

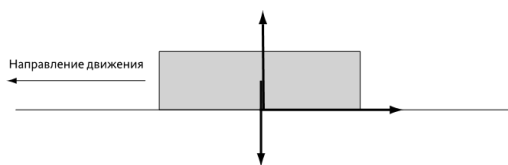


Рис. 4.4 – Силы, приложенные к предмету,двигающемуся по поверхности

В данном примере нормальная реакция ($N^{\rightarrow}$;) компенсирует вес ($P^{\rightarrow}$;) . Тангенциальная составляющая ($F^{\rightarrow}$;) соответствует трению твердых тел. T пропорционально N .

Эта формула была выведена Шарлем де Кулоном, который дал свое имя этому закону. Если $F_{тр}$ – сила трения твердых тел, а N – сила нормальной реакции опоры, мы получаем выражение $F_{тр} = \mu \cdot N$, где μ – коэффициент трения, который зависит от рода вещества (чем более шершавая поверхность, как у резины, тем больше сила трения $F_{тр}$).



ВЕСЬМА ПОЛЕЗНАЯ ШЕРОХОВАТОСТЬ

Трение твердых тел может показаться большим неудобством, препятствующим движению; на самом же деле микроскопические неровности, лежащие в основе трения, абсолютно необходимы для движения по любой поверхности. Если бы наши ноги не «цеплялись» за землю на микроскопическом уровне, ходить было бы невозможно: наши ноги скользили бы как на льду, и мы не могли бы продвинуться вперед ни на шаг.

Если точнее: когда резина стремится поехать вниз по склону, сила трения действует в обратном направлении, чтобы ее остановить. И наоборот, когда мы

ставим ногу на землю, а потом пытаемся сдвинуть ее назад, сила трения направлена вперед, чтобы не дать ноге сдвинуться: речь идет о нашей силе тяги, единственной, которой мы располагаем.

Та же картина наблюдается со всеми видами наземного транспорта: машинами, поездами... Колесо, крутящееся на гладком льду, останется на месте, ибо не возникает никакой силы, направленной вдоль поверхности (см. схему ниже). Зато шершавая поверхность создает тангенциальную силу, препятствующую скольжению: колесо больше не скользит по поверхности. С другой стороны, тангенциальная реакция толкает колесо вперед: колесо вертится, не скользя.

Отсюда вывод: шероховатость поверхности не только не препятствует поступательному движению транспортного средства (нет движения, значит, нет и силы трения), но именно она и является движущей силой, перемещающей машину. Какой переворот произвело изобретение колеса!

Для движения колеса необходимы хорошие шероховатые материалы: дорожное покрытие и резиновые шины. Лучшие шины те, которые имеют наилучшее сцепление с дорогой.



(а) – из-за гладкости поверхности на колесо не действует сила трения: колесо стоит на месте. **(б)** – благодаря шероховатости поверхности тангенциальная реакция опоры выступает движущей силой: именно она заставляет машину двигаться.

Вернемся к опыту с куском резины на наклонной поверхности. При определенном угле наклона резина начинает скользить вниз. Возьмем брусок из такой же резины, но более тяжелый и крупный: брусок начинает съезжать при том же угле наклона.

Здесь уравниваются две силы:

- больший вес более крупного бруска сильнее толкает его вниз;
- больший вес более крупного бруска вызывает более сильную реакцию наклонной опоры а следовательно, и более сильное трение.

Простое математическое выражение показывает, что две силы компенсируют друг друга. Иными словами: угол начала движения зависит только от материала соприкасающихся поверхностей – и это отличный способ измерить коэффициент трения различных материалов.

Пружинящая сила!

Подвесим лампочку на нитку: лампочка висит неподвижно, что означает, что сила натяжения нити компенсирует вес лампочки. По примеру реакции опоры сила натяжения нити всегда адаптируется к величине веса подвешенного предмета.

Теперь заменим нить на пружину: если к ней не подвешен предмет, пружина имеет «естественную» длину, которую физики называют длиной без нагрузки. Если мы подвесим на пружину лампочку, пружина растянется на некоторую длину. Если мы подвесим на нее предмет вдвое тяжелее, мы увидим, что растяжение пружины увеличилось вдвое (→ рис. 4.5). Это значит, что растяжение пружины пропорционально приложенной к ней силе.

Если мы обозначим приложенную силу F , а x – растяжение пружины по отношению к длине без нагрузки, получается, что $F = kx$.

k называется коэффициентом упругости пружины: чем она больше, тем пружина жестче, то есть растягивается или сжимается с трудом.

F соответствует силе, с которой предмет действует на пружину: то есть это также и сила действия пружины на предмет (принцип взаимодействия). Эта сила стремится вернуть пружину к длине без нагрузки: это называется силой упругости пружины.

Выражение $F = kx$ важно, потому что оно означает, что пружину с определенным коэффициентом упругости можно использовать для измерения сил, – здесь попросту используется измерение длины. Пружина, измеряющая силу, называется «динамометр». Мы уже использовали его для измерения гравитационной и электростатической силы в предыдущих разделах (→ **рис. 2.2** и **3.1**).

Кроме того, пружины служат амортизаторами в транспортных средствах. Отметим также, что многие физические явления (в частности, на атомном уровне) происходят благодаря силам, действующим по типу пружины, которые не стоит недооценивать.

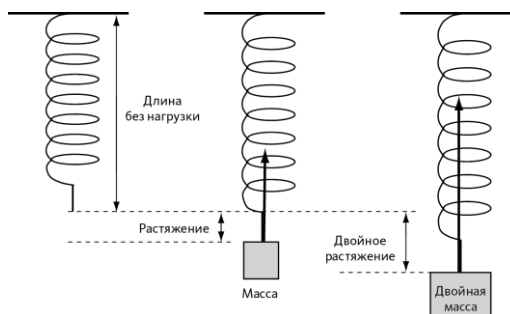


Рис. 4.5 – Сила упругости пружины

2. Трение в текучей среде

Некоторые уточнения о состоянии разных видов материи

Мы называем текучей средой (флюидом) жидкости и газы в противоположность жесткости твердых тел. В отличие от твердого тела текучую среду можно «пройти насквозь». Чтобы это понять, рассмотрим разницу на микроскопическом уровне:

- В твердом теле атомы и молекулы «склеены» друг с другом и могут лишь колебаться в пределах определенной позиции, которая остается неизменной. Благодаря отталкивающей электростатической силе заряды, составляющие атомы этих тел, не позволяют другим телам проходить насквозь.

- В жидкостях молекулы всегда соприкасаются, но могут также проникать друг в друга и перемещаться таким образом на большие расстояния. Тело может проникнуть внутрь жидкости, раздвигая молекулы с помощью той же отталкивающей электростатической силы.

- В газе молекулы не связаны друг с другом, и каждая перемещается по своей траектории. Часто происходит их столкновение между собой. Перемещение тела в таком типе текучей среды еще легче, чем в жидкости.

Происхождение разницы этих трех состояний материи мы детально рассмотрим в главе 11.

Происхождение трения в текучей среде

Когда вы плаваете в воде или едете на велосипеде против ветра, вы чувствуете сопротивление текучей среды: оно происходит из-за электростатического отталкивания между молекулами текучей среды и вашими атомами. Чтобы продвигаться вперед, вам необходимо расталкивать эти молекулы, что требует приложения некоторой силы. Чем выше ваша скорость, тем больше молекул вам приходится «отталкивать» за определенный

промежуток времени и тем большую силу приходится прикладывать.

Таким образом, сила вязкого трения, действующая на объект, повышается по мере того, как увеличивается скорость объекта по отношению к текучей среде.

Вывод совершенно логичный, однако у твердых тел с трением все обстоит совсем не так: как мы видели, у твердых тел оно не зависит от скорости, а зависит лишь от рода вещества и силы, приложенной перпендикулярно опоре.

Напрашивается вывод, что трение текучей среды пропорционально относительной скорости тела по отношению к среде. Однако это не всегда так, и закон тут совсем не прост.

В случае с вязкой текучей средой, такой как масло, эта пропорциональность хорошо проверена: в данном случае $F = kv$, где v – относительная скорость, а k – коэффициент динамической вязкости.

Но в воздухе, особенно при высоких скоростях, сила трения скорее пропорциональна относительной скорости в квадрате: $F = kv^2$. Это значит, что с ростом скорости трение увеличивается гораздо быстрее⁵. Для других случаев ни один из этих законов по-настоящему не проверен, и мы постепенно переходим от одного к другому.

Нам пока что достаточно констатировать, что трение растет при увеличении скорости, что уже позволяет сделать несколько интересных выводов.

Последствия трения в текучей среде

Когда вы прыгаете из летящего самолета, на вас действуют две силы: ваш вес и сила сопротивления воздуха. По мере того как вы падаете, ваша скорость увеличивается благодаря весу. Но чем выше ваша скорость, тем сильнее трение воздуха, тогда как ваш вес не увеличивается ни на грамм. Таким образом, вы быстро достигнете скорости, при которой сила трения станет равна вашему весу: на этом этапе две силы уравновесят друг друга, и ускорение исчезнет. Ваша скорость станет стабильной и останется такой до конца.

Это значит, что прыжок со скалы высотой 1000 м или с самолета на пятикилометровой высоте даст почти один и тот же эффект: в момент, когда вы коснетесь земли, ваша скорость в обоих случаях будет идентичной, потому что вы успеете достичь предельной скорости, когда обе силы будут уравновешены. Единственный способ изменить вашу скорость при приземлении – изменить коэффициент трения: этого просто достичь, увеличив свою «парусность», то есть подставив ветру как можно более широкую поверхность. Таков принцип действия парашюта, который настолько снижает предельную скорость, что позволяет приземлиться безболезненно, какой бы ни была высота прыжка.

И напротив, уменьшения «парусности» стремятся достичь при производстве некоторых автомобилей, самолетов и высокоскоростных поездов. Улучшение аэродинамики транспортного средства поможет снизить движущую силу для поддержания заданной скорости.

Вездесущность трения неизбежных на Земле текучих сред помогает понять старую ошибку Аристотеля. Чтобы уравновесить трение текучей среды, пропорциональное скорости, необходимо, чтобы движущая сила была также пропорциональна скорости: чем быстрее едет машина, тем большую силу надо приложить, чтобы поддерживать скорость постоянной.

Так, заданная сила позволяет достичь заданной скорости, но не заданного ускорения: в качестве определения силы нам хочется написать $\vec{F} = k\vec{v}$; (где $\vec{v}$ – скорость), а не $\vec{F} = m\vec{a}$; (где $\vec{a}$ – ускорение).

Вот почему Аристотель писал: «Чем выше скорость, тем больше сила, которая на нас действует, и тем сильнее нас прижимает к сиденью». Тогда как на деле нас прижимает к сиденью при сильном *ускорении*. Понадобилась проницательность Галилея и Ньютона,

⁵ Это уже будет сила сопротивления воздуха, или аэродинамическое сопротивление.

чтобы освободиться от обманчивых тисков трения текучей среды и постичь истинную суть вещей.

3. Сила, которая давит

Столкновение молекул

Очень мощная сила

Теперь сосредоточим внимание на воздухе, который нас окружает и которым мы дышим: как мы видели, на нас действует сила его трения, когда мы двигаемся. Но его воздействие на этом не заканчивается.

Как все газы, воздух, хотя и кажется неподвижным, состоит из молекул, перемещающихся с очень большой скоростью: в среднем примерно 1800 км/ч. С другой стороны, несмотря на то что воздух прозрачен, число молекул в нем весьма высоко: более десятка миллиардов миллиардов молекул в одном кубическом сантиметре. Это значит, что молекулы не могут двигаться, постоянно не задевая соседей: по правде сказать, одна молекула испытывает несколько миллиардов ударов в секунду. От таких цифр голова идет кругом...

Это также означает, что одна молекула не может преодолеть большое расстояние, не стукнувшись о другую: между ними примерно в десять тысяч раз меньше миллиметра. Это объясняет, почему мы не чувствуем никакого движения воздуха при отсутствии ветра.

Эти несколько цифр тем не менее важны, потому что они означают, что каждую секунду по нашей коже барабанит невообразимое число молекул. Их мощная сила воздействует на каждый предмет, с которым они сталкиваются, и называется силой давления.

Эта сила не движет нас, поскольку воздействует на нас как «спереди», так и «сзади». Но давайте встанем перед комнатой, внутри которой вакуум (из нее выкачали воздух), и откроем дверь. На этот раз давление действует только сзади, а спереди его нет. Достаточно ли оно сильное, чтобы толкнуть нас вперед?

Результат очевиден: давление воздуха более чем в сотню раз больше нашего веса! то есть нас понесет вперед словно соломинку... По крайней мере, такой результат мы привыкли видеть в фильмах о космосе, однако не следует забывать, что эта мощная сила воздействует на нас одновременно со всех сторон.

Почему же эти удары по нашему телу не вредят нам? Потому что наше тело не пустое... Внутри нашего тела есть вода и воздух (кроме всего прочего!), которые испытывают то же давление, которое действует на нас снаружи: если бы этого не было, наше тело моментально заполнилось бы воздухом, чтобы восстановить равновесие.

Так происходит, когда вы спускаетесь с гор. На равнине давление выше, чем на высоте. По мере того как вы спускаетесь, внешнее давление на ваше тело становится все выше по сравнению с давлением внутренним. Тогда достаточно сглотнуть, чтобы впустить воздух в уши и уравновесить давление.



ДАВЛЕНИЕ

В предыдущих абзацах мы говорили о «давлении» и о «силе давления», не уточняя, в чем разница, а она там все-таки есть: согласно определению, давление — это сила, действующая на единицу площади.

Таким образом, какая бы сила ни была приложена, ее можно связать с давлением. Например, если вы толкаете какой-то предмет, это значит, что вы оказываете на него давление.

Понятие давления часто гораздо более выразительно, чем понятие силы. Например, Эйфелева башня оказывает на почву такое же давление, как и стул, на котором сидит человек... Это значит, что в обоих случаях почва продавится на одинаковую глубину, потому что сила, приложенная к определенной поверхности, будет одинаковой.

Причина в том, что ножки у стула очень тонкие, то есть вся сила будет сосредоточена в определенных точках. В то же время опоры башни гораздо шире... Сила, с которой башня давит на землю, гораздо больше, чем сила стула, но она распределяется по более широкой поверхности: здесь понятие давления будет нам особенно полезно, чтобы понять, как отреагирует поверхность...

И напротив, понятие приложенного давления не столь полезно в случае, если вы толкаете машину: здесь общая мощность приложенной силы поможет понять, сдвинете ли вы машину с места, а не единица площади, к которой она приложена.

Давление, которое оказывает воздух на стену, из-за столкновения молекул является лишь частным случаем силы, действующей на единицу площади, можно также говорить о давлении жидкости на твердое тело (как в примерах выше). Во всех случаях это давление связано с контактом атомов и молекул, которые не могут проникать друг в друга из-за электростатического взаимодействия.

Молекулы сталкиваются друг с другом и внутри воздуха, а не только с объектом, который помещают в их среду. То есть можно констатировать, что давление существует в любой точке воздуха. Это давление может выражаться в паскалях (в метеорологии чаще используют «гектопаскаль») или в барах: 1 бар примерно соответствует давлению атмосферы над уровнем моря. С другой стороны, 1 миллибар соответствует 1 гектопаскалю.

Давление также можно измерить внутри жидкости и твердого тела.

Изменение давления на высоте

Это привело нас к новому вопросу: почему на высоте давление становится ниже?

Молекулы воздуха, как и все остальное, притягиваются к Земле гравитацией. То есть они стремятся сосредоточиться ближе к поверхности Земли, но из-за этого число молекул у поверхности увеличивается, и количество их столкновений тоже: иными словами, давление здесь выше.

Между тем сила высокого давления воздействует на низкое (именно она толкает вас вперед, когда вы стоите на пороге комнаты, из которой выкачан воздух), то есть здесь она направлена вверх. В конечном счете давление, направленное вверх, компенсирует вес, сила которого направлена вниз, и таким образом атмосфера находится в равновесии.

Похожий вывод справедлив и для воды, но в более ярко выраженном виде: подобно тому как стоит подняться на высоту 5000 м, чтобы давление воздуха снизилось вдвое, так достаточно погрузиться на 10 м под воду, чтобы давление воды удвоилось. Это происходит потому, что вода гораздо плотнее воздуха, поскольку ее молекулы проникают друг в друга (в этом разница между жидкостью и газом): при одном и том же объеме вес воды гораздо больше веса воздуха (кубический метр воды весит около 1000 кг, а воздуха только 1 кг). Соответственно, вода гораздо сильнее сжата собственным весом, и давление в ней очень быстро нарастает (давление на дне океана в сотни раз больше атмосферного!)

Сила Архимеда

Изменение давления на разной глубине помогает понять один простой феномен: мы можем плавать в воде, хотя наш вес должен был бы нас утопить. Мы видели, что направление силы давления меняется от высокого к низкому: поскольку на глубине давление увеличивается, эта сила направлена вверх, и отчасти она компенсирует наш вес. Этот феномен называется «силой Архимеда».

Если точнее, мы видели, что более мощное давление на глубине в точности

уравновешивает вес воды⁶. Это значит, что его недостаточно, чтобы компенсировать вес предмета «более тяжелого, чем вода», который тонет. Но оно больше веса предмета «более легкого, чем вода», который всплывает на поверхность.



НЕКОТОРЫЕ ДОПОЛНЕНИЯ

Рассмотрим предмет, который плавает по воде: сила Архимеда полностью компенсирует его вес, поэтому он не испытывает никакого ускорения. Эта сила равна весу жидкости, вытесненной предметом: вес воздуха слишком мал по сравнению с весом воды, поэтому главное действие оказывает вода.

То есть сила Архимеда пропорциональна объему погруженной в воду части предмета: если предмет очень легкий, достаточно небольшого погруженного объема, чтобы компенсировать его вес. Так происходит с теннисным шариком, который плавает по поверхности, едва погружаясь в воду.

Но если плотность предмета приближается к плотности воды, ему понадобится погрузиться почти полностью, чтобы сила Архимеда компенсировала его вес. Так происходит с телом человека: оно содержит большое количество воды, и его плотность почти та же, что у воды, а значит, оно практически готово утонуть.

Сделайте глубокий вдох: в вашем теле будет больше воздуха, и ваш объем увеличивается. Ваша плотность станет меньше, чем плотность воды, и ваше тело будет держаться на поверхности.

Сделайте глубокий выдох: ваш объем уменьшится, и вы начнете тонуть! Тогда вам придется слегка шевелить руками, чтобы удержаться на поверхности.

Возьмем другой пример: каждый знает, что при определенном весе лед имеет больший объем, чем жидкая вода (именно поэтому зимой лопаются канализация, когда вода замерзает). Это значит, что лед плавает по воде, и это объясняет существование айсбергов.

Но разница в объемах остается совсем незначительной: так, айсберг почти полностью погружен в воду (почти как человеческое тело), на поверхности остается лишь малая его часть. Подводная часть айсберга, составляющая почти 90 % его объема, совершенно неразличима на первый взгляд, и поэтому льдина представляет большую опасность для проходящих мимо судов.

Следовательно, сила Архимеда, направленная вверх, равна весу, который имел бы предмет, погруженный в воду, если бы он был таким же тяжелым, как вода (не в прямом смысле «таким же тяжелым»: той же массы при определенном объеме, то есть той же плотности). Легко обобщить вышесказанное для тела, частично погруженного в жидкость, следующим образом:

«Сила Архимеда равна весу жидкости, вытесненной телом».

Сила Архимеда действует также и в воздухе, но не столь явно, потому что давление по мере увеличения высоты меняется медленнее. Именно она позволяет летать предметам, которые «легче воздуха», – воздушные шары, аэростаты.

Наконец, нужно помнить, что летательные аппараты могут летать, потому что давление воздуха под воздушным шаром выше, чем над ним, из-за гравитации. Само это давление образуется из-за столкновений молекул воздуха со стенками воздушного шара, а столкновения происходят из-за электростатического отталкивания между зарядами, составляющими атомы этих молекул.

Мы вернулись к тому, с чего начали! Даже если связь между двумя фундаментальными силами Вселенной обнаружить становится все сложнее...

⁶ Уточним: не давление уравновешивает вес, а сила. (Прим. науч. ред.)



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Реакция опоры делится на две части: нормальная составляющая, которая не позволяет предмету пройти сквозь опору, и тангенциальная составляющая, возникающая из-за шероховатости опоры, которая препятствует движению.
- Трение твердых тел пропорционально силе, действующей перпендикулярно опоре. Оно не зависит от скорости.
- Сила упругости пружины прямо пропорциональна изменению длины пружины по отношению к ее длине без нагрузки.
- Трение в текучей среде увеличивается по мере увеличения скорости движения в ней.
- Сила давления воздуха возникает от столкновения его молекул с любым предметом, который в нем присутствует. Из-за гравитации давление уменьшается по мере увеличения высоты и увеличивается под водой по мере погружения.
- Сила Архимеда, действующая на предмет, равна весу жидкости, вытесненной этим предметом, и направлена вверх. Она возникает из-за изменений давления на высоте и в глубине. Она объясняет, почему тело с плотностью большей, чем плотность жидкости, тонет, а с меньшей плотностью поднимается на поверхность.

5. Силы инерции

Когда мы находимся внутри машины, которая поворачивает направо или тормозит, наше тело, соответственно, наклоняется влево или вперед. Эти силы, воздействие которых мы ощущаем, не связаны с материальной окружающей средой. Их называют силами инерции, которые включают в себя «переносную силу» и «силу Кориолиса». Мы увидим, что их существование весьма относительно: оно зависит от инерциальной системы отсчета так же, как движение Солнца вокруг Земли, которое по сути лишь видимость. Эти силы также оказывают огромное влияние на жизнь на Земле: в частности, они влияют на ветра и морские течения, которые, в свою очередь, оказывают значительное влияние на климат.

В конце этой главы мы вернемся к гравитации и увидим, что ее существование также зависит от точки зрения наблюдателя: образ Вселенной, где гравитации не существует, более чист концептуально. Это будет поводом сделать первый шаг к парадигме общей теории относительности.

1. Происхождение сил инерции

Псевдосилы

Движение в неинерциальной системе отсчета

Мы рассмотрели почти все силы, которые влияют на нас в повседневной жизни. Можно было бы прибавить силу магнитного поля, не столь очевидную, влияние которой ощущается не часто и природа которой гораздо сложнее. Ее описание мы оставим для главы, где более подробно остановимся на электромагнетизме.

В инерциальной системе отсчета именно совокупность этих сил (и только этих сил) в случае необходимости придает нам ускорение: $m\vec{a} = \vec{F}$. Таким образом, мы можем понять движение любого объекта, просто наблюдая за его окружением.

Проблема в том, что в некоторых случаях опыт показывает, что наша земная система отсчета, столь важная для нас, не является инерционной: такое происходит, когда мы наблюдаем за движением воздушных масс или океанов. Этому невозможно найти

объяснение, если мы примем в расчет только влияние окружающей среды. Это будет равносильно тому, как если мы будем рассматривать движение предмета внутри машины или поезда.

Мы уже давали этому некоторое объяснение с помощью **рис. 1.3** и **1.4**. Теперь мы рассмотрим все более подробно, чтобы лучше понять природу движения, с которым нам предстоит столкнуться в этих неинерциальных системах отсчета.

Вспомним наш опыт с мячом, лежащим на горизонтальной поверхности в машине. Если машина едет с постоянной скоростью по прямой, мяч будет неподвижен: реакция опоры полностью компенсирует его вес. Общая сила воздействия на мяч, следовательно, равна нулю (объект псевдоизолированный), и, как следствие, ускорение мяча тоже: уравнение $m\vec{a}; = \vec{F};$ вполне применимо, так как машина является инерциальной системой отсчета.

Теперь, если машина затормозит, мяч покатится вперед (потому что он стремится сохранить постоянную скорость относительно дороги): это показано на **рис. 1.4**, который мы воспроизвели ниже ($\rightarrow$ **рис. 5.1**). На этот раз возникает ускорение по отношению к машине, хотя окружающая среда не изменилась.

Итак, у нас есть выбор между двумя вариантами:

- либо мы считаем, что уравнение $m\vec{a}; = \vec{F};$ больше неприменимо и нужно найти другой закон;
- либо мы считаем, что уравнение $m\vec{a}; = \vec{F};$ должно всегда удовлетворять определению силы. Это подразумевает, что сила $\vec{F};$ теперь не просто зависит от окружающей среды, поскольку она указывает, что $\vec{F}; = 0;$, тогда как $\vec{a}; \neq 0;$.

Мы будем придерживаться второго варианта, чтобы по возможности не нарушать интуитивного смысла силы: если ускорение мяча направлено вперед, значит, некая сила толкает его вперед.

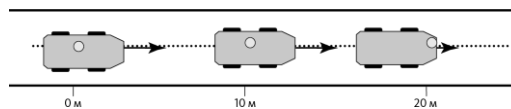


Рис. 5.1 – Машина в процессе торможения

Ускорение, связанное с ускорением системы отсчета

Из чего рождается эта сила? Ответ прост.

- машина тормозит, ее скорость по отношению к дороге уменьшается;
- мяч сохраняет постоянную скорость по отношению к дороге;
- следовательно, мяч ускоряется по отношению к машине, что хорошо видно на **рис. 5.1**.

Иначе говоря, ускорение, направленное вперед и действующее на мяч в системе отсчета машины, является результатом «отрицательного ускорения» машины по отношению к дороге.

Теперь рассмотрим случай, когда машина поворачивает влево с постоянной скоростью. Это **рис. 1.3**, который мы воспроизводим ниже ($\rightarrow$ **рис. 5.2**)

Мяч катится вправо, то есть на него действует сила, направленная вправо.

Уточним:

- по отношению к дороге машина поворачивает налево;
- мяч стремится сохранить прямолинейную траекторию по отношению к дороге;
- следовательно, мяч катится вправо по отношению к машине, что хорошо видно на **рис. 5.2**.

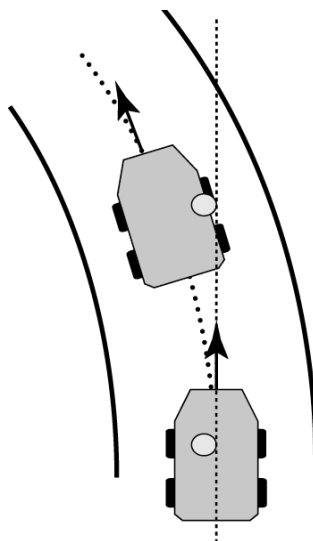


Рис. 5.2 – Машина в процессе поворота налево

Иначе говоря, сила, направленная вправо и действующая на мяч в системе отсчета машины, возникает из-за «ускорения влево» машины по отношению к дороге.

В обоих случаях машина приобретает ускорение в инерциальной системе отсчета (дороге), что вызывает «обратное ускорение» мяча по отношению к машине: если машина ускоряется влево по отношению к дороге, мяч ускоряется вправо по отношению к машине. Если машина «ускоряется назад» (тормозит) по отношению к дороге, мяч «ускоряется вперед» по отношению к машине.

Следовательно, в системе отсчета машины «псевдоизолированный объект», которым является мяч, испытывает ускорение $\vec{a}^-$, противоположное ускорению $\vec{a}^+_{;e}$ машины по отношению к инерциальной системе отсчета дороги.

Мы запишем это как $\vec{a}^- = -\vec{a}^+_{;e}$. Ускорение $\vec{a}^+_{;e}$ называется «переносным ускорением».

Поскольку мы хотим привести это к уравнению $\vec{F}^- = m\vec{a}^-$, получается, что $\vec{F}^- = -m\vec{a}^+_{;e}$, это сила, действующая на изначально неподвижный мяч внутри машины. Ее называют силой инерции переноса и обозначают $\vec{F}^-_{;ie}$.

«Фиктивная» сила?

Мы видим, что эта сила не связана с материальным окружением и отражает лишь некоторую точку зрения (человека в машине). Но мяч только продолжает прямолинейное равномерное движение по отношению к дороге. Человек, стоящий у края дороги, увидит, что мяч просто катится прямо, в то время как машина поворачивает налево.

И нам хочется назвать эту силу фиктивной, кажущейся, которой на самом деле не существует. Однако для человека в машине, который наблюдает странные перемещения мяча, эта сила отнюдь не фиктивна, и мы склонны дать ей название псевдосилы.

В предыдущем примере мы говорили о силе инерции переноса. С помощью других, более общих примеров мы обнаружим другие силы инерции того же происхождения, но с несколько другими последствиями. Их беглый обзор мы сделаем в следующих абзацах.

Запомним: «сила инерции» – это сила, возникающая при движении в неинерциальной системе отсчета по отношению к другой системе отсчета, которая является инерциальной. Она является псевдосилой в том смысле, что не зависит от материальной окружающей среды, а присуща рассматриваемой системе отсчета.

Подведем итог с помощью примера довольно близкого к предыдущим: предположим, что человек бросает мяч вперед со скоростью 1 км/ч в машине, поворачивающей налево со скоростью 50 км/ч.

• С точки зрения человека, стоящего у края дороги, мяч продолжает равномерное прямолинейное движение со скоростью 51 км/ч (→ **рис. 5.3.а**).

• С точки зрения человека в машине мяч описывает дугу вправо со скоростью, которая, по крайней мере, вначале равна 1 км/ч ($\rightarrow$ **рис. 5.3.b**).

Человек у дороги не видит проявления какой-либо силы, но человек в машине «видит» действие силы вполне реальной.

Сила переноса и сила Кориолиса

Если в предыдущем параграфе мы рассмотрели понятие «силы инерции», то пока еще не во всех ее аспектах. Чтобы дать более исчерпывающий ответ, рассмотрим пример, когда ребенок катит мяч, сидя на крутящейся карусели. Если не учитывать силу трения мяча, мы снова имеем дело с «псевдоизолированным» предметом: на него действуют только силы инерции.

Земная система отсчета в данном примере является инерционной, и с точки зрения человека, который сидит рядом с каруселью, мяч движется равномерно и прямолинейно. Но в системе отсчета карусели его движение гораздо более сложное.

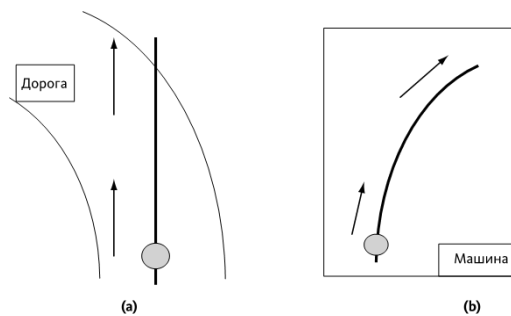


Рис. 5.3 – Траектория мяча с двух разных точек зрения

(a) – траектория с точки зрения человека, стоящего у края дороги (она соответствует пунктирной прямой на **рис. 5.2**).

(b) – траектория с точки зрения человека в машине (видно, что мяч приближается к правой стенке машины на **рис. 5.2**).

Центробежная сила

Предположим, что ребенок просто положил мяч на пол карусели. Что произойдет с мячом?

С точки зрения человека рядом с каруселью шарик с самого начала обладает скоростью благодаря вращению карусели. Между тем с его точки зрения мяч будет стремиться продолжать движение прямо, в то время как под ним вращается карусель, то есть мяч в конечном итоге упадет с карусели, как можно видеть на **рис. 5.4.a**.

С точки зрения ребенка на карусели мяч, сначала неподвижный, катится к краю карусели, потому что в итоге он с нее упадет ($\rightarrow$ **рис. 5.4.b**): есть ускорение, направленное к краю, что объясняет существование силы инерции в системе отсчета карусели. Речь идет о центробежной силе, которая выталкивает каждый предмет за пределы вращающейся системы отсчета.

Именно эту силу мы и описывали в примере с машиной, где мяч катился вправо, когда машина поворачивала налево. Здесь сила также направлена к краю поворота: именно она прижимает пассажиров к правой дверце.

Центробежная сила является частью того, что мы называем силой переноса.

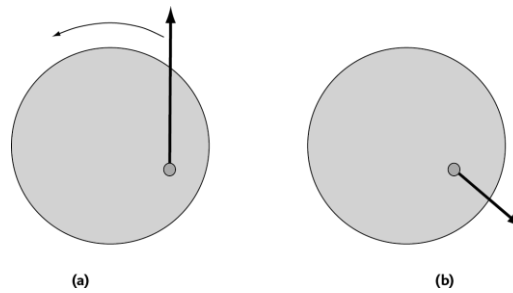


Рис. 5.4 – Происхождение силы Кориолиса

(а) – точка зрения взрослого, сидящего возле вращающейся карусели: он видит мяч, который катится прямо, как и положено.

(б) – точка зрения ребенка на карусели (которая кажется ему неподвижной): он видит, что мяч катится к краю, что видно и на схеме **(а)**.

Необходимо учесть, что мяч изначально неподвижен на схеме **(б)**, а на **(а)** у него есть скорость благодаря вращению карусели.

Другая составляющая силы переноса

Предположим опять, что шарик изначально неподвижен по отношению к карусели, но карусель на этот раз ускоряет свое вращение.

Поскольку карусель вращается, мяч покатится к краю. Но карусель вращается все быстрее и набирает скорость по отношению к земной поверхности, а мяч стремится сохранить по отношению к земле ту же скорость. Получается, что мяч катится *медленнее* карусели и начинает катиться к *задней части* карусели, поскольку сила инерции направлена назад.

Таким образом, здесь одновременно действуют две силы: одна направлена к краю (центробежная), другая назад. Именно совокупность этих двух воздействий называют переносной силой при вращательном движении системы отсчета.

Сила Кориолиса

Нам остается рассмотреть силу, которую мы до сих пор оставляли в стороне. Вернемся к карусели, которая вращается с постоянной скоростью против часовой стрелки: мяч, изначально неподвижный, покатится с ускорением к краю карусели. Предположим, что радиус карусели 4 м и она вращается со скоростью 10 км/ч. Мы положили мяч в 2 м от центра (то есть посередине между центром и краем): с точки зрения человека возле карусели мяч изначально движется со скоростью 5 км/ч.

Предыдущие выводы указывают, что мяч движется к краю карусели; но по отношению к земной поверхности мяч вовсе не стремится набрать или снизить скорость и движется по-прежнему со скоростью 5 км/ч. Однако он подкатывается к краю карусели, которая вращается со скоростью 10 км/ч: то есть мяч движется медленнее и по отношению к карусели начинает отклоняться от первоначальной траектории (→ **рис. 5.5**). С точки зрения человека на карусели мяч, двигаясь к краю, смещается вправо (→ **рис. 5.6**). На него действует новая сила инерции, которая называется силой Кориолиса.

Также если мы толкнем мяч к центру карусели, он покатится от зоны более высоких скоростей к зоне более низких: то есть мяч будет катиться быстрее, чем вращается карусель, и его траектория снова отклонится вправо.

В сущности, сила Кориолиса всегда будет заставлять мяч отклоняться вправо на карусели, вращающейся против часовой стрелки (а если по часовой стрелке, то влево).

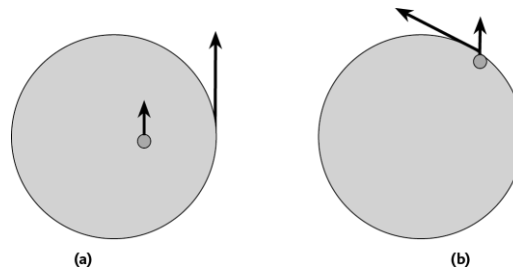


Рис. 5.5 – Происхождение силы Кориолиса

Схема показывает то, что видит взрослый, сидящий рядом с каруселью, за два последовательных момента времени.

(а) – мяч неподвижен по отношению к карусели, но с точки зрения наблюдателя обладает скоростью благодаря вращению карусели. Эта скорость ниже, чем скорость края карусели.

(б) – мяч достиг края карусели, сохранив ту же скорость. В этой точке скорость вращения карусели гораздо выше скорости мяча, и по отношению к карусели он меняет свою траекторию (продолжая двигаться к краю).

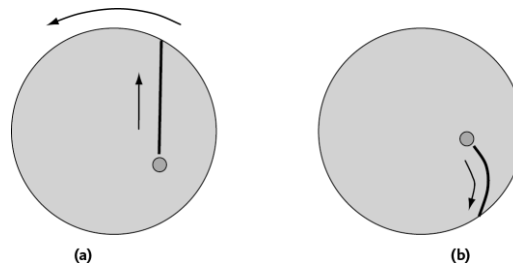


Рис. 5.6 – Траектория мяча, движущегося по карусели, с точки зрения разных наблюдателей

(а) – взгляд человека, сидящего возле карусели: мяч катится по прямой.

(б) – взгляд ребенка на карусели: с одной стороны мяч катится к краю (сила переноса), с другой стороны он описывает дугу вправо (сила Кориолиса).

Обобщение

В конечном итоге если мы различаем «переносную силу» и «силу Кориолиса», то потому, что первая зависит от *положения* мяча на карусели, а вторая от скорости его передвижения по отношению к карусели.

Наконец, нам пришлось ввести понятие «переносное ускорение» $\vec{a}_{ie}^{\rightarrow}$, связанное с силой переноса $\vec{F}_{ie}^{\rightarrow}$, как $\vec{F}_{ie}^{\rightarrow} = -m\vec{a}_{ie}^{\rightarrow}$.

Мы также можем ввести понятие «ускорение Кориолиса» $\vec{a}_{ik}^{\rightarrow}$, связанное с силой Кориолиса $\vec{F}_{ik}^{\rightarrow}$, как $\vec{F}_{ik}^{\rightarrow} = -m\vec{a}_{ik}^{\rightarrow}$.

Подведем итог:

- Ускорение переноса зависит от скорости вращения системы отсчета (в данном случае карусели) по отношению к инерциальной системе отсчета (в данном случае земной поверхности). Она также зависит от изменения скорости вращения и от расстояния объекта до оси вращения (если мяч в центре карусели, он не испытывает никакого ускорения).

- Ускорение Кориолиса также зависит от скорости вращения системы отсчета, но еще и от скорости объекта по отношению к этой вращающейся системе отсчета.

Весьма наглядный пример

Рассмотрим последнюю схему, которая лишь подтвердит положение вещей. Предположим, что ребенок на карусели покатит мяч в сторону противоположную вращению карусели с той же скоростью, с какой вращается карусель. Какова будет траектория мяча?

С точки зрения человека рядом с каруселью важно заметить, что мяч останется неподвижен. И действительно, если в точке мяча карусель вращается со скоростью 10 км/ч,

а мяч катится с той же скоростью в противоположном направлении, это значит, что по отношению к земной поверхности он не движется. Это значит, что карусель вращается под мячом, который стоит на месте: когда карусель сделает полный оборот, мяч окажется в первоначальной точке (→ **рис. 5.7**). По отношению к карусели мяч опишет ровный круг, который вернет его в исходное место. Ребенок сможет снова взять мяч, который толкнул!

А как это выглядит с точки зрения разных сил? На **рис. 5.7** мы видим, что мяч отклонился вправо, чтобы описать круг: это действие силы Кориолиса. Однако сила переноса должна была бы толкнуть его к краю, то есть влево. На самом деле так и происходит, и это значит, что в данном примере сила Кориолиса преобладает над переносной силой.

Чтобы завершить эту часть, уточним, что, если предмет не является псевдоизолированным, достаточно просто добавить силы материальной окружающей среды, а также силы инерции, чтобы определить его движение в неинерциальной системе отсчета.

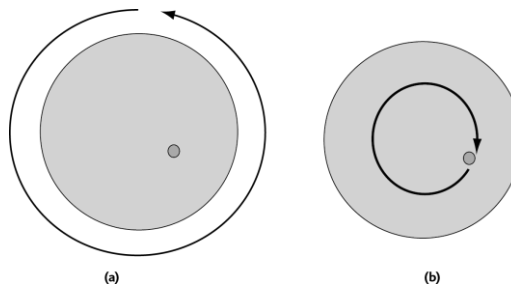


Рис. 5.7 – Мяч, брошенный в сторону противоположную вращению карусели, с точки зрения разных наблюдателей

(а) – точка зрения взрослого рядом с каруселью: мяч неподвижен, карусель вращается под ним, пока не сделает полный оборот.

(б) – точка зрения ребенка на карусели: карусель кажется неподвижной, а мяч описывает ровный круг, прежде чем вернуться на то же место.

2. Действие этих сил на Земле

Гигантская карусель

Мы видели, что земная поверхность не является инерциальной системой отсчета, когда рассматриваются крупномасштабные явления. Причина в том, что Земля вращается вокруг своей оси: это гигантская карусель, которая вращается по отношению к геоцентрической системе отсчета (которая является инерциальной)! Выводы, сделанные на примере карусели, можно перенести и на Землю.

Земля вращается с запада на восток: если мы посмотрим на Землю с Северного полюса, то увидим, что она вертится против часовой стрелки (→ **рис. 5.8**). Это значит, что сила Кориолиса стремится отклонить движение объектов вправо, а сила переноса стремится вытолкнуть объекты «на край» (центробежная сила). Краем в данном случае является периферия, наиболее удаленная от оси вращения, то есть экватор.

Иными словами, если мы положим мяч на Землю во Франции, благодаря центробежной силе он покатится сам собой к экватору, то есть к югу. Если этого не происходит, то потому, что сила переноса слишком незначительна: в общем-то эта гигантская карусель вращается слишком медленно и делает оборот за двадцать четыре часа. Поэтому контакта с земной поверхностью, которая вовсе не является ровной и гладкой, достаточно, чтобы мяч остался на месте. На экваторе эта центробежная сила направлена вверх (что хорошо видно на **рис. 5.8.а**): то есть она отчасти компенсирует вес, сила которого направлена вниз, и один и тот же человек на экваторе должен будет весить меньше, чем на Северном полюсе. Так оно и есть, но и тут сила инерции так слаба, что ее действие большого влияния на вес не оказывает (человек с весом 60 кг будет весить на 200 г меньше

на экваторе, чем на Северном полюсе, то есть разница в весе составит 0,3 %).

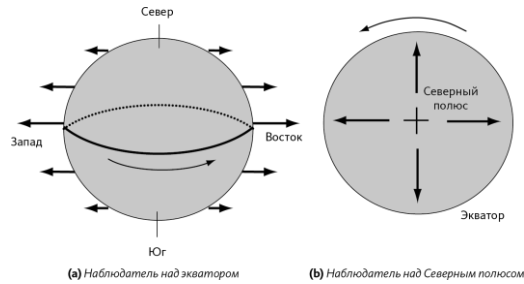


Рис. 5.8 – Центробежная сила Земли

Тем не менее этого достаточно, чтобы повлиять на форму самой Земли: радиус Земли на экваторе на 0,3 % больше, чем ее радиус на Северном полюсе, потому что там земные массы меньше сжаты собственным весом. Таким образом, Земля вовсе не является шаром, из-за центробежной силы она немного приплюснута с полюсов.

Все же основные последствия вращения Земли происходят от действия силы Кориолиса. В дальнейшем мы остановимся на ней подробнее.

Течения и ветра

Сила Кориолиса пропорциональна скорости рассматриваемого объекта, а чтобы эта сила возникла, объект должен перемещаться по земной поверхности. Более того, чтобы ее воздействие было ощутимо, необходимо, чтобы Земля совершила значительный поворот во время движения объекта: так происходит, если движение длится много часов подряд. Наконец, поскольку сила Кориолиса пропорциональна скорости объекта, ее могут затмить другие силы (например, трение), если скорость слишком медленная.



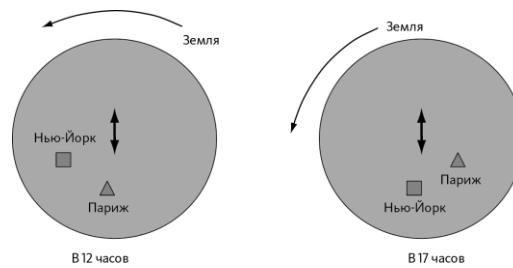
МАЯТНИК ФУКО

Поезжайте на Северный полюс и подвесьте шарик на веревке, прикрепленной к потолку вашего иглу. Толкните этот импровизированный маятник, он начнет качаться вперед-назад по вертикальной плоскости, которую мы назовем плоскостью колебаний.

Рассмотрим точку зрения геоцентрической системы отсчета: она инерциальная, а значит, силы инерции нет. То есть у маятника нет никаких причин отклоняться от плоскости колебаний.

Но в геоцентрической системе отсчета Земля вращается: она вертится против часовой стрелки (= на восток) под маятником, который двигается в пределах определенной плоскости (см. схему ниже). Вследствие чего по отношению к земной поверхности плоскость колебания мало-помалу смещается по часовой стрелке (на запад). К концу дня маятник опишет полный круг.

Это вполне логичное поведение есть не что иное, как проявление силы Кориолиса. Она проявляется не только на Северном полюсе, но и в других местах, несмотря на то, что там скорость вращения плоскости колебания ниже. Этот исторический опыт был проделан Фуко в парижском Пантеоне в 1851 г. Это было самой блестящей демонстрацией того, что Земля вертится вокруг своей оси, а не небесная сфера вращается вокруг Земли.



Маятник (двойная стрелка) изначально колеблется в сторону Парижа, но Земля под ним вращается, а плоскость колебания остается неизменной: по истечении примерно пяти часов маятник будет колебаться в сторону Нью-Йорка.

Все это объясняет, почему сила Кориолиса проявляется только при крупномасштабном и длительном движении, таком как океанские течения или движение воздушных масс.

Так, в Северном полушарии морские течения и ветра имеют тенденцию отклоняться вправо (потому что Земля при взгляде с севера вращается против часовой стрелки). В Южном полушарии течения и ветра отклоняются влево (если смотреть на Землю с Южного полюса, Земля вращается по часовой стрелке). Это создает обширные «зоны» вращения по часовой стрелке в Северном полушарии и вращения против часовой стрелки в Южном полушарии (→ **рис. 5.9**).

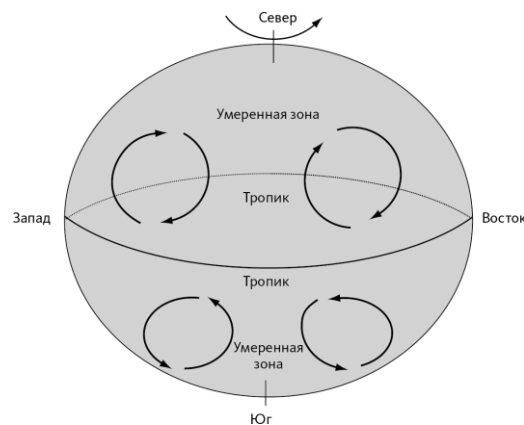


Рис. 5.9 – Действие силы Кориолиса на ветра



ГОЛЬФСТРИМ

Движение ветров, показанное на **рис. 5.9**, можно также перенести и на морские течения. Самым знаменитым среди них, без сомнения, является североатлантическое течение: от экватора оно движется на запад, затем поднимается к северу, омывая побережье Флориды. Если бы не сила Кориолиса, оно достигло бы канадского берега и принесло с собой жару тропиков. Однако сила Кориолиса заставляет его отклониться к востоку, к берегам Европы. В результате Европа наслаждается мягким климатом, а Канаде приходится довольствоваться холодным течением с севера.

На **рис. 5.9** хорошо видно, что эта сила оказывает значительное влияние на направление ветра: в межтропической зоне ветра направлены к западу, это пассаты. В умеренной зоне они скорее направлены к востоку. Это западные ветра, которые мы так хорошо чувствуем в Европе.

Разумеется, в этом движении участвуют и другие силы, которые его усложняют. В том, что касается морских течений, тут играют роль очертания континентов, заставляющие

течения поворачивать в ту или иную сторону. Что касается ветров, они возникают и меняются из-за перепадов давления на Земле, что, в свою очередь, является в том числе следствием изменения температуры (более подробно мы рассмотрим влияние температуры в главе 11).

Зона высокого давления называется антициклоном: силы давления стремятся вытолкнуть ветер наружу. Зона низкого давления называется циклоном: здесь силы давления стремятся собрать ветра к центру. Таким образом, ветра естественно переходят от антициклонов к циклонам, но, двигаясь так, в Северном полушарии они отклоняются вправо: на **рис. 5.10** мы видим, что в итоге ветра кружат по часовой стрелке вокруг антициклона (удаляясь друг от друга) и в противоположном направлении вокруг циклона (приближаясь друг к другу). В Южном полушарии все происходит наоборот.

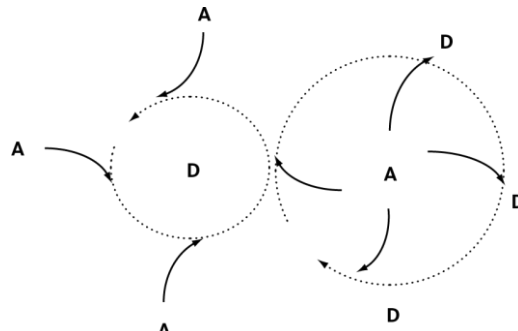


Рис. 5.10 – Направление ветров вокруг циклона и антициклона в Северном полушарии

Так рождаются торнадо и тропические циклоны; отчего эти ветра столь сильны, мы объясним в следующей главе. Отметим, что ветра переносят водяной пар, испарившийся над океаном: следовательно, зоны с наибольшим количеством осадков обязаны своим климатом этим влажным ветрам, то есть циклонам. Именно поэтому циклон ассоциируется у нас с плохой погодой, а антициклон с хорошей.



МИФ ОБ УМЫВАЛЬНИКЕ

Сила Кориолиса заставляет течения отклоняться вправо в Северном полушарии и влево – в Южном. В то же время мы констатируем, что вода, вытекающая из умывальника в сливное отверстие, вращается в определенном направлении. И мы понимаем, почему говорят, что в Северном и Южном полушарии вода в умывальнике закручивается по-разному.

Это глубокое заблуждение. Как мы убедились, в этом масштабе сила Кориолиса весьма незначительна по сравнению с другими силами, которые в общем-то выглядят второстепенными: достаточно легкого волнения, нарушения симметрии, незаметной неровности, чтобы заставить воду течь по часовой или против часовой стрелки. То есть прежде всего это зависит от умывальника, от способа воздействия на воду и других незаметных первичных условий.

Более того, следует заметить, что если бы сила Кориолиса была значительной, в Северном полушарии она заставляла бы воду течь против часовой стрелки, как вокруг циклона. Можно провести этот опыт при условии наличия большого, строго симметричного сосуда без малейшего начального колебания.

Остается важный вопрос: почему, вытекая из умывальника, вода вращается, если сила Кориолиса столь ничтожна? На самом деле речь идет о том же феномене, который объясняет, почему сила торнадо или циклона столь огромна: к этому мы вернемся в следующей главе.

3. Гравитация – псевдосила?

Поразительное сходство с силами инерции

Одинаковые ускорения для всех объектов

Совершенно неожиданно рассуждения о силах инерции позволяют увидеть силу гравитации в совершенно новом аспекте. Посмотрим, что это значит.

Из-за сил инерции наш мяч, катящийся по карусели, испытывает ускорение по отношению к этой карусели (оно направлено к краю карусели и вправо, если карусель вращается против часовой стрелки). На самом деле мяч катится по прямой с постоянной скоростью по отношению к земной поверхности, а карусель просто вращается под ним. Инертность мяча не вмешивается в это равномерное прямолинейное движение: то есть траектория мяча остается постоянной, какой бы ни была его масса. Иначе говоря, по отношению к карусели мяч испытывает одинаковое ускорение, направленное к краю карусели и вправо, какой бы ни была его масса.

Вам это ничего не напоминает? Помимо сил инерции существует еще одна сила, которая вызывает одинаковое ускорение независимо от массы объекта: это гравитация. Исходя из этого наблюдения начальное рассуждение Эйнштейна было простым: не является ли сама сила гравитации чем-то вроде псевдосилы подобно силам инерции? Это означало бы, что эта сила существует лишь *с определенной точки зрения*.

Тем не менее в том, что касается сил инерции, точка зрения наблюдателя, сидящего около карусели, казалась простой: «мяч катится прямо с постоянной скоростью, а карусель вращается под ним, что с точки зрения карусели придает ему дугообразную траекторию». В то же время считать гравитацию полноценной силой, возможно, не совсем справедливо. Возможно, «Луна движется по прямой с постоянной скоростью в дугообразном пространстве-времени (которому еще предстоит дать определение!), и это придает ей дугообразную траекторию в традиционном пространстве».

Сила, которую легко удалить

Прежде чем идти дальше, возьмем еще один пример. Поднимитесь на борт космического корабля, который движется в межпланетном пространстве с ускорением 10 м/с^2 . Из-за сил инерции вас прижимает к задней части ракеты (то есть ракета вынуждает вас набрать ускорение, тогда как вам «хочется» сохранить ту же скорость). То есть по отношению к ракете вы испытываете ускорение 10 м/с^2 , направленное назад. Но ускорение 10 м/с^2 точно такое же, как и на Земле: иначе говоря, вам кажется, что вы весите столько же, сколько и на Земле. Вы могли бы пройти в хвост корабля так же свободно, словно гуляете по Земле. Поскольку здесь нет иллюминаторов, вы не можете понять, набирает ли корабль скорость или все еще стоит на Земле.

Иными словами, силу инерции и гравитацию невозможно отличить друг от друга. От того, чтобы признать силу гравитации всего лишь особым видом силы инерции, всего один шаг, который Эйнштейн сделал в общей теории относительности.

Возьмем последний пример, чтобы убедиться в справедливости этой идеи. Предположим, что вы в лифте, у которого лопнул канат. И вы и лифт находитесь в свободном падении. Но поскольку ускорение тяжести одинаково для всех предметов, вы падаете с одинаковой скоростью: иными словами, вы можете лететь по воздуху посреди лифта, не чувствуя ускорения по отношению к нему. Все происходит так, словно вы находитесь в ракете, затерянной очень далеко в межпланетном пространстве. Кажется, что гравитация исчезла, хотя вы по-прежнему находитесь на Земле!

Эта сила определенно может казаться фиктивной...

Кривое пространство

Плоская Вселенная: средневековое представление...

Чтобы переосмыслить понятие гравитации, Эйнштейну нужно было объяснить его с разных точек зрения:

- Традиционная точка зрения, согласно которой гравитация изгибает траекторию и придает предметам ускорение;

- Точка зрения, требующая определения, согласно которой предметы сохраняют равномерную прямолинейную траекторию, несмотря на присутствие рядом массивного тела.

Вторая точка зрения, которая выглядит абсурдной по отношению к установленному влиянию гравитации, на самом деле не так странна, как кажется. Чтобы ее понять, достаточно привести пример на земном пространстве.

Представим двух человек на экваторе на расстоянии 100 м друг от друга, которые двигаются на север по двум параллельным траекториям (→ **рис. 5.11**). Если их траектории прямолинейны, можно представить, что эти люди никогда не встретятся, потому что их пути изначально параллельны. Однако они встречаются на Северном полюсе, к которому оба двигаются.

Так, некий наблюдатель, считающий Землю плоской, предсказал бы, что эти двое никогда не встретятся. Но поскольку поверхность Земли изогнута, в конечном итоге они встретятся.

То же самое в космосе. Два астероида, движущиеся равномерно, прямолинейно и параллельно, могут столкнуться, если «пространство искривлено». Если представить, что космическое пространство плоское, нам кажется, что два предмета притягиваются благодаря гравитации, — такова традиционная точка зрения. Но если пространство искривлено, нет необходимости ни в какой силе и ни в каком ускорении, чтобы два астероида встретились.

Иначе говоря, представление о том, что пространство плоское и гравитация «существует», так же устарело, как представление о том, что Земля плоская, как думали в Средние века.

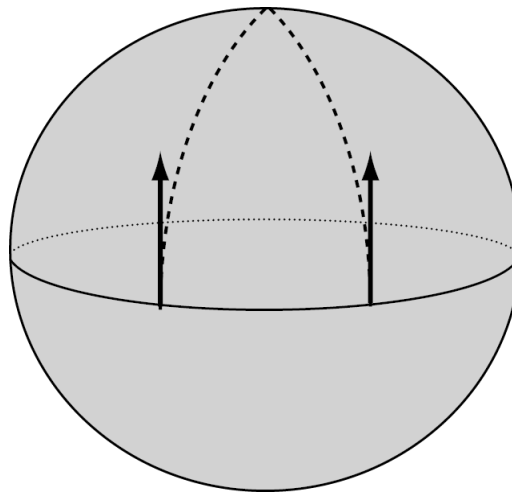


Рис. 5.11 – Пересечение двух изначально параллельных траекторий

Как Вселенная может быть искривленной?

Что такое «кривое пространство»? Мы легко можем представить искривленную «поверхность», как, например, поверхность Земли: на самом деле пространство, искривленное в двух измерениях, создает предмет в трех измерениях (в данном случае сферу), которую можно представить. Но пространство в трех измерениях, которое искривится, создаст четырехмерный объект, который вообразить невозможно: очень трудно представить целиком пространство, которое искривилось бы в четвертом измерении.

Именно поэтому в общей теории относительности пространство в трех измерениях представляют простой двухмерной поверхностью (ради простоты схемы третье измерение

упраздняется). Таким образом, мы можем сложить его в третьем измерении, которое для нас символизирует невидимое измерение (без связи с тремя измерениями пространства).

Как должно быть искривлено пространство, чтобы было удобно наблюдать? Ответить сложно, потому что здесь кривизна должна быть связана с присутствием массивных объектов в космосе. Эти массивные тела больше не имеют гравитационной силы, а просто искривляют пространство вокруг себя, и именно это искривление чисто «геометрическим» способом создает траекторию предметов.

С помощью очень упрощенного метода мы можем представить, что пространство формирует нечто вроде «углублений» в местах, где находятся массивные тела (→ **рис. 5.12.а**). Представим себе планету, чья изначальная скорость перпендикулярна направлению центральной звезды. Из-за своей массы эта звезда создает вокруг себя обширную «яму», которая искривляет пространство, то есть планета движется по наклонному краю этой ямы. Поскольку в общей теории относительности гравитации *не существует*, планета двигается по прямой по отношению к поверхности, на которой она находится. Но поверхность, *в свою очередь* изогнута вокруг звезды: так, поверхность приведет планету в начальную точку после того, как она сделает полный оборот, в то время как планета всего лишь движется своим путем, не отклоняясь от него.

Можно провести аналогию с поездом на американских горках: предположим, что трасса изогнута под углом 90° (болид практически на боку) и образует ровный замкнутый круг (→ **рис. 5.12.б**). Предположим, что рельсы отсутствуют, а у болида есть только шины: то есть ничто не заставляет болид поворачивать вправо или влево. Как поведет себя болид, запущенный по окружности по часовой стрелке?

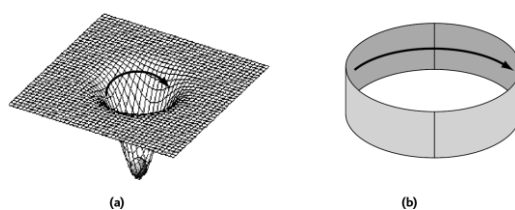


Рис. 5.12 – Эффект искривления на траектории предмета

Он поедет прямо по трассе, но, поскольку трасса замкнута, болид вернется на место старта, даже не поворачивая. Пассажир на борту не почувствует поворота вправо или влево, а только движение «вверх», которое прижмет его к сиденью. И в этом случае кривизна поверхности, на которой находится объект, позволяет сделать круг, хотя объект движется прямо.

Если данные рассуждения позволяют понять некоторые аспекты общей теории относительности, многие вопросы все-таки остаются без ответа. Подбросьте мяч в воздух: он замедлит движение, остановится, полетит обратно и упадет. Тогда как в кривом пространстве мяч, движущийся равномерно и прямолинейно, может отклониться от траектории, но ни в коем случае не остановиться и не двинуться в обратном направлении.

На самом деле, согласно теории относительности, изогнуто не только пространство, но и время. «Искривленное время»? Ну да, в этом есть смысл! Относительность времени и расстояния в зависимости от системы отсчета и понятие «пространства-времени», которое из этого вытекает, стала основой теории относительности Эйнштейна задолго до того, как он заинтересовался гравитацией. Именно это позволяет предсказывать многие явления, которые не понять с помощью старой доброй механики Ньютона. К этой теме мы вернемся только в конце книги.



«ГРАВИТАЦИЯ ДЕЙСТВУЕТ НА СВЕТ» – РЕВОЛЮЦИОННОЕ

ОТКРЫТИЕ?

Кривизна пространства влияет на все, что по нему движется, в частности на свет: так, свет, как любой другой материальный объект, вынужден отклоняться от своей траектории вблизи массивного тела, которое изгибает пространство.

Это было подтверждено опытом в 1919 г.: благодаря солнечному затмению выяснилось, что световые лучи дальних звезд искажались вблизи от Солнца. Иначе говоря, благодаря этому гравитационному воздействию мы видим звезды не там, где они находятся на самом деле.

Такой результат был предсказуем еще 250 лет назад. В доброй старой механике Ньютона говорится, что ускорение, возникающее из-за притяжения, оказываемого массивным телом, одинаково для всех объектов. Этот закон действителен также не только для объектов с малой массой, но даже с самой ничтожной. А ведь свет состоит из частиц с ничтожной массой (фотонов). То есть он тоже должен притягиваться и испытывать ускорение: траектория света, проходящего вблизи от Солнца, должна искажаться.

В этом смысле общая теория относительности более совершенна, потому что в ней учитываются релятивистские эффекты, о которых мы говорили (искривление расстояния и времени в зависимости от системы отсчета) и последствия которых наблюдаются. Но некоторые заслуги классической физики слишком часто забываются.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Силы инерции являются псевдосилами: они не зависят от материального окружения и свойственны определенной системе отсчета.
- Сила переноса зависит от положения объекта. Она вызывает ускорение объекта, противоположное ускорению системы отсчета по отношению к инерциальной системе отсчета.
- Сила Кориолиса зависит от скорости объекта. Она не меняет скорость объекта, но заставляет его изменить траекторию вправо или влево.
- Силы инерции проявляются на Земле разными способами: приплюснутость полюсов, ветра и течения, направленные к западу в тропиках и к востоку в умеренных зонах, направление вращения ветров вокруг циклонов и антициклонов.
- С точки зрения общей теории относительности гравитация является псевдосилой: массивные тела искажают пространство, что изменяет траекторию объекта по отношению к плоскому пространству. Такая точка зрения существует благодаря равенству гравитационной и инертной масс, что подразумевает, что все тела испытывают одинаковое ускорение.

6. Осторожно! Мы вертимся!

До сих пор мы рассматривали движение объектов с определенным ускорением и скоростью. Но в действительности каждая точка объекта может обладать собственной скоростью и ускорением. Например, на вращающемся диске точка с краю движется с большой скоростью, а центр стоит на месте.

Здесь мы собираемся рассмотреть тот случай, когда предмет вертится вокруг своей оси (вращение), находясь при этом в движении (перемещение). Это поможет нам понять постепенное отдаление Луны, образование циклонов, устойчивость крутящейся юлы, едущего мотоцикла и многих других природных явлений.

Эта глава довольно сложная, и читатель, если пожелает, может ее пропустить без

малейшего ущерба для понимания последующих разделов.

1. Запуск вращающегося объекта

Центр масс

Представим два положительно заряженных шара произвольного радиуса, изначально помещенные в некую точку пространства, которую назовем G . Предположим, что они «изолированы» от внешнего мира, то есть на систему из двух шаров не действует никакая внешняя сила. Однако оба шара отталкиваются друг от друга, то есть сила на них все-таки действует, но по отношению к системе она является «внутренней».

Как правило, какой бы ни была природа сил, сила, с которой предмет 1 действует на предмет 2, противоположна силе, с которой предмет 2 действует на предмет 1 (принцип взаимодействия), сумма внутренних сил равна нулю, потому что они гасят друг друга. В нашем случае электростатические силы равны и направлены в противоположные стороны (→ рис. 6.1).

Представим, что шар B справа в три раза больше шара A слева: следовательно, ускорение шара B втрое меньше ускорения шара A , поскольку силы воздействия одинаковы $\vec{a} = \vec{F} / m$. То есть за определенное время шар B пройдет втрое меньшее расстояние, чем шар A (→ рис. 6.1.b). Из этого следует, что отношение расстояний от точки G противоположно отношению масс: если B втрое тяжелее A , значит, он в три раза ближе к G , чем A .

Точка G называется центром инерции (см. врезку: там дано более развернутое определение). Ее отличительным свойством является отсутствие всякого ускорения при отсутствии внешней силы, как в нашем примере, где она остается неподвижной. Объекты могут удаляться или приближаться друг к другу, но отношение расстояний между ними всегда будет одинаковым.

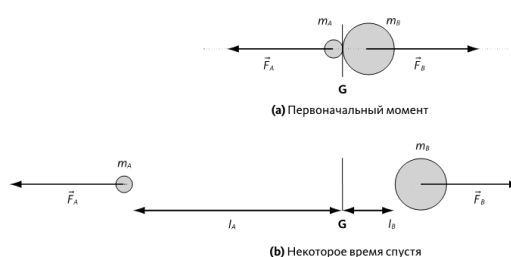


Рис. 6.1 – Центр масс изолированной системы. Если $m_B = 3m_A$, то $I_A = 3I_B$

Момент силы

Условие перемещения объекта

Теперь соединим наши шары A и B стержнем незначительной массы: получилась несимметричная штанга. Теперь расстояние между A и B больше не изменится. На этот раз мы рассмотрим действие внешних сил.



ЦЕНТР ИНЕРЦИИ

В случае с нашими двумя шарами A и B центр инерции был определен как $\frac{I_A}{I_B} = \frac{m_B}{m_A}$. Это также записывается $m_A \vec{GA} + m_B \vec{GB} = \vec{0}$.

В случае наличия нескольких масс m_i , расположенных в точке A_i , G также

определяется как сумма $m_i \vec{GA}_i$, то есть нулевая (говорят, что « G – барицентр точек A_i , зависящих от их массы m_i »).

Следовательно, положение G напрямую зависит от величины масс. Однако масса может представлять и инертную массу (для инерции), и гравитационную массу (для гравитации): по этой причине G с тем же успехом называется центром массы, центром тяжести или центром инерции.

На практике мы говорим о центре массы, когда речь идет о ее математическом определении (барицентр точек), о центре инерции, когда речь идет о движении (« G не испытывает ускорения без воздействия внешней силы»), и о центре тяжести, когда речь идет о точке равновесия объекта (об этом мы расскажем позднее в этой же главе).

Говорят, что объект перемещается в системе отсчета, если он не вращается по отношению к этой системе отсчета. Например, на **рис. 6.2** ось штанги не вращается по отношению к листку: то есть штанга перемещается по отношению к листку. Это значит, что в перемещающемся объекте все точки имеют одинаковый вектор скорости (одна скорость и одно направление). Что называется, объект перемещается целиком.

Из этого следует, что ускорение всех его точек должно быть одинаковым. В нашем примере ускорение шара A должно равняться ускорению шара B . Из этого мы заключаем, что отношение $a^{\rightarrow}; = F^{\rightarrow}; / m$ должно быть идентичным для A и для B , то есть $\frac{\vec{F}_A}{m} = \frac{\vec{F}_B}{m}$.

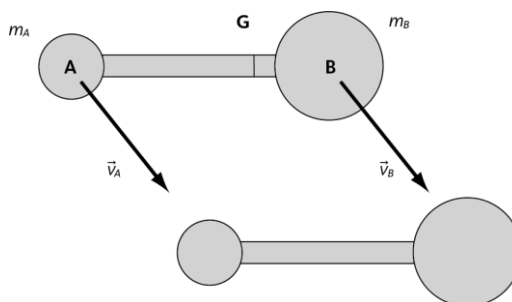


Рис. 6.2 – Перемещение штанги относительно листка

Если шар B в три раза тяжелее шара A , то для его перемещения должна быть приложена сила в три раза большая. Однако отношение масс обратно отношению расстояний от центра инерции G : обозначив эти расстояния l_A и l_B , мы получаем $\frac{\vec{F}_A}{l_B} = \frac{\vec{F}_B}{l_A}$.

Другими словами, если шар B в три раза ближе к центру инерции, чем шар A , сила, действующая на B , должна быть в три раза больше, чем сила, действующая на A , чтобы наша штанга сдвинулась с места.

Определение момента силы

В этом отношении силы проявляют себя в форме векторов. В них можно выделить две составляющих:

- Одна из них направлена на ось шаров (→ **рис. 6.3**). Она стремится придать ускорение шарам, направленное вдоль этой оси. Иначе говоря, эта составляющая ни в коем случае не может заставить ось вращаться. В то же время внутренние силы стремятся сохранить одинаковую дистанцию между шарами с помощью стержня.
- Другая составляющая действует перпендикулярно оси шаров. Только она может заставить штангу вращаться. Только внешние силы могут иметь составляющую с таким направлением: в дальнейшем мы будем рассматривать только ее (→ **рис. 6.3**).

Обозначим α угол, под которым сила действует на ось двух шаров. Эта перпендикулярная составляющая силы записывается $F \cdot \sin \alpha$. Если нас интересует только эта составляющая, отношение $F^{\rightarrow};_A l_A = F^{\rightarrow};_B l_B$, выведенное ранее, приобретает вид $F^{\rightarrow};_A l_A \sin \alpha_A = F^{\rightarrow};_B l_B \sin \alpha_B$.

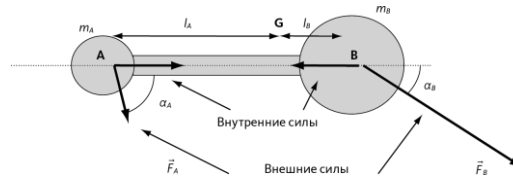


Рис. 6.3 – Силы, действующие на перемещающуюся штангу

Здесь мы обозначили внутренние силы, направленные вдоль оси по пунктирной линии, а также внешние силы. Чтобы вращения не было, составляющая силы, перпендикулярной оси, должна быть в три раза больше в B, чем в A, если масса m_B в три раза больше массы m_A . То есть $F_B \sin \alpha_B = 3F_A \sin \alpha_A$, если $m_B = 3m_A$.

Оно означает, что перпендикулярная оси штанги составляющая силы должна быть в три раза больше, если шар в три раза ближе к центру инерции. Если это условие не выполняется, значит, объект испытывает вращение (помимо перемещения): то есть вращается вокруг своей оси.

Иначе говоря, именно сравнение произведений $Fl \sin \alpha$ каждого из двух шаров позволяет узнать, будет ли объект вращаться: произведение $Fl \sin \alpha$ представляет собой возможность силы заставить объект вращаться. Его называют «моментом силы F ». Поскольку l представляет здесь расстояние до центра инерции G , это называют «момент силы F по отношению к G ».

Если момент силы в A больше момента силы в B, значит, объект заставит вращаться сила F_A : объект будет вращаться в направлении действия силы F_A . Поскольку сила вызывает ускорение, вращение будет постоянно ускоряться: как только моменты сил перестанут уравниваться, объект будет все быстрее вращаться вокруг своей оси.

Плечо рычага

Равновесие на острие

Теперь мы хотим установить нашу штангу на острие треугольного бруска так, чтобы она была в равновесии (→ **рис. 6.4**). На какую точку мы должны ее положить?

На шары A и B действует одна сила: вес $F = mg$. Вес шара B в три раза больше веса шара A: $F_B = 3F_A$. В то же время B в три раза ближе к G , чем A, потому что его вес в три раза больше $l = l_A / 3$. То есть произведение $F_A l_A$ равно произведению $F_B l_B$.

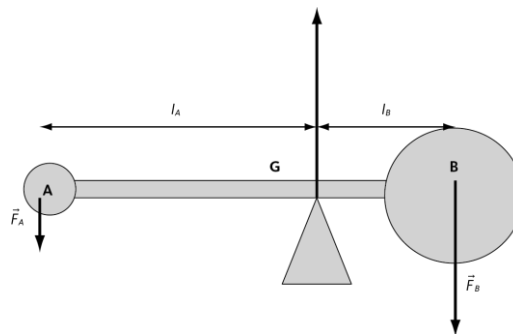


Рис. 6.4 – Штанга в равновесии на острие бруска

Силы перпендикулярны оси штанги: то есть выражения, которые мы ввели, $\sin \alpha_A$ и $\sin \alpha_B$, равны 1. Таким образом, произведения $F_A l_A$ и $F_B l_B$ точно соответствуют моментам силы F_A и F_B по отношению к G : мы видим, что эти моменты компенсируют друг друга.

То есть вес не заставляет штангу вращаться. Это не удивительно: мы уже знаем, что все объекты падают с одинаковым ускорением. Следовательно, два шара, брошенные одновременно, будут падать с одинаковой скоростью: штанга падает, не вращаясь.

Однако, установив штангу на острие бруска, мы ввели в действие дополнительную

силу: ту, с которой острие бруска действует на стержень. Мы хотим, чтобы штанга оставалась в равновесии: то есть мы не хотим, чтобы эта новая сила заставила штангу вращаться. Иными словами, момент этой силы по отношению к G должен равняться нулю. Произведение $F \cdot l$ должно равняться нулю: это значит, что острие бруска должно быть расположено в центре инерции G (чтобы было $l = 0$).

Увеличитель силы

Мы можем заменить штангу обычной доской, которая будет держаться на острие в равновесии (→ **рис. 6.5**). Предположим, что с одного конца доска будет вдвое длиннее, чем с другого. Мы увидели, что для сохранения равновесия нам пришлось увеличить массу вдвое с длинной стороны, а не с короткой (в точности как со штангой на **рис. 6.4**). Иначе говоря, нужно применить вдвое большую силу с короткой стороны, чем с длинной.

В конечном итоге силы, которые следует приложить перпендикулярно доске, чтобы установить равновесие, должны соответствовать: $F_A l_A = F_B l_B$, где l_A и l_B – расстояние до оси вращения. Другими словами, моменты силы по отношению к оси вращения должны компенсировать друг друга.

Из данного утверждения можно сделать много выводов: наша доска, насаженная на острие, выступает увеличителем силы. В нашем примере силы в 3 ньютона, приложенной к длинной стороне, достаточно, чтобы компенсировать силу в 9 ньютонов, приложенную к короткой (соотношение длин один к трем).

Предположим, что нам нужно поднять массу в 1000 кг: если мы хотим сделать это обычным способом, необходимо применить силу в 1000 ньютонов ($F = mg$), а это очень тяжело. Но мы также можем поместить эту массу на конец рычага, одно плечо которого в десять раз длиннее другого: сила, приложенная с длинной стороны, будет в 10 раз меньше и составит 100 ньютонов. Такая сила нужна, чтобы поднять 10 кг, а это гораздо легче... В данном случае мы воспользовались большим плечом рычага.

Архимеду приписывают фразу: «Дайте мне точку опоры, и я переверну Землю». С достаточно длинным рычагом можно применить силу такой величины, которая нам требуется.

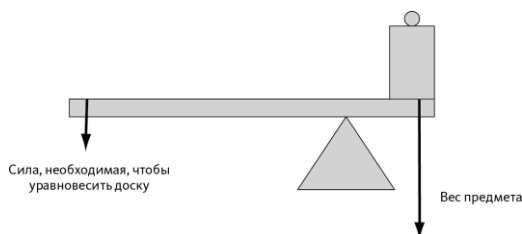


Рис. 6.5 – Эффект рычага

2. Особенности вращающегося объекта

Момент импульса

Определение

Момент силы по отношению к оси выражает ее способность заставить этот предмет вращаться вокруг данной оси: он выражается как $Fl \sin \alpha$.

Между тем $F\vec{v} = m\vec{a}$; сила меняет $m\vec{v}$; (где $\vec{v}$ – вектор скорости, а m – масса). Таким образом, момент силы меняет $mv l \sin \alpha$ (l – расстояние до оси вращения, а α представляет собой угол скорости по отношению к прямой, соединяющей ось и объект (→ **рис. 6.6**)).

Величина $mv l \sin \alpha$ называется моментом импульса объекта. Он связан со скоростью,

с которой объект вращается вокруг заданной оси. Если $\alpha = 0$, скорость направлена к оси или в противоположную сторону: то есть объект будет приближаться к оси или удаляться от нее, не вращаясь вокруг нее. Момент импульса в этом случае равен нулю.

И напротив, если $\alpha = 90^\circ$, скорость перпендикулярна направлению оси, что означает, что объект «изгибается»: момент импульса в данном случае максимальный и выражается просто $mv l$. В частности, это происходит, когда объект описывает круг вокруг оси.

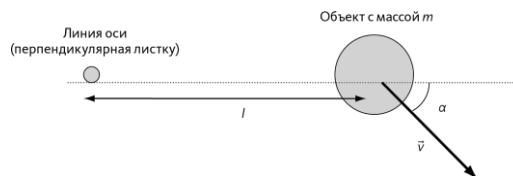


Рис. 6.6 – Момент импульса

Если $\alpha = 0$, объект удаляется от оси, не вращаясь вокруг нее: момент импульса равен нулю. Если $\alpha = 90^\circ$, движение, напротив, представляет вращение вокруг оси: момент импульса максимальный.

Последствия

Как и момент силы, понятие момента импульса позволяет понять некоторые очень важные явления.

Представим фигуриста на льду: он «псевдоизолирован», то есть внешние силы компенсируют друг друга (с одной стороны вес, с другой – реакция опоры). Существуют также внутренние электростатические силы, которые обеспечивают сцепление атомов фигуриста. Но принцип взаимодействия говорит нам о том, что эти силы противопоставлены друг другу как две против двух и приложены к одной оси: то есть внутренние силы никогда не создают момента.

В итоге общий момент сил, действующих на фигуриста, равен нулю. Между тем этот момент заставляет измениться момент импульса, а это значит, что момент импульса фигуриста остается неизменным.

Предположим, что фигурист вращается на месте, раскинув руки в стороны: поскольку его момент импульса не меняется, скорость его вращения останется постоянной, если он будет держать руки раскинутыми. Ничего удивительного: не следует забывать, что мы не учитываем трение.

Но предположим, что в какой-то момент фигурист опустит руки: расстояние l между его ладонями на оси вращения уменьшилось. Чтобы момент импульса $mv l$ сохранился, нужно, чтобы увеличилась скорость.

В конечном счете простой факт того, что фигурист опустил руки, заставил его вращаться быстрее. Чтобы упростить пример, предположим, что некая масса (как кисть руки фигуриста) наполовину приблизилась к оси вращения: расстояние до оси сократилось вдвое. В этом случае сохранение $mv l$ требует, чтобы скорость массы была помножена на два (→ рис. 6.7).

Но это еще не все: поскольку масса приблизилась к оси, ее путь вокруг оси будет вдвое короче (она пройдет круг меньшего диаметра). Таким образом, не только удвоилась скорость, но и дистанция кругового движения вдвое уменьшилась. В итоге массе понадобится в четыре раза меньше времени, чтобы сделать один оборот!

Если масса совершала один оборот в секунду, теперь за секунду она совершает четыре оборота. Случай с фигуристом сложнее, потому что не вся его масса сосредоточена в руках: то есть он не будет вращаться вчетверо быстрее. Тем не менее скорость его вращения вокруг своей оси сильно возрастет: именно это мы видим, когда наблюдаем за вращением фигуристов.

На этом этапе может возникнуть вопрос: за счет чего же увеличивается скорость, если не влияет никакая равнодействующая внутренняя или внешняя сила?

На самом деле все части системы остаются неподвижными не потому, что

равнодействующая сила равна нулю. Вспомните пример двух лежащих рядом шаров с положительными зарядами ($\rightarrow$ **рис. 6.1**): равнодействующая сила была равна нулю, потому что две отталкивающие электростатические силы были противопоставлены друг другу. Однако с течением времени скорость шаров увеличивалась.

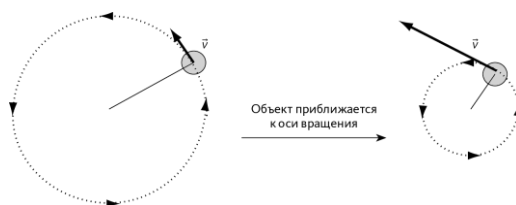


Рис. 6.7 – Сохранение момента импульса

В данном опыте мы привязали предмет на нитку и заставили его вращаться вокруг оси. В определенный момент мы обвязываем нитку вокруг оси так, чтобы предмет приблизился к оси: он начинает крутиться быстрее.

Если длина нитки станет вдвое короче, скорость предмета вдвое возрастет. То есть он будет делать в четыре раза больше оборотов в секунду, потому что расстояние, которое ему приходится проходить, вдвое уменьшилось.

Отметим также, что на **рис. 6.7** натяжение нити позволило подвинуть массу к оси вращения: именно оно вызвало увеличение скорости, но это увеличение направлено перпендикулярно силе (перпендикулярно нити). Этот малоинтуитивный вывод мы будем встречать на всем протяжении этой главы. Увеличение скорости не всегда происходит в направлении, указанном силой... Другие примеры помогут лучше понять причину этого.

А теперь о Солнечной системе

Формирование Солнечной системы

Совершим большой прыжок в прошлое и поразмышляем о происхождении Солнечной системы 4,6 млрд лет назад. В те времена она представляла собой лишь скопление газа и пыли, которых в нашей галактике множество. Это «облако» из пыли и газа медленно перемещалось внутри самого себя. Однажды из-за действия гравитации облако начало рассеиваться (возможно, процесс начался после взрыва соседней сверхновой звезды). В процессе этого массы газа и пыли, находившиеся далеко от оси вращения, сблизилась: благодаря сохранению момента импульса их скорость значительно возросла (так же как увеличивается скорость вращения фигуриста, когда он прижимает к себе руки). Другими словами, сгущаясь, облако начало вращаться быстрее и быстрее.

На **рис. 6.8** отображено, какие силы действовали на облако: гравитация, направленная к центру облака, и центробежная сила, возникшая из-за вращения, стремящаяся отдалить пылинки от центра вращения. Мы видим, что равнодействующая этих сил направлена к срединной плоскости облака, перпендикулярной оси вращения.

Таким образом, по мере того, как облако сгущалось, с одной стороны, его скорость увеличивалась, с другой – все газы и пыль сосредотачивались на срединной плоскости. Именно здесь пылинки спрессовались, образуя планеты, в то время как большая часть массы сконцентрировалась в центре облака, образовав Солнце.

Это объясняет, что сегодня все планеты вращаются вокруг Солнца в одну сторону *на одной плоскости*, которую называют «плоскостью эклиптики». Точно так же все главные естественные спутники в Солнечной системе вращаются в одну сторону вокруг планет рядом с плоскостью эклиптики.

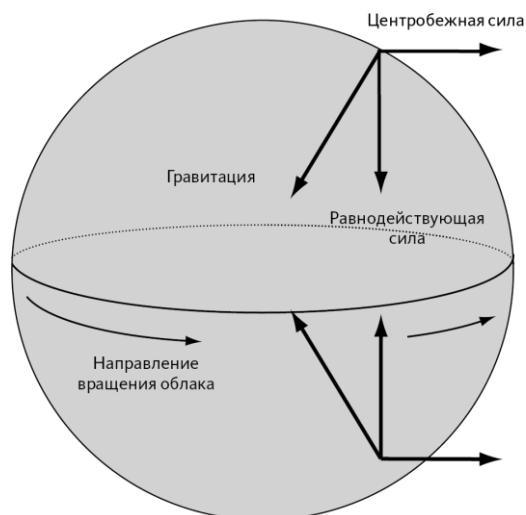


Рис. 6.8 – Превращение сферического облака в диск



СИЛА ЦИКЛОНОВ

Мы видели, что в земной атмосфере ветра имеют тенденцию переходить от антициклонов к циклонам, вращаясь вокруг них благодаря силе Кориолиса, то есть воздух, вращаясь, стекается к циклону. Здесь мы имеем дело с той же ситуацией, как в случае с вращающимся облаком, которое сгущается.

Сохранение момента импульса подразумевает, что чем больше воздух приближается к оси вращения (центру циклона), тем быстрее он вращается вокруг этой оси: чем ближе к центру циклона, тем ветер все неистовей. Это объясняет, почему в наших умеренных широтах циклоны часто сопровождаются сильными ветрами. В тропических районах циклоны еще более мощные, то есть это явление выражено еще ярче: ветра вращаются с очень высокой скоростью вокруг центра циклона, что образует так называемый глаз циклона.

Наконец, мы можем понять, почему вода, вытекающая через сливное отверстие умывальника, начинает вращаться. Здесь также происходит приток материи к определенной точке (в данном случае к сливному отверстию). Если вначале есть хотя бы малое волнение, движение вращения очень быстро усилится из-за сохранения момента импульса по мере того, как вода будет приближаться к сливному отверстию. В конечном итоге мы видим водоворот, чья скорость гораздо выше вблизи от слива.

Наконец, если бы скорость вращения облака не увеличилась во время сгущения, не возникло бы центробежной силы, и вся материя сконцентрировалась бы в Солнце из-за гравитации: планет вокруг не возникло бы. Нашим существованием мы обязаны сохранению момента импульса.

Это рассуждение поясняет и то, почему галактики в той или иной степени имеют форму диска (большинство звезд вращаются на одной плоскости).

Продолжительность времен года

Планеты вращаются вокруг Солнца по почти круговой траектории. На самом деле если мы присмотримся получше, то заметим, что форма их траектории – эллипс (→ **рис. 6.9**). Можно продемонстрировать, как гравитация формирует эллиптическую траекторию, но необходимые вычисления выходят за рамки этой книги. Рассмотрим лучше последствия таких траекторий.

Сравним момент, когда планета наиболее удалена от Солнца (он называется «афелий»), с моментом, когда она к нему ближе всего (это «перигелий»). Поскольку сила

притяжения направлена к Солнцу, ее момент по отношению к Солнцу равен нулю, то есть момент импульса планеты по отношению к Солнцу сохраняется.

На афелии момент импульса выражается $mv_a l_a$ (где m – масса планеты, v_a – ее скорость, а l_a – расстояние до Солнца на афелии). То же самое с перигелием, он выражается $mv_p l_p$ (где v_p и l_p соответствуют скорости и расстоянию на перигелии).

Поскольку оба момента равны, из этого следует, что соотношение скоростей между афелием и перигелием обратно пропорционально расстояниям до Солнца: $\frac{v_a}{v_p} = \frac{l_p}{l_a}$. То есть планета движется гораздо быстрее, когда она ближе к Солнцу, чем когда она дальше от него. Более того, когда планета ближе к Солнцу, она совершает более короткий путь, чтобы сделать оборот вокруг него. То есть планета движется быстрее и преодолевает меньшее расстояние, когда она ближе к Солнцу: ей нужно гораздо меньше времени, чтобы пройти 10° вокруг Солнца.

Последствия этого хорошо видны на Земле. Земля находится ближе всего к Солнцу, когда в Северном полушарии зима (Земля наклонена так, что ее Южное полушарие повернуто к Солнцу). То есть зимой она вращается вокруг Солнца быстрее, и потому зима в Северном полушарии короче лета!

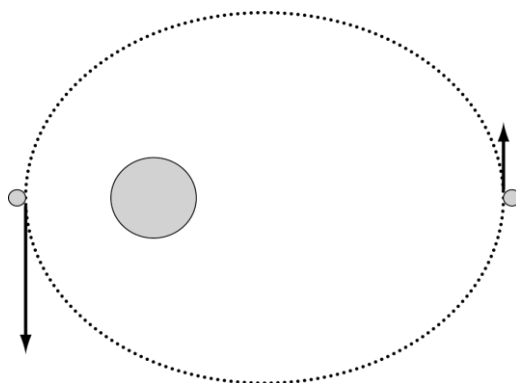


Рис. 6.9 – Эллиптическая траектория планет

Из-за действия гравитации планеты ускоряют движение, когда приближаются к Солнцу, и замедляют его, когда от него удаляются. То есть планеты вращаются быстрее, когда они ближе к Солнцу. Это явление гораздо ярче выражено у комет, движущихся по эллиптической траектории.

Отметим, что на самом деле траектория планет гораздо больше похожа на окружность, как показано на рисунке.

Вот почему в феврале 28 дней, а не 30: два дня в этот период исчезают. С другой стороны, это объясняет, почему осеннее равноденствие наступает только 23 сентября, тогда как весеннее равноденствие начинается 21 марта, – это дает два лишних дня лета!

Таким образом, в Северном полушарии зима длится почти на четыре дня меньше, чем лето, а это важно (в Южном полушарии все происходит наоборот).

Мимоходом заметим, что поскольку Земля зимой ближе к Солнцу Северным полушарием, а летом – Южным, то в Южном полушарии времена года должны были быть более ярко выражены (более жаркое лето и более холодная зима). В действительности присутствие в Южном полушарии океанических масс играет большую роль в смягчении климата.

Движение планет вокруг Солнца также помогает лучше понять некоторые аспекты сохранения момента импульса.

Увеличение скорости движения планеты при ее приближении к Солнцу очевидно: его вызывает гравитация. Но из-за инертности планеты вектор этого увеличения скорости перпендикулярен направлению к Солнцу (→ **рис. 6.9**): сравнивая афелий и перигелий, мы замечаем, что гравитация не вызывает никакого увеличения скорости в направлении к Солнцу, несмотря на то что она направлена в его сторону.

Мы видим, что радиальная сила (направленная к оси вращения) вызывает увеличение скорости в перпендикулярном направлении (ускорение вращения). Мы уже заметили это на примере с фигуристом, но пример с планетами помогает лучше понять, как возникает это явление.

Далее в этой главе мы придем к тем же выводам, когда будем рассматривать гироскопический эффект.

Неизбежное отдаление Луны

Теперь рассмотрим другое проявление сохранения момента импульса на примере системы Земля – Луна. Мы уже видели, что Луна действует на Землю с помощью приливных сил, которые, в частности, проявляются в океанах. Мы также видели, что это приводит к значительным последствиям: замедлению вращения Земли вокруг своей оси.

Замедляя вращение, Земля утрачивает момент импульса (в дальнейшем мы будем говорить о моменте *относительно центра Земли*). Однако Солнце суммарно не оказывает никакой силы на систему Земля – Луна, то есть момент импульса системы Земля – Луна должен сохраняться.

На практике Луна, замедляя вращение Земли, понемногу удаляется от нее: так ее момент импульса понемногу нарастает, а у Земли уменьшается. Таким образом, скорость Луны v уменьшается, а ее расстояние до Земли l увеличивается. В конечном итоге момент импульса ее оборота $mv l$ (где l – масса Луны) все-таки увеличивается.

То есть Луна, рожденная от столкновения некоего тела с Землей, в самом начале была гораздо ближе к Земле: сегодня она отдаляется по несколько сантиметров в год. Через 10 миллионов лет Луна отдалится на несколько сотен километров. Во времена динозавров Луна на небе выглядела чуть больше.

Гироскопический эффект

Неустойчивое равновесие юлы без вращения

Поставим юлу вертикально в точку O , не вращая ее. Если мы ее отпустим, она упадет набок.

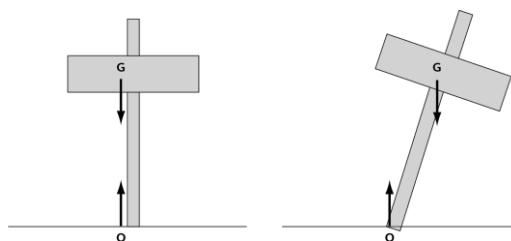


Рис. 6.10 – Неустойчивое равновесие юлы без вращения

На самом деле, если мы поставим ее абсолютно прямо, юла сохранит равновесие. В этом положении действуют две силы, направленные по вертикальной прямой через точку O : они не создают никакого момента к юле относительно O .

Но на практике поставить юлу строго вертикально невозможно: она всегда будет незаметно наклонена в сторону. На **рис. 6.10** мы видим, что вес юлы уже не направлен вдоль вертикальной оси, проходящей через точку O , поскольку масса юлы смещена относительно этой оси. В результате вес вызывает момент силы относительно точки O , в то время как реакция поверхности по-прежнему не вызывает никакой силы: вес старается заставить юлу вращаться, то есть заставить ее упасть. В этом случае говорят, что вертикальная юла находится в неустойчивом равновесии.

Происхождение гироскопического эффекта

В подобном опыте нет ничего удивительного! Но каждый знает, что, когда мы

заставляем юлу быстро вращаться вокруг своей оси, она стоит вертикально и не падает. Однако на нее по-прежнему действуют только две силы: реакция поверхности, которая не вызывает никакого момента силы, и вес. Так почему же вес больше не может заставить юлу упасть, если он действует так же, как на **рис. 6.10**?

Чтобы это понять, временно обратимся к примеру вращающегося колеса, которое мы попытаемся заставить вращаться на острие, а затем вернемся к юле.

Предположим, что мы прикладываем противоположно направленные силы с двух сторон колеса, как видно на **рис. 6.11**: эти силы производят момент, который стремится заставить колесо вращаться. На первый взгляд кажется, что ось колеса должна отклониться влево ($\rightarrow$ **рис. 6.11.a**), на практике это происходит, *если колесо не крутится*. Но если колесо вращается, результат этого действия совершенно иной. Возьмем небольшой сегмент колеса, первоначально расположенный в точке А ($\rightarrow$ **рис. 6.11.b**): из-за приложенной силы этот сегмент колеса поднимется кверху по пути к точке В. Но сила, направленная вверх, продолжает действовать и за пределами точки В до самой точки С, то есть отклонение вверх будет максимальным в точке С, а не в точке В. Только после точки С действие силы меняет направление вниз, то есть сегмент опустится, достигнув самой низкой точки в А.

В конечном итоге мы видим, что ось качнулась в нашу сторону (точка С самая высокая, точка А самая низкая), а не влево. На первый взгляд такой результат кажется нелогичным, но мы видим, что понять это будет легко, когда мы представим себя на месте колеса и просто проанализируем действие этой силы.

Эффект, которого мы добились, называется гироскопическим. Он предполагает, что вращающийся объект, подверженный действию двух сил (то есть «моменту»), вращается вокруг своей оси в направлении перпендикулярном действию этих сил.

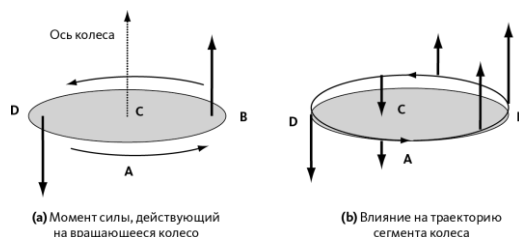


Рис. 6.11 – Вращение колеса, подверженного действию двух сил

Влияние на движение юлы

Возьмем опять пример с юлой и предположим, что она слегка наклонена относительно вертикальной оси ($\rightarrow$ **рис. 6.12**). Вес выступает моментом силы, который должен был бы, по идее, заставить ось юлы качнуться влево, пока она не упадет на землю. То есть ситуация идентична примеру с колесом, которую мы рассмотрели выше ($\rightarrow$ **рис. 6.11**). Мы можем из этого заключить, что вес стремится качнуть юлу в нашу сторону, а не вниз: другими словами, вес больше не стремится опрокинуть юлу! Напротив, наклоняясь в нашу сторону, юла начинает двигаться так, что ее ось описывает конус вокруг вертикали: такое движение называется прецессией.

Мы видим, что угол между осью юлы и вертикалью остается неизменным: если угол изначально очень маленький (юла почти вертикальна), он таким и останется. Таким образом, вертикальная юла останется вертикальной, несмотря на действие веса.

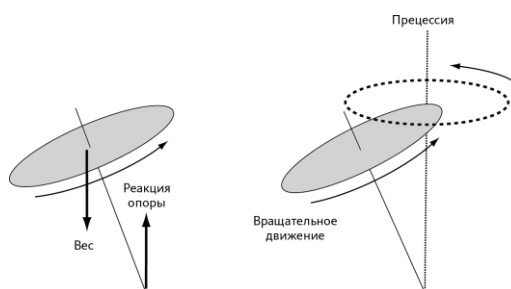


Рис. 6.12 – Явление прецессии

Момент, который совершает вес, заставляет юлу качнуться в нашу сторону из-за гироскопического эффекта. Также, если ось юлы направлена к нам, вес стремится заставить ее качнуться вправо. Таким образом, юла описывает круг по горизонтальной плоскости, благодаря чему ее ось рисует конус вокруг вертикали.

Применение гироскопического эффекта

В конечном итоге «гироскопический эффект», который объясняет устойчивость вращающейся юлы, используется в том числе в том, что мы называем гироскопами. Когда они вращаются вокруг своей оси, ось их вращения направлена в определенную сторону: благодаря гироскопическому эффекту изменить наклон этой оси очень трудно, подобно тому как вес не может наклонить юлу.

Предположим, что мы поместили гироскоп в искусственный спутник таким образом, чтобы ось его вращения указывала на известную звезду. Спутник может двигаться как угодно, благодаря гироскопическому эффекту направление оси вращения гироскопа не изменится.

В конечном итоге, измеряя наклон гироскопа по отношению к спутнику (что довольно легко), можно вычислить наклон спутника по отношению к известной звезде. Иными словами, нам известно направление спутника в любой момент. Благодаря этому гироскопы широко используются для контроля поведения спутников.

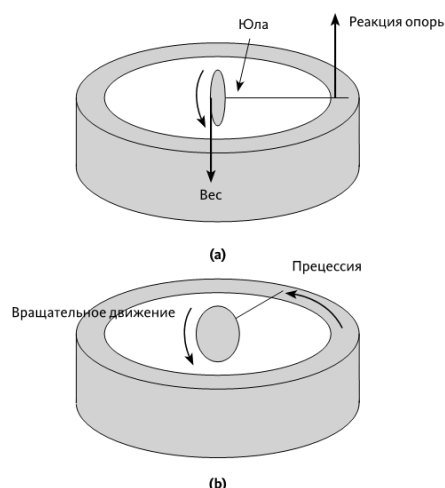


Рис. 6.13 – Юла в равновесии над пустотой

Ситуация такая же, как и на рис. 6.12, только здесь юла лежит горизонтально. Вес не стремится заставить юлу упасть, но старается заставить ее вращаться, сохраняя горизонтальное положение (прецессия).

Таким образом, масса юлы вращается вокруг своей оси, а кончик острия описывает круг. Следует подчеркнуть, что стержень не скатывается с опоры благодаря вращению юлы: предполагается, что опора лишена всякой шероховатости, которая может спровоцировать падение.

С другой стороны, если бы мы зафиксировали стержень, круг описывала бы масса юлы, как на рис. 6.12, так, что смогла бы вращаться.

Последний «волшебный» опыт

В предыдущих примерах мы рассматривали юлу мало отклоненную от вертикали. А теперь предположим, что юла лежит горизонтально на высокой подставке таким образом, что только кончик ее острия касается опоры (→ **рис. 6.13.а**): то есть юла подвешена над пустотой. Если юла не вращается, само собой разумеется, что вес стремится заставить ее упасть.

Но если юла вращается, вес стремится увлечь ее не вниз, а вдоль горизонтальной плоскости (→ **рис. 6.13.б**). Другими словами, юла вращается вокруг своей оси и не падает! Реакции опоры на конце острия достаточно, чтобы удерживать юлу в подвешенном состоянии!

В конце концов, если этот опыт кажется нам таким волшебным, то потому что нам, как когда-то Аристотелю, хочется связать воедино силу и скорость: таким образом, вес, направленный вниз, логично объединить с движением вниз. В действительности сила вызывает ускорение, а оно не всегда направлено в сторону движения (например, «нормальное» ускорение никак не влияет на величину скорости).

Рис. 6.11, без сомнения, дает наилучший наглядный пример ограниченности нашей интуиции.



ПОЧЕМУ ВЕЛОСИПЕД И МОТОЦИКЛ НЕ ПАДАЮТ ПРИ ЕЗДЕ?

Каждый знает, что неподвижный велосипед падает на бок, тогда как едущий велосипед удерживает равновесие. Та же история и с мотоциклом.

Начнем с мотоцикла: поскольку он никогда не бывает идеально вертикален, возникает момент веса, который стремится заставить мотоцикл упасть вправо или влево.

Возьмем колесо и представим, что вес стремится заставить его упасть вправо. Если колесо вращается, гироскопический эффект не дает ему упасть, однако колесо, оставаясь вертикальным, клонится вправо (колесо наклоняется, но в направлении, перпендикулярном интуитивному).

Оно увлекает за собой руль, который поворачивает вправо, то есть мотоцикл совершает поворот направо. Однако центробежная сила направлена за пределы окружности поворота, то есть она направлена влево, в то время как вес тянет мотоцикл вправо. В конечном итоге мотоцикл сможет сохранить равновесие, несмотря на действие веса, благодаря центробежной силе.

Этот довольно сложный феномен, объясняющий равновесие мотоцикла в движении, должен был бы распространяться и на велосипед. Но у велосипеда скорость вращения колес слишком слаба, чтобы гироскопический эффект сыграл значительную роль. Почему же в таком случае велосипед во время движения остается в равновесии?

А все зависит от нахождения центра тяжести руля, чья основная масса сосредоточена *впереди* вилки колеса. Наклоните стоящий велосипед вправо: руль повернется вправо только под действием собственного веса. Это заменяет гироскопический эффект, и это действует даже при небольших скоростях.

Таким образом, велосипед, наклоняясь вправо, совершает поворот вправо из-за наклона руля: центробежная сила компенсирует действие веса и не дает велосипеду упасть, как и в случае с мотоциклом. Это объясняет равновесие велосипеда в движении.

Вы можете провести эксперимент, поместив что-то тяжелое *позади* вилки переднего колеса, непосредственно связанной с рулем: велосипед не сможет держать равновесие. Более того, если вы зафиксируете руль, чтобы он не крутился, вы не сможете проехать и двух метров, чтобы не упасть.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Момент силы представляет собой способность этой силы заставить объект вращаться вокруг своей оси. Он выражается как $Fl \sin \alpha$ (где F – сила, l – расстояние до оси, а α – угол между вектором силы и направлением оси).
- Понятие момента помогает усвоить, почему длинный рычаг позволяет увеличить приложенную силу: отношение силы, приложенной к одному плечу рычага, к другому обратно пропорционально отношению расстояний от точек приложения этих сил до оси вращения.
- Момент импульса зависит от скорости вращения объекта вокруг своей оси и выражается $mv l \sin \alpha$ (где m – масса объекта, v – его скорость, l – расстояние до оси вращения, а α – угол между вектором скорости и направлением оси).
- Если силы не образуют никакого момента, момент импульса сохраняется. Объекты, приближенные к оси вращения, начинают вращаться быстрее. Если расстояние до оси сократить вдвое, скорость возрастет в два раза, а количество оборотов в секунду – в четыре раза.
- Закон сохранения момента импульса объясняет, почему зима в Северном полушарии короче лета, постепенное отдаление Луны, а также сильные ветра циклона.
- Гироскопический эффект подразумевает, что вращающийся объект отклоняется перпендикулярно вектору двух приложенных сил. Он объясняет равновесие мотоцикла в движении.

Часть 2

Термодинамика

Об энергии любых масштабов

7. Что такое энергия?

Мы во всех аспектах рассмотрели силу и давление, которые являются основой механики. Пришло время приступить к двум более сложным понятиям, о которых мы говорим ежедневно, – энергии и температуре, которые являются основой термодинамики. В частности, мы разберемся в том, почему нельзя ни создать, ни уничтожить энергию, а можно лишь перевести одну форму энергии в другую. Мы рассмотрим два вида энергии: потенциальную – ту, что содержится в барреле нефти или в водохранилище, и кинетическую – энергию горящей печи или движущегося автомобиля.

1. Энергия в повседневной жизни

Энергия кинетическая и энергия потенциальная

Как и в случае с силой, мы постараемся дать наиболее точное определение энергии, которое наилучшим образом отвечает интуитивному смыслу, который мы ему придаем. Дело это нелегкое, так как в повседневном лексиконе понятие энергии выражается очень по-разному. В истории физики понятие энергии складывалось постепенно и довольно долго.

Попробуем рассмотреть разные случаи, когда это понятие может возникнуть:

- прием пищи дает нам энергию на целый день, то есть возможность ходить, заниматься спортом, размышлять, разговаривать и т. д.;

- компания *Electricité de France* вырабатывает электрическую энергию, которая отапливает наше жилье, позволяет работать микроволновой печи или электрической плите, а также холодильнику, телевизору, осветительным приборам и т. д.;

- нефть содержит энергию, позволяющую работать моторам наших машин и самолетов или нагревать водяной пар электроцентралей, которые, в свою очередь, питают свои электрогенераторы;

- в этом же ряду можно назвать ветер, вращающий крылья ветроэнергетических установок; речная вода заставляет вращаться турбины ГЭС, а атомная энергия дает необходимое тепло, чтобы испарять воду тех же электростанций.

Мы могли бы привести еще множество других примеров: очень трудно разобраться во всех этих ипостасях энергии, чтобы добиться единого и простого понятия. Однако, несмотря на все свое разнообразие, перечисленные примеры содержат общие признаки, которые мы можем выделить. В целом мы можем выделить два основных вида энергии:

- Пища и нефть, среди многих других источников, содержат энергию, *способную* высвободиться. Энергия барреля нефти или бифштекса не видна: они представляют интерес только в том смысле, в каком они могут *вырабатывать* энергию, если мы используем их разумно. То есть про них мы скажем, что они содержат «потенциальную» энергию, подчеркнув этот «потенциал» энергии, который остается скрытым. Можно привести еще множество примеров потенциальной энергии (в частности, атомной), в дальнейшем мы остановимся на них подробнее.

- С другой стороны, ветряной генератор или горящая печь обладают энергией «явной». Мы интуитивно связываем тепло и движение с энергией, но не в «потенциальной» форме, а в реальной и конкретной. Нефть представляет интерес только потому, что может дать тепло (если ее сжечь) или обеспечить движение (в моторе машины). Точно так же пища дает нашему телу тепло (чтобы поддерживать в нем температуру 36,6 °C), чтобы мы могли двигаться, ходить, говорить и т. д.

Таким образом, тепло и движение кажутся двумя наглядными формами энергии (к которым мы можем добавить и свет). Однако тепло также включает в себе понятие движения.

И действительно, даже при отсутствии ветра воздух состоит из молекул, которые перемещаются с большой скоростью. Столкновение этих молекул с различными предметами создает силу давления. Между тем повышенная температура является результатом более быстрого перемещения этих молекул (в этом мы убедимся в дальнейшем). Таким образом, понятие «тепло» тесно связано со скоростью движения, даже если это движение не видно невооруженным глазом, потому что оно происходит на микроскопическом (молекулярном) уровне.

Таким образом, чтобы получить тепло или придать движение объекту, требуется увеличение скорости (скорости молекул для выработки тепла или скорости самого объекта). Вот почему эта «материализованная» форма энергии называется кинетической.

Что касается энергии света, эта тема более сложная, и мы рассмотрим ее в разделе, посвященном оптике.

Подведем итог. Энергия может проявляться в двух видах: потенциальной и кинетической. Полная энергия объекта, по сути, просто сумма его потенциальной и кинетической энергии.

Энергия макроскопическая и микроскопическая

Мы видели, что кинетическая энергия может проявляться в микроскопической (термическая) или макроскопической (видимое движение) формах. То же самое свойственно и потенциальной энергии.

- Поднесите зажженную спичку к луже нефти: она загорится, и нефть будет выделять большое количество тепла. То есть она будет вырабатывать кинетическую энергию

с помощью процесса на микроскопическом уровне (перераспределение молекул). То есть баррель нефти обладает «потенциальной микроскопической энергией».

• Поднимите ручку в воздух, а затем бросьте ее: она полетит вниз под воздействием силы тяжести, иными словами, ручка обретет кинетическую энергию с помощью процесса на макроскопическом уровне (сила тяжести). Про предмет, находящийся на высоте, говорят, что он обладает «потенциальной макроскопической энергией».

Таким образом, полную энергию объекта можно поделить на четыре типа: два для кинетической энергии (макроскопическая и микроскопическая) и два для потенциальной.

Приведем заключительный пример, чтобы расставить все по местам: выбросьте горячий бифштекс из окна. Пролетая через окно, бифштекс обладает сразу четырьмя видами энергии:

- кинетической макроскопической, потому что движется;
- кинетической микроскопической, потому что он горячий;
- потенциальной макроскопической, потому что он находится в воздухе, а падение придаст ему кинетическую энергию;
- потенциальной микроскопической энергией, потому что бифштекс содержит калории, способные проявить себя в кинетической форме, если мы его съедем.

В физике принято относить макро- и микроявления к разным группам. Таким образом, общая макроскопическая энергия (кинетическая + потенциальная) называется механической энергией. Общая микроскопическая энергия называется внутренней энергией. То есть полная энергия объекта представляет собой совокупность механической и внутренней энергии.

Помимо этой видимой сложности, не следует забывать о физическом смысле энергии, который замечательно прост:

«Энергия существует, если есть движение или возможность движения».

Однако понятие движения относительно, оно зависит от системы отсчета: то есть понятие энергии также не является абсолютным. Объект может обладать энергией в одной системе отсчета и не обладать ею в другой.

Представьте, что вы в машине, едущей со скоростью 90 км/ч, рядом с открытым окном, и вытяните руки в стороны, так чтобы одна рука высунулась наружу, а другая осталась внутри. Если вы сидите не двигаясь, вы не причините никакого вреда рядом сидящему пассажиру. Но человек, стоящий близко к краю дороги, будет мгновенно сбит вашей рукой, даже если вы будете сидеть неподвижно. Иными словами, ваша кинетическая энергия равна нулю с точки зрения пассажира (система отсчета машины), но она весьма велика с точки зрения человека у края дороги (земная система отсчета).



НЕСКОЛЬКО ЗАМЕЧАНИЙ

В физике кинетическая энергия обозначается E_k , а потенциальная E_p . Они делятся на микроскопическую и макроскопическую составляющие, что можно выразить как:

$$E_k = E_{k_{\text{mic}}} + E_{k_{\text{mac}}} \text{ и } E_p = E_{p_{\text{mic}}} + E_{p_{\text{mac}}}$$

Таким образом, общая E равна:

$$E = E_k + E_p = E_{k_{\text{mic}}} + E_{k_{\text{mac}}} + E_{p_{\text{mic}}} + E_{p_{\text{mac}}}$$

Макроскопические составляющие складываются в механическую энергию, обозначаемую E_m : $E_m = E_{k_{\text{mac}}} + E_{p_{\text{mac}}}$. Микроскопические составляющие складываются во внутреннюю энергию, обозначаемую U : $U = E_{k_{\text{mic}}} + E_{p_{\text{mic}}}$.

Следовательно, общая энергия равна: $E = U + E_m$.

Если физический смысл энергии был четко выявлен в вышесказанном, то ее определение пока остается неясным: движение – понятие довольно расплывчатое. Определяется ли кинетическая энергия только при наличии скорости? Ответ – нет, и в двух последующих параграфах мы рассмотрим это подробнее.

2. Кинетическая энергия, температура и движение

Температура

Определение температуры

В предыдущем параграфе мы дали понять, что повышенная микроскопическая кинетическая энергия соответствовала повышенной температуре. Прежде чем идти дальше, очень важно уточнить, что же такое температура тела.

Исторически температура была связана с понятием тепла и холода (это также ее интуитивный смысл). Но поскольку ощущения тепла и холода весьма субъективны, пришлось найти средство для точного измерения этой самой температуры. Между тем люди заметили, что газы и металлы увеличиваются в объеме при нагревании – например, так ведет себя ртуть. Это изменение в объеме стали использовать для измерения температуры: в ртутном термометре чем выше столбик ртути, тем выше температура.

Также было замечено, что при определенном уровне давления лед превращался в жидкую воду при том же уровне ртути, то есть при той же температуре. То же самое при переходе воды в пар. Первыми двумя переменными состояния воспользовались, чтобы определить температурную шкалу: такой шкалой стала шкала Цельсия.

Было условлено, что при атмосферном давлении в 1 бар превращение воды в лед совершается при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Превращение воды в пар при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для любой другой температуры между $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ измеряют объем газа при давлении в 1 бар.

Возьмем реалистический пример: предположим, что при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ объем газа составляет 73 л, а при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 100 л: среднее значение между 100 л и 73 л – 86,5 л. Это значит, что если однажды объем газа составит 86,5 л, это будет соответствовать температуре в $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (среднему значению между $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Мы видим, что определенный объем соответствует определенной температуре: значение температуры соответствует определенному значению объема.

В предыдущем примере, если объем газа будет меньше 73 л, значит, температура опустилась ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. А вот газ никогда не сможет иметь объем меньше 0 л... Что означает, что температура никогда не сможет опуститься ниже некоего минимального уровня, соответствующего этому объему в 0 л!

Простой подсчет поможет определить этот минимальный уровень: получается $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (пытливый читатель может проверить это на предыдущем примере). Это значение называется абсолютным нулем, температура ни в коем случае не может быть ниже.

На основе этого вывода была введена новая температурная шкала, которой физики пользуются значительно чаще, чем шкалой Цельсия, – шкала Кельвина. По сути, это простое переложение значений шкалы Цельсия таким образом, что абсолютный нуль соответствует $0\text{ }^{\circ}\text{K}$ (Кельвина), то есть $0\text{ }^{\circ}\text{K} = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (абсолютный нуль). $273,15\text{ }^{\circ}\text{K}$ соответствует $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. $373,15\text{ }^{\circ}\text{K} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и так далее. Мы видим, что температура по Кельвину ни в коем случае не может быть отрицательной.

В дальнейшем, если не будет указано иное, по умолчанию будет использоваться температурная шкала Кельвина.

Связь между температурой, объемом и давлением

Определение температуры, каким мы вывели его в предыдущем параграфе, дает

понять, что она не связана со скоростью молекул. Чтобы понять, откуда же берется эта связь, определим, от чего зависит описанная таким образом температура.

- Пункт первый. По определению температуры по Кельвину удвоенный объем газа соответствует удвоенной температуре (при атмосферном давлении), то есть при определенном давлении температура пропорциональна объему газа.

- Пункт второй. Заклучим газ в твердый баллон с определенным объемом. Нагреем баллон: температура повысится, но на этот раз объем не сможет возрасти параллельно. Мы замечаем, что при этом увеличивается давление: если температура по Кельвину удваивается, то удваивается и давление газа.

Таким образом, при определенном объеме *температура пропорциональна давлению газа* (установлено опытным путем).

В более общем смысле опыты показывают, что температура T просто пропорциональна произведению давления P и объема газа V .

- Пункт третий. Предыдущий результат верен только для конкретного количества газа: если мы возьмем газа в два раза больше (при определенном давлении и температуре), очевидно, что занимаемый объем будет вдвое больше. Например, при давлении в 1 бар и температуре 20 °C объем воздуха в 20 л содержит вдвое больше молекул, чем объем в 10 л.

Таким образом, произведение PV пропорционально температуре не только T , но также количеству молекул n , которое содержит газ.

Мы запишем это как $PV = nkT$, где k соответствует константе пропорциональности, которая называется постоянной Больцмана.



ОБЪЯСНЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО НУЛЯ

Экспериментальное выражение $PV = nkT$ позволяет найти объяснение существованию минимальной температуры, ниже которой не существует.

И действительно, оно подразумевает, что при определенном объеме газа давление пропорционально температуре: иными словами, нулевая температура соответствует нулевому давлению. Между тем мы выяснили, что давление внутри газа происходит из-за столкновения молекул друг с другом: эти удары воздействуют с большой силой на любой предмет, который им встречается.

Если давление нулевое, значит, ударов больше нет, а это возможно, только если молекулы будут неподвижны. Но мы уже упоминали, что температура связана с этим движением молекул: если они неподвижны, такое состояние соответствует нулевой температуре. Имеется в виду, что ниже температура опуститься уже не может...

Предыдущее выражение записывается также $P = k \frac{n}{V} T$. Отношение n/V означает количество молекул на 1 м³ газа: это называется концентрацией, которую мы обозначим c . Таким образом, мы получаем $PV = kcT$: давление пропорционально произведению концентрации и температуры.

Это отношение, полученное опытным путем, будет очень полезно для понимания связи между температурой и микроскопической кинетической энергией, которая так нас интересует.



УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

В выражении $PV = nkT$, которое мы получили, n представляет количество молекул газа в объеме V . Между тем число это огромно: мы уже говорили, что в кубическом сантиметре воздуха содержится десять миллиардов миллиардов

молекул.

Именно поэтому мы предпочитаем выражать количество материи не в молекулах, а в молях. Моль представляет собой количество атомов, содержащихся в 12 г углерода, что соответствует огромному количеству материи: один моль воздуха содержит миллион миллиардов миллиардов молекул...

Если мы обозначим количество молей ν , предыдущее выражение приобретает вид: $PV = \nu RT$.

Изменилась только постоянная пропорциональности: из k она превратилась в R , которая называется универсальной газовой постоянной. А полученное выражение называется уравнением состояния идеального газа.

Почему «идеального»? Потому что это выражение не проверено опытным путем при очень высоком давлении по причинам, о которых мы расскажем в главе 11. Таким образом, когда можно использовать это выражение (что вполне устраивает физиков), говорят, что газ идеальный.

Отметим, что при атмосферном давлении воздух ведет себя совершенно как идеальный газ, что придает этому выражению большую значимость.

Выражение кинетической энергии

Теперь, когда мы прояснили ситуацию с определением температуры и ее зависимостей, вернемся к понятию энергии, а именно кинетической энергии.

Какое определение мы могли бы ей дать?

Очевидно, что в определении кинетической энергии должна присутствовать скорость: чем быстрее мы шагаем, тем больше у нас энергии. Но в игру вступает и другой параметр.

Выстрелите ядром из пушки: оно может пробить стену. Выстрелите теннисным шариком с той же скоростью: пробить стену будет гораздо сложнее. Мы интуитивно чувствуем, что при одинаковой скорости теннисный шарик обладает меньшей энергией, чем пушечное ядро. Причина в том, что ядро обладает гораздо большей инертностью (= массой), чем шарик: после выстрела ему трудно будет остановиться. Таким образом, инертная масса тоже должна быть упомянута в определении кинетической энергии.

Мы могли бы выразить кинетическую энергию в виде $E_K = mv$ (где m – масса объекта, а v – скорость). Но нужно учесть еще одно обязательное правило, которое мы себе установили: чтобы соответствовать интуитивному смыслу, кинетическая энергия должна быть связана с понятием температуры.

Однако можно показать, что температура пропорциональна mv^2 , где v^2 – квадрат средней скорости всех молекул тела, которое не обладает общим движением (доказательство этого довольно сложно, мы вынесли его во врезку ниже). Именно поэтому мы выразим кинетическую энергию объекта с массой m и скоростью v следующим образом $E_K = \frac{1}{2}mv^2$.



ТЕМПЕРАТУРА И ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ

Чтобы понять связь между температурой и скоростью молекул, необходимо совершить путешествие в микромир. Мы ограничимся примером газа со стандартным давлением окружающей среды. Более того, предположим, что этот газ неподвижен, то есть не подвержен макроскопическому движению (= нет ветра).

Опытным путем мы уже установили связь между температурой и давлением, то есть остается определить связь между давлением и скоростью молекул, чтобы вывести из нее связь между температурой и скоростью этих молекул.

Сразу уточним важный факт: из-за бесконечных столкновений между собой молекулы перемещаются в самых разных направлениях с очень разными скоростями. То есть поведение газа на микроскопическом уровне весьма

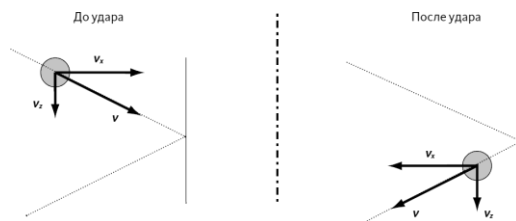
беспорядочно.

Предположим, что в газ поместили перегородку, каждая из молекул будет сталкиваться с ней с разной скоростью. В дальнейшем мы назовем v_x составляющую скорости, вектор которой перпендикулярен перегородке (см. схему ниже). Именно эта составляющая будет управлять силой удара о перегородку. Чтобы немного упростить наши рассуждения, на первое время представим, что все молекулы обладают одной и той же скоростью v_x .

Давление газа соответствует силе, с которой он действует на перегородку в 1 м^2 из-за столкновения с ней молекул. Чем больше молекул ударяет в перегородку за единицу времени, тем выше давление. Таким образом, давление пропорционально концентрации молекул и их скорости v_x (потому что чем быстрее движутся молекулы, тем больше их ударяется в перегородку за единицу времени).

Чтобы определить давление, остается определить силу, с которой действует каждая из молекул: формула $F = ma$ нам в этом поможет. Она показывает, что сила пропорциональна массе молекулы и ее ускорению, то есть изменению ее скорости за единицу времени.

Однако во время удара молекула сначала затормозит из-за электростатического отталкивания, а потом полетит в другую сторону (см. схему ниже). На схеме мы видим, что меняется только составляющая скорости v_x : сначала она переходит от v_x к нулю, а потом меняет направление и возрастает от 0 до v_x . То есть изменение этой составляющей во время удара составляет $2v_x$.



Подведем итог:

- каждая молекула действует с силой, пропорциональной ее массе и изменению скорости $2v_x$;
- количество молекул, действующих с этой силой, пропорционально их концентрации c и их скорости v_x ;
- таким образом, общее давление всех молекул пропорционально cmv_x^2 .

На практике каждая молекула имеет разную скорость, и v_x^2 представляет собой *средний* квадрат скорости всех молекул.

Более того, поскольку движение молекул абсолютно хаотично, никакое из направлений нельзя считать основным, то есть составляющие скорости в трех направлениях пространства v_x , v_y , и v_z равны. Однако математика говорит нам, что скорость удовлетворяет выражению: $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$, то есть в данном случае $v^2 = 3v_x^2$.

Отсюда следует, что общее давление просто пропорционально cmv^2 . Скорость v называется средней квадратичной скоростью молекул.

Но что мы видим благодаря опыту? Что давление P пропорционально cT (см. предыдущую часть). Таким образом, P пропорционально cmv^2 и пропорционально cT . Это значит, что температура T пропорциональна mv^2 . Это можно записать как:

$$\left. \begin{aligned} P &= kcT \\ P &= k'cmv^2 \end{aligned} \right\} \text{ то есть } T = \frac{k'}{k} mv^2.$$

Температура пропорциональна средней кинетической энергии молекул, какой мы ее определили ($E_K = \frac{1}{2}mv^2$). Отметим, что формула одинакова для жидкостей и твердых тел.

Такое определение средней микроскопической кинетической энергии молекул

характеризует *температуру* неподвижного тела, в то время как макроскопическая кинетическая энергия характеризует *движение* тела. Таким образом, кинетическая энергия одновременно связана с понятием температуры и понятием макроскопического движения.

Может возникнуть вопрос, что это за коэффициент $\frac{1}{2}$, который мы ввели. Объяснение этого мы оставим до следующей главы. А пока что заметим, что этот фактор абсолютно не меняет физического смысла кинетической энергии.



ТЕМПЕРАТУРА ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЖИДКОСТИ

В случае с газом мы убедились, что температура была связана со скоростью молекул. А как обстоит дело с твердыми телами и жидкостями? В твердых телах, например, молекулы и атомы не могут передвигаться на большие расстояния.

На самом деле даже в твердом теле атомы никогда не находятся в полном покое: несмотря на тесное соседство, они колеблются на определенном месте. То есть они обладают средней кинетической энергией, пропорциональной температуре твердого тела: чем теплее твердое тело, тем сильнее вибрируют составляющие его атомы.

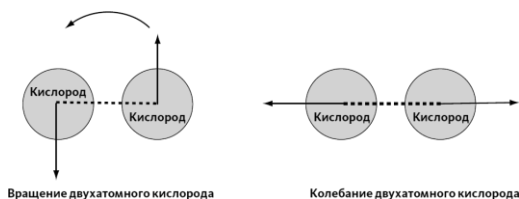
Та же картина с жидкостью в состоянии покоя: молекулы могут перемещаться и, соответственно, обладают средней кинетической энергией, пропорциональной температуре жидкости.

Единица кинетической энергии – джоуль. Чтобы представить себе ее масштаб, заметим, что макроскопическая кинетическая энергия шагающего человека приблизительно равна 60 Дж. У машины, движущейся со скоростью 50 км/ч, около 100 000 Дж. Что же касается микроскопической кинетической энергии нашего тела, находящегося в покое (при температуре 37 °C), она составляет несколько десятков миллионов джоулей! То есть большая часть нашей энергии скрыта, поскольку представлена на микроскопическом уровне: движение молекулярного уровня гораздо более быстрое и повсеместное, чем в нашем масштабе.



ВРАЩЕНИЕ И КОЛЕБАНИЕ МОЛЕКУЛ

Выше мы говорили о том, что температура связана со средней кинетической энергией молекул. Мы говорили только о *перемещении* молекул, которое сообщает им кинетическую энергию. Но даже неподвижная молекула может обладать кинетической энергией.



Для примера возьмем двухатомную молекулу кислорода O_2 (см. схему выше). Она может вращаться вокруг своей оси, то есть атомы кислорода могут обладать скоростью, даже если в целом молекула не перемещается. Более того, атомы кислорода могут вибрировать, то приближаясь, то удаляясь друг от друга, как если бы они были соединены пружиной (в реальности такой пружиной служит электростатическая сила).

Таким образом, к кинетической энергии *перемещения* нужно добавить кинетическую энергию *вращения и колебания* молекулы. Однако температура

характеризует только перемещение по оси (это подтверждают рассуждения, которые позволили нам провести связь между температурой и скоростью молекул): следует ли из этого, что выражение пропорциональности между температурой и средней кинетической энергией молекул ложно?

Нет, потому что при столкновениях кинетическая энергия молекул естественно распределяется между перемещением, вращением и колебанием. Иными словами, чем больше средняя скорость молекул, тем более быстрое вращение и более сильное колебание вызывают столкновения. То есть при обычных температурах кинетическая энергия вращения и колебания пропорциональна кинетической энергии перемещения, а температура остается пропорциональна *всей* средней кинетической энергии молекул.

3. Потенциальная энергия и закон сохранения энергии

Смысл потенциальной энергии

До сих пор мы рассматривали энергию кинетическую в ее макро- и микроскопическом (температура) аспектах. Она одна воплощает в себе все формы энергии, какие мы только можем себе представить: например, электрическая энергия связана с движением электронов по проводам.

Что же касается барреля нефти, бифштекса или ядерного топлива, они обладают энергией только в том смысле, в котором они способны вырабатывать кинетическую энергию. То есть они обладают потенциалом раскрыть кинетическую энергию. Другими словами, они обладают потенциальной кинетической энергией (что мы сокращаем до потенциальной энергии).

Из этого мы могли бы заключить, что на самом деле они энергией не обладают, ибо она всего лишь потенциальна. Но на самом деле под энергией мы подразумеваем настоящую кинетическую энергию и скрытую, которой предстоит себя проявить. То есть понятие энергии объединяет «явную» кинетическую энергию и кинетическую энергию потенциальную.

Приведем пример, чтобы точнее сформулировать понятие потенциальной энергии. Бросим мяч с крыши многоэтажного дома (силу трения в данном примере мы не учитываем). Изначально у мяча нет никакой скорости, то есть никакой кинетической энергии. Но благодаря гравитации мяч приобретет скорость, то есть он обладает «потенциальной кинетической энергией». Чему она равна?

Пророем яму к центру Земли: мяч продолжит падать с ускорением до тех пор, пока не достигнет центра Земли. То есть именно в центре Земли мяч достигнет своей максимальной кинетической энергии, которую мы обозначим E_{Kmax} . Это значит, что в момент броска мяч обладал «потенциальной энергией», равной E_{Kmax} (= он обладал потенциалом выработать кинетическую энергию E_{Kmax}) (→ рис. 7.1).

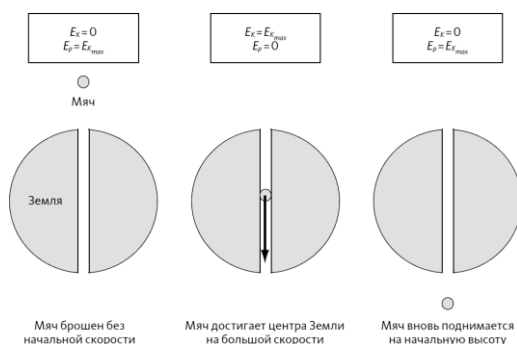


Рис. 7.1 – Свободное падение мяча в туннеле, пересекающем Землю

С другой стороны, достигнув центра Земли, мяч больше не сможет ускоряться: его потенциальная энергия станет нулевой. То есть потенциальная энергия мяча, которую ему придает тяжесть, напрямую связана с высотой, на которой он находится: чем с большей высоты он падает, тем большую скорость он разовьет при падении.

Мы видим, что во время падения кинетическая энергия мяча изменилась от 0 до E_{Kmax} , в то время как его потенциальная энергия изменилась с E_{Kmax} до 0. Таким образом, общая энергия мяча (кинетическая + потенциальная) во время его движения осталась неизменной: его «потенциальная» энергия просто перешла в «кинетическую».



ВЕЛИЧИНА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Представим электрон, расположенный рядом с протоном. Предположим, что речь идет о точечных частицах. Из-за электростатического притяжения у электрона появится кинетическая энергия, потому что он будет ускоряться в сторону протона. То есть он с самого начала обладает потенциальной энергией.

Но сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между электроном и протоном. По мере того как электрон будет приближаться к протону, сила будет нарастать, а в момент их контакта она уже будет стремиться к бесконечности. Это значит, что ускорение будет стремиться к бесконечности: электрон приобретет бесконечную кинетическую энергию. Иными словами, изначально электрон обладал бесконечной потенциальной энергией.

Вывод довольно досадный: если все частицы обладают бесконечной потенциальной энергией, понятие потенциальной энергии становится не вполне адекватным... Именно по этой причине физики предпочитают считать «началом» потенциальной энергии то место, какое сочтут нужным. Другими словами, они скажут, к примеру, что потенциальная энергия электрона, находящегося в 1 м от протона, *условно* равна 0.

То есть величина потенциальной энергии не имеет смысла, поскольку она принята условно. В свою очередь, изменение потенциальной энергии сохраняет весь свой смысл: если кинетическая энергия *увеличивается*, потенциальная на столько же *уменьшается*. То есть изменение потенциальной энергии противоположно по смыслу изменению кинетической.

В дальнейшем в квантовой механике мы увидим, что частицы не могут считаться точечными и находящимися в определенном месте, и это уже снимает часть проблемы. Однако физики все же продолжают определять начало потенциальной энергии там, где им хочется...

Поскольку цель этой книги оставаться как можно ближе к физическому смыслу, мы никогда не будем пользоваться подобной условностью. В данной книге если объект обладает потенциальной энергией E , то это потому, что он действительно может приобрести максимальную кинетическую энергию E .

Точно так же кинетическая энергия может превратиться в потенциальную. Так будет, если мы продолжим туннель на другую сторону Земли. Увлекаемый своим полетом мяч продолжит траекторию вдоль по туннелю. В этом случае его кинетическая энергия уменьшится, а потенциальная будет параллельно возрастать (мяч будет набирать высоту).

Из предыдущего примера мы можем сделать несколько выводов. Первый в том, что понятие потенциальной энергии связано с понятием силы. В самом деле, чтобы объект обладал потенциальной энергией, необходимо, чтобы он мог достичь энергии кинетической, то есть он должен быть способен приобрести ускорение. А где ускорение, там и сила, что приводит нас к выражению $\vec{F} = m\vec{a}$;

Таким образом, своим существованием потенциальная энергия в предыдущем примере обязана силе тяжести, ее называют потенциальной энергией силы тяжести.

С другой стороны, в предыдущем примере мы констатируем, что энергия мяча сохранилась во время его движения. Сохранение энергии – важная идея физики, но ее надо рассматривать с осторожностью. В этом мы убедимся в следующем параграфе.

Сохранение энергии

Энергия сохраняется не всегда

Поскольку энергия содержит всю настоящую и будущую кинетическую энергию, нам хочется сказать, что энергия объекта всегда сохраняется: если объект приобретает кинетическую энергию, значит, часть его потенциальной энергии реализовалась в форме кинетической.

Проблема в том, что потенциальная энергия зависит от силы, действующей на объект, однако сила эта может измениться, если изменится окружающая среда. Энергия объекта сразу изменится тоже.

Приведем пример: возьмем отрицательно заряженный шар, который лежит на земле. Его кинетическая энергия равна нулю, а в отсутствие других заряженных объектов его потенциальная электростатическая энергия также равна нулю (шар не может приобрести скорость таким путем). Теперь поднесем к нему отрицательно заряженную линейку: наш шар внезапно обретает потенциальную энергию, потому что приобретет ускорение из-за отталкивания разных зарядов. Одним словом, шар приобрел энергию просто потому, что его окружение изменилось.

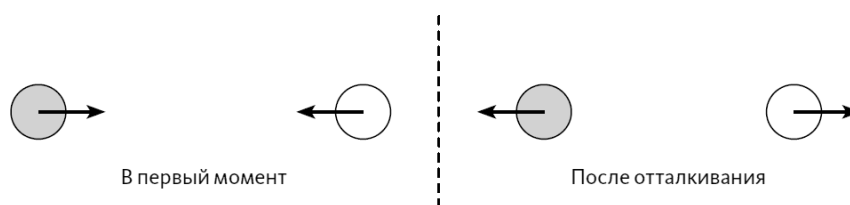
Таким образом, сохранение энергии объекта существует только тогда, когда окружающее его пространство остается неизменным. Так было с мячом, который бросили с крыши дома. Земля, которая его притягивала, оставалась неизменной.

Пример с двумя заряженными шарами

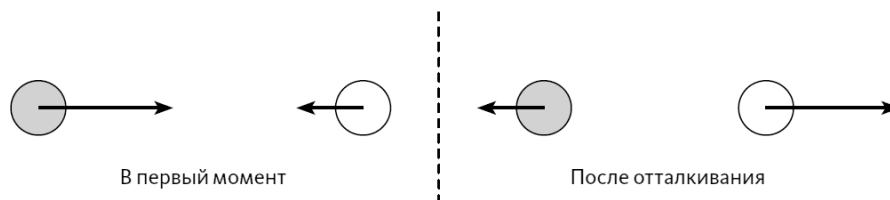
Чтобы все уточнить, разберем другой пример. Для этого возьмем два одинаково заряженных шара с одинаковой массой, которые толкнем навстречу друг другу. Шар слева будет темным, а шар справа светлым.

• **Опыт 1 (→ рис. 7.2.а):** два шара, расположенные на большом расстоянии друг от друга, катятся навстречу друг другу с одинаковой скоростью. На них действует одинаковая сила (принцип взаимодействия), а значит, у них одинаковое ускорение (одинаковая масса). Из-за отталкивания одинаковых зарядов шары затормозят, одновременно остановятся и покатятся в противоположные стороны.

Подведем первый энергетический итог: вначале, когда шары были далеко друг от друга, они не взаимодействовали и их потенциальная энергия была равна нулю (на них не действовала сила). То же самое произошло в конце, когда они снова разошлись на большое расстояние. Таким образом, их энергия является кинетической только в начале и в конце.



(a) Опыт 1. Два шара имеют одинаковую начальную скорость



(b) Опыт 2. Два шара имеют различную начальную скорость

Рис. 7.2 – Отталкивание двух одинаково заряженных шаров

В обоих опытах общая энергия сохраняется. Во втором опыте произошел переход энергии от темного шара к светлому.

Поскольку окружающая среда остается неизменной (и нет никакого внешнего воздействия), общая энергия шаров сохраняется. Это значит, что конечная кинетическая энергия шаров равна их начальной кинетической энергии. Попросту говоря, шары катятся назад с той же скоростью, с какой катились вперед.

• **Опыт 2 (→ рис. 7.2.b):** тот же опыт, но теперь вначале темный шар катится быстрее светлого. И в этом случае ускорение двух шаров одинаково. Поскольку скорость светлого шара меньше, он вскоре остановится и быстро покатится обратно. Темному шару, напротив, понадобится больше времени, чтобы остановиться. Светлый шар будет уже далеко, когда темный покатится в обратную сторону. То есть темному шару не удастся приобрести большую скорость.

Таким образом, темный шар потеряет энергию, поскольку от высокой первоначальной скорости он перейдет к слабой конечной (при этом его потенциальная энергия останется неизменной), а светлый шар энергию приобретет. Такое изменение энергии происходит потому, что окружение шаров нестабильно: на темный шар действует светлый, который находится в движении.

С другой стороны, на оба шара не воздействует ничего извне: то есть их общая энергия должна сохраняться. Это легко проверить по **рис. 8.2.b**: в ходе взаимодействия энергия попросту перешла от темного шара к светлому, но общая энергия шаров осталась прежней.

Учитывая трение

Нам известно достаточно, чтобы вновь обратиться к примеру мяча, который летит с крыши дома, учитывая на этот раз силу трения воздуха. Не будем забывать, что сила трения возникает из-за электростатического отталкивания между молекулами воздуха и атомами мяча: на микроскопическом уровне происходит нечто похожее на то, что показано на **рис. 8.2.b**.

Общая энергия системы (воздух + мяч) сохраняется, но часть энергии мяча сообщается воздуху: кинетическая энергия мяча уменьшается (мяч тормозит), в то время как кинетическая энергия молекул воздуха увеличивается (воздух нагревается).

По мере того как энергия мяча будет снижаться, он достигнет центра Земли с меньшей скоростью, чем в вакууме (у него более слабая кинетическая энергия), и поднимется не так высоко по ту сторону Земли (более слабая потенциальная энергия).

Выводы

Запомним: сохранение энергии объекта существует при условии, что окружающая среда остается неизменной (в том числе на молекулярном уровне, если молекулы взаимодействуют), потому что в этом случае можно определить потенциальную энергию.

В частности, энергия сохраняется, если объект «изолирован». Например, Вселенная (которая изолирована по определению, поскольку ничего вне ее не существует): общая энергия Вселенной сохраняется.

Это означает, что *создать* энергию невозможно. Если мы хотим увеличить количество энергии, необходимо где-то ее взять. Утешительно то, что и уничтожить энергию также невозможно.

Это утверждение влечет за собой многие выводы. Поднимитесь по горной тропинке: вы набираете высоту, следовательно, увеличивается потенциальная энергия силы тяжести, не теряя скорости (кинетическая энергия постоянна). Это значит, что ваша макроскопическая энергия увеличивается. Но вы же где-то берете эту энергию: потенциальная микроскопическая энергия пищи, которую вы употребили, уменьшается благодаря химическим процессам, происходящим в вашем теле.

Также, когда вы спускаетесь по тропинке, вы теряете макроскопическую энергию, но эта энергия переходит в другое место. В частности, она переходит в теплоту – шагая, вы подогреваете пространство вокруг себя.

Таким образом, переход энергии от одного тела к другому в нашей жизни происходит постоянно. В следующей главе мы рассмотрим это в подробностях.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Энергия связана с движением (кинетическая энергия) и с возможностью движения (потенциальная энергия).
- Кинетическая энергия пропорциональна массе объекта m и его скорости в квадрате v . Ее формула $E_K = \frac{1}{2}mv^2$.
- Для умеренного давления отношение между давлением, объемом и температурой газа выражается: $PV = \nu RT$ (где P – давление, V – объем, ν – число молей, T – температура, а R – универсальная газовая постоянная). Это называется уравнением состояния идеального газа.
- Температура тела (по Кельвину) пропорциональна средней кинетической энергии молекул в системе отсчета этого тела. Эта связь помогает объяснить уравнение состояния идеального газа, полученное опытным путем.
- Общая энергия объекта подразделяется на макроскопическую (называемую механической энергией) и микроскопическую (называемую внутренней энергией).
- Общая энергия объекта сохраняется при условии, что внешнее материальное окружение остается неизменным, в том числе на молекулярном уровне, если молекулы взаимодействуют. В противном случае понятие потенциальной энергии для этого объекта не имеет смысла.
- В частности, энергия изолированного объекта сохраняется: во Вселенной невозможно создать или уничтожить энергию.

8. Обмен энергией

В предыдущей главе говорилось о том, что мы можем терять или приобретать энергию с помощью обмена: как именно происходит этот обмен? Что необходимо предпринять, чтобы обрести энергию вновь? Для этого нам понадобится ввести новые понятия, связанные с передачей энергии: мощность и работа. Мы также уточним определение теплоты, которая является частным случаем работы и отличительным понятием температуры.

1. Работа и мощность

Что такое мощность?

Цель: повысить кинетическую энергию

«Воплощенной» формой энергии является энергия кинетическая, будь то макро- или микроскопическая. Именно ее мы в дальнейшем будем стараться увеличить. К потенциальной энергии мы вернемся позднее.

Как увеличить кинетическую энергию объекта? Необходимо, чтобы к нему была приложена какая-то сила, чтобы у него увеличилось ускорение. Но этого недостаточно, чтобы увеличить его скорость.

Возьмем Луну на ее круговой орбите: притяжение Земли удерживает Луну на ее орбите, но скорость ее остается постоянной. И действительно, сила перпендикулярна траектории Луны, то есть она придает ей *нормальное ускорение*, которое *изгибает* траекторию, но не увеличивает скорость (→ **рис. 8.1**).

Теперь бросим яблоко. На этот раз гравитация позволит увеличить его скорость. Сила направлена по траектории яблока, то есть она оказывает *тангенциальное ускорение*, которое состоит в том, что *увеличивает* скорость.

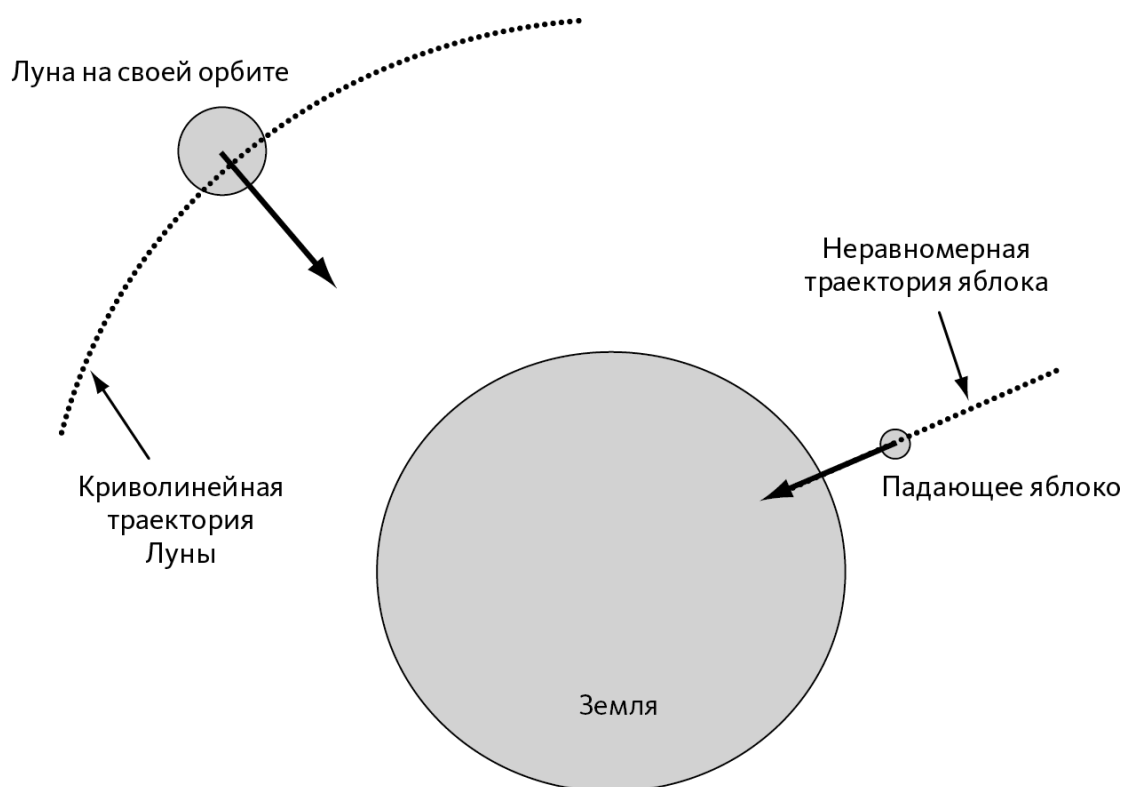
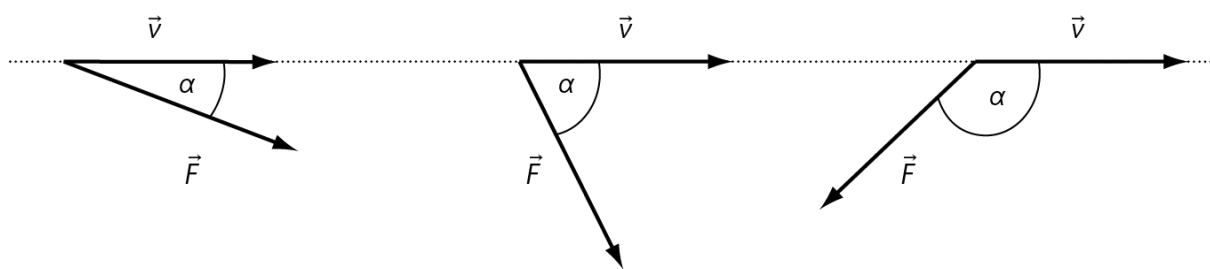


Рис. 8.1 – Сила, с которой Земля действует на Луну и на яблоко

Одним словом, чтобы кинетическая энергия объекта увеличилась, присутствия силы недостаточно: важно также ее направление. Посмотрим на **рис. 8.2**: в (а) сила увеличивает скорость объекта больше, чем в (b), потому что угол между вектором этой силы и траекторией объекта меньше. Мы скажем, что «мощность» этой силы больше.

Если угол 0° , мощность максимальная, потому что сила целиком направлена на увеличение скорости объекта. Если угол 90° , мощность нулевая, потому что сила не увеличивает скорость. Если угол больше 90° , мы видим, что сила, напротив, тормозит объект (→ **рис. 8.2.с**). В данном случае мы скажем, что мощность «отрицательная».



(a) — Высокая мощность (b) — Слабая мощность (c) — Отрицательная мощность
Рис. 8.2 – Мощность силы в зависимости от ее направленности

Если точнее, мощность будет пропорциональна $\cos \alpha$ (если $\alpha = 0$, $\cos \alpha$ максимальный; если $\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$; если $\alpha > 90^\circ$, $\cos \alpha$ – отрицательный).

Мощность представляет собой способность силы увеличить кинетическую энергию объекта $\frac{1}{2}mv^2$ за единицу времени. Чтобы вывести формулу мощности, подведем итоги.

- Сила $\vec{F}$; удовлетворяет выражению $\vec{F} = m\vec{a}$; (где m – масса объекта, а $\vec{a}$ – его ускорение), то есть она меняет $m\vec{v}$; (где $\vec{v}$ – вектор скорости) за единицу времени.

- Произведение $F \cos \alpha$ меняет mv (v на этот раз величина скорости (→ рис. 8.2)).

- То есть произведение $F v \cos \alpha$ заставляет меняться $\frac{1}{2}mv^2$: речь идет о мощности.

Таким образом, формула мощности P выглядит $P = F v \cos \alpha$.

Она пропорциональна приложенной силе F , косинусу угла α между этой силой и траекторией, а еще скорости v объекта. Это означает, что чем быстрее движется объект, тем большей мощности силу нужно приложить, чтобы увеличить его кинетическую энергию за определенный отрезок времени.

Запомним: мощность силы, приложенной к объекту, движущемуся со скоростью v , определяется формулой $P = F v \cos \alpha$. Она выражает изменение кинетической энергии, которую сила может вызвать за единицу времени. В этом случае общая мощность силы, с которой действует окружающая среда, равна изменению кинетической энергии объекта за одну секунду.



ВЫРАЖЕНИЕ МОЩНОСТИ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Наша задача определить общую мощность, которая соответствует изменению кинетической энергии объекта за единицу времени: $N = \frac{dE_k}{dt}$ или $N = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}mv^2 \right)$.

Эта производная считается просто: $N = \vec{v} \cdot \frac{d}{dt} (m\vec{v}^2)$.

А поскольку $\frac{d}{dt} (m\vec{v}^2) = m\vec{a} = \vec{F}$, мы получаем $N = \vec{v} \cdot \vec{F}$; (где $\vec{F}$ – общая сила, которую оказывает окружающая среда).

Таким образом, мы находим $\vec{F} \cdot \vec{v} = F v \cos \alpha$ – определение мощности, которое используют физики. Речь идет об общей мощности, результате равнодействующей силы $\vec{F}$. Таким же способом мы можем определить мощность каждой силы в отдельности.

По ходу дела мы видим целесообразность коэффициента $\frac{1}{2}$ в выражении кинетической энергии. Он исчезает, когда мы вычисляем производную от v^2 , что позволяет получить чрезвычайно простую формулу мощности: $N = \vec{v} \cdot \vec{F}$.

Некоторые обозначения мощности

Мощность выражается в ваттах. Мы уже немного знакомы с этой единицей благодаря электрическим приборам. Возьмем, к примеру, пылесос мощностью 1500 Вт (Вт – ватт): теперь мы знаем, что это означает. Такую электрическую мощность потребляет пылесос для выработки кинетической энергии за одну секунду. Эта энергия воплощается в очень разных процессах:

- сначала воздух приводится в движение, чтобы «засасывать» пыль, – это «полезная» кинетическая энергия пылесоса;

- коснувшись пылесоса, мы почувствуем, что он нагрелся, то есть он выработал микроскопическую кинетическую энергию (повышение температуры);
- наконец, пылесос производит много шума. Но шум производится молекулами воздуха, которые бьют по нашим барабанным перепонкам (к этому мы еще вернемся). То есть шум также связан с кинетической энергией.

Для наглядности приведем пример: мощность 1500 Вт необходима, чтобы сдвинуть с места автомобиль весом в 1000 кг, так чтобы его скорость за одну секунду изменилась с 0 км/ч до 6 км/ч. Для человека эта мощность весьма значительна, и без машин ему пришлось бы довольствоваться более низкими мощностями.



ДРУГИЕ ВЕЛИЧИНЫ МОЩНОСТИ

Мощность, вырабатываемая микроволновой печью и стиральной машиной, примерно одинакова (около 2000 Вт). Разница в том, что печь производит энергию на микроскопическом уровне (нагрев), а стиральная машина на макроскопическом (вращает барабан).

Сила тяжести также может выработать значительную мощность: тело в свободном падении приобретает скорость от 0 до 10 м/с за 1 секунду (таково ускорение свободного падения). То есть мощность, действующая на человека массой 60 кг, равна 3000 Вт.

Что касается мощности, которую может выработать человек, она весьма незначительна: велосипедист, разгоняющийся с 0 до 20 км/ч за 4 секунды, вырабатывает мощность всего лишь порядка 300 Вт.

В свою очередь, автомобиль при столкновении, которое за 100 миллисекунд заставляет его перейти от скорости 50 км/ч до 0 км/ч, испытывает отрицательную мощность около миллиона ватт. Такой удар очень болезнен.

Работать и только работать

Определение работы

Мощность силы соответствует изменению кинетической энергии, которое она может передать объекту за 1 секунду. Если эта мощность действует в течение четырех секунд, изменение энергии будет в четыре раза больше. Таким образом, если мы хотим узнать, на сколько изменится кинетическая энергия за отрезок времени t , нужно умножить мощность на количество времени t .

При постоянной мощности изменение кинетической энергии объекта в определенном промежутке времени равно произведению общей приложенной мощности N и количеству прошедшего времени t .

Это произведение Nt называется «работой» и обозначается буквой A (от нем. Arbeit – работа). Таким образом, работой силы называется прирост кинетической энергии, который она способна придать объекту за определенный отрезок времени.

Напомним, что мощность пропорциональна приложенной силе и скорости объекта. Работа также пропорциональна истекшему времени.

Как известно, при определенной скорости чем больше пройдет времени, тем большее расстояние пройдет объект. То есть работа попросту пропорциональна приложенной силе и расстоянию, пройденному объектом.

Пример

Проиллюстрируем определение работы на примере, чтобы сделать его понятнее.

Попробуйте сдвинуть шкаф. Если шкаф не движется, вы не оказываете на него никакой работы и никакой мощности (шкаф не приобрел кинетической энергии). То есть между вами и шкафом нет передачи энергии.

Но если вам удастся сдвинуть его, значит, вам удалось применить к нему работу: чем дальше вы его сдвинете, тем больше будет работа и тем больше энергии вы ему передадите.

Однако после того, как шкаф будет передвинут, он вновь останется неподвижным. Куда же делась кинетическая энергия, которую вы ему передали? Всею причиной трение поверхности: оно также проделало работу, но отрицательную, поскольку трение препятствовало движению. Таким образом:

- вы проделали положительную работу над шкафом («работа движущей силы»), благодаря чему ваша энергия передавалась мебели: кинетическая энергия шкафа повысилась;
- трение поверхности осуществило отрицательную работу на шкаф («работа силы трения»), что передало энергию поверхности: это уменьшило кинетическую энергию шкафа.

В конечном итоге кинетическая энергия шкафа не увеличилась, а энергия, которую вы ему передали, перешла к полу (в микроскопической форме: шум и повышение температуры).

Итоги

В физике понятие работы является основополагающим, поскольку именно работа позволяет приобрести (или утратить) столь необходимую кинетическую энергию.

Если A означает общую приложенную работу, а E_k кинетическую энергию объекта, это записывают $A = \Delta E_k$.

Символ Δ в физике означает изменение. Таким образом, это выражение означает, что изменение кинетической энергии объекта равно общей приложенной к нему работе (в том числе силы инерции, если она присутствует).

Работа представляет собой передачу энергии, и ее величина обозначается в джоулях, как и величина кинетической энергии. Благодаря электрическим компаниям нам известна и другая единица измерения: киловатт-час (кВт · ч): она представляет собой среднюю потребленную мощность (в киловаттах), помноженную на общее количество часов работы (на электросчетчике это количество часов может отображаться за многие годы, во время которых потреблялась электроэнергия).

Так, если счетчик, установленный год назад, показывает 5000 кВт · ч (что соответствует всей проделанной работе), это значит, что в среднем вы потребили 550 Вт мощности за час (в году 8760 часов). Держу пари, что общая кинетическая энергия, которую вы при этом приобрели, проявилась в основном на микроскопическом уровне: вы подогрели планету...

2. Первый закон термодинамики

Консервативные и неконсервативные силы

Потенциальную энергию по-прежнему невозможно определить

Работа силы позволяет объекту приобрести кинетическую энергию. Однако мы говорили, что потенциальная энергия представляет собой кинетическую энергию, которая может себя проявить. Таким образом, между работой и потенциальной энергией существует очевидная связь.

Если кинетическая энергия способна увеличиться с 0 до E_{kmax} , это значит, что изначальная потенциальная энергия объекта E_{kmax} . Кроме того, когда объект достигнет максимальной кинетической энергии E_{kmax} , еще большей энергии он уже не достигнет, и его потенциальная энергия снизится до 0.

Таким образом, если кинетическая энергия E_k повышается от 0 до E_{kmax} , его потенциальная энергия E_p снижается с E_{kmax} до 0. Изменение E_p прямо противоположно изменению E_k . Поскольку $\Delta E_k = A$, значит, $\Delta E_p = -A$. Это та самая связь, которую мы искали между потенциальной энергией и работой.



СВЯЗЬ МЕЖДУ «НЕИЗМЕННОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ» И ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТОЙ

В предыдущей главе мы говорили, что определить потенциальную энергию можно, если окружающая среда остается неизменной. В этой главе мы говорили, что нужно, чтобы работа не зависела от пройденного пути. Совместимы ли оба этих утверждения?

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо вспомнить, что все силы Вселенной являются проявлением двух фундаментальных сил: гравитации и электромагнетизма. Если окружающая среда неизменна, причиной этого является электростатическая сила.

Изменение этих двух сил обратно пропорционально квадрату расстояния между объектом и притягивающим (отталкивающим) телом. В таком случае проделанная работа зависит только от изменения этого расстояния (математика очень просто это демонстрирует). Если притягивающее (отталкивающее) тело неподвижно, значит, работа зависит исключительно от изменения *положения* объекта. То есть работа не зависит от пути, пройденного между двумя различными точками.

Таким образом, какой бы ни была сила, если окружающая среда, которая воздействует с помощью этой силы, остается неизменной (на макро- и микроскопическом уровнях), то работа не зависит от пройденного пути, и можно определить потенциальную энергию.

Увы, если кинетическая энергия остается определенной ($E_K = \frac{1}{2}mv^2$), с потенциальной все гораздо сложнее. В самом деле, мы видели в предыдущей главе, что для определения потенциальной энергии материальное окружение объекта должно оставаться неизменным. Если окружение объекта меняется, становится невозможно предсказать, какую кинетическую энергию приобретет объект, поскольку «предсказание» будет подвергнуто сомнению изменением окружающей среды.

Если окружение неизменно, можно показать, что возможное приобретение объектом кинетической энергии зависит только от его первоначальной позиции и не зависит от его скорости в этой точке (см. врезку ниже): в этой единственной точке сосредоточена точно определенная потенциальная энергия.

Представим теперь объект, который перемещается из точки А в точку В. Изменение его потенциальной энергии ΔE_p зависит только от его первоначальной позиции (А) и финальной (В). Это изменение будет одинаковым, независимо от того, какой путь прошел объект от точки А в точку В. Поскольку $\Delta E_p = -A$, из этого следует, что работа тоже не должна зависеть от пройденного пути.

Чтобы это продемонстрировать, возьмем два разных примера.

Примеры

Пример 1. Заберемся на возвышение А и бросим с него мяч так, чтобы он упал на пол в определенной точке В. Существует множество способов бросить мяч таким образом: **рис. 8.3** иллюстрирует два из них.

Земля, которая притягивает мяч, неподвижна, а это значит, что мы можем определить потенциальную энергию мяча. В связи с этим работа веса должна быть неизменной, независимо от того, какой путь пройден от А до В.

Быстрый подсчет (который мы оставим в стороне) позволяет убедиться в этом. На траектории (2) пройденное расстояние, конечно, больше, но необходимо отметить, что работа от А до D равна нулю (наполовину сила сопротивления от А до С, наполовину движущая сила от С до D). Что касается работы от D до В, можно продемонстрировать, что она равна работе от А до В (тоже изменение высоты).

Поскольку $\Delta E_C + A$, а $\Delta E_p = -A$, то $\Delta E_k + \Delta E_p = 0$: общее изменение энергии (кинетическая + потенциальная) равно нулю. Таким образом, мы имеем сохранение энергии.

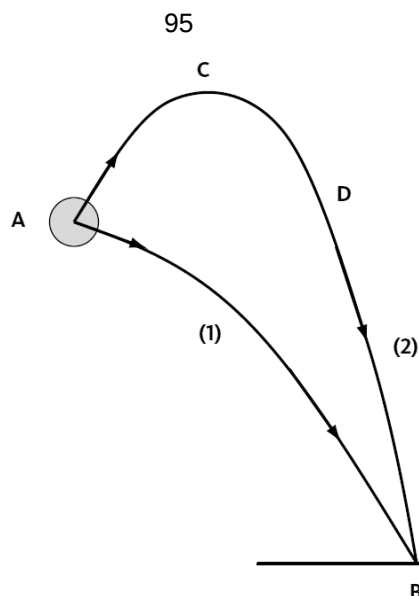


Рис. 8.3 – Мяч в свободном падении перемещается из точки А в точку В по двум разным траекториям

Пример 2. Толкнем шайбу так, чтобы она проехала по полу двумя разными путями: один прямой, а другой с двумя последовательными рикошетами (→ **рис. 8.4**). Сила трения производит работу, которая заставляет шайбу терять кинетическую энергию. На этот раз окружающее пространство, оказывающее действие силы, движется (не будем забывать, что трение вызвано столкновением молекул воздуха и атомов пола с шайбой). То есть мы не можем определить потенциальную энергию шайбы.

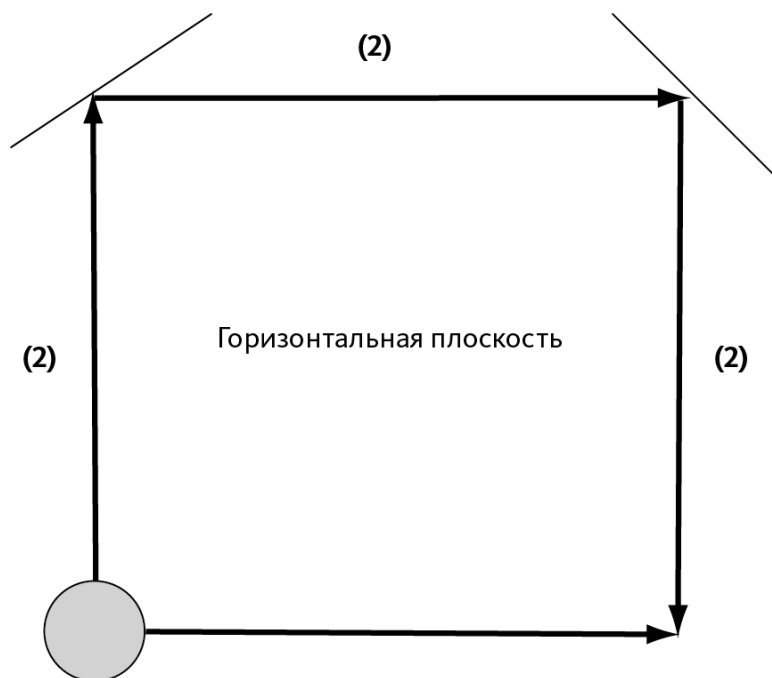


Рис. 8.4 – Путь шайбы от А до В двумя различными способами

Теперь можно легко убедиться в том, что работа силы трения зависит от пройденного пути: путь (2) втрое длиннее пути (1), и сила трения выполняет втрое большую работу.

На этот раз общая энергия шайбы отождествляется с ее кинетической энергией (потенциальная энергия отсутствует). Поскольку $\Delta E_k = A$, а работа отрицательная (трение), это значит, что шайба теряет энергию во время движения. Сохранения энергии нет.

Три типа силы

В примере 1 мы смогли определить потенциальную энергию. Говорят, что сила тяжести происходит из потенциальной энергии. В этом случае существует сохранение общей энергии объекта, потому что «потенциальная» энергия превращается в кинетическую в процессе движения. По этой причине силу тяжести называют «консервативной» силой (она сохраняет общую энергию объекта).

Чтобы определить консервативную силу, необходимо убедиться, что ее работа не зависит от пройденного пути. Такова сила тяжести. В более общем смысле таковыми являются гравитация и электростатическая сила, когда притягивающее (или отталкивающее) тело остается неподвижным. Сюда же относится возвратная сила пружины (которая, напомним, зависит только от растяжения пружины). А также к ним относится сила инерции переноса, если система отсчета равномерно вращается вокруг неподвижной оси.

В примере 2, напротив, не была определена никакая потенциальная энергия: проделанная работа изменила общую энергию объекта, поскольку теперь она отождествляется с кинетической энергией. Это называется «неконсервативной силой».

Сила трения (твердых тел или текучей среды) – самая распространенная из неконсервативных сил. В общем случае давление также входит в эту категорию (мы не будем вводить «потенциальную энергию давления»).

Различают также и третий тип сил: те, которые не работают, то есть не меняют кинетическую энергию объекта. Таковы силы, которые всегда перпендикулярны движению: например, реакция опоры при отсутствии трения или натяжение нерастяжимой нити. Прекрасным примером этого служит сила Кориолиса (она лишь изгибает траекторию). В конце концов мы увидим, что магнетизм тоже входит в эту категорию.

Поскольку эти силы не меняют общей энергии объекта, мы можем классифицировать их консервативные силы. Однако они представляют собой совершенно особый случай, потому что соответствующая потенциальная энергия равна нулю (кинетическая энергия невозможна). Одним словом, эти силы не играют никакой роли с точки зрения энергии.

В конечном итоге изменение общей энергии объекта производят только неконсервативные силы: запишем $\Delta E = A_{NC}$ (NC – non conservative).

Теплота

Определение

Среди сил, упомянутых в предыдущем параграфе, некоторые возникают при взаимодействии на микроскопическом уровне. Например, сила трения есть результат электростатического взаимодействия молекул. Тем не менее влияние этих сил проявляется и на макроскопическом уровне: не обязательно брать микроскоп, чтобы увидеть, как предмет тормозит из-за силы трения.

Легко представить, что эти силы оказывают влияние и на микроскопическом уровне: переверните велосипед и попробуйте остановить рукой быстро вращающееся колесо. Вы обожжетесь. Иначе говоря, трение не только тормозит колесо, но и повышает температуру вашей руки. Это значит, что средняя кинетическая энергия молекул вашей руки увеличилась.

В физике работа силы, которая таким образом проявляет себя на микроскопическом уровне, называется теплотой и обозначается Q . То есть теплота является частным случаем работы.

В примере с колесом трение вашей руки осуществило *макроскопическую* работу по отношению к колесу и уменьшило *макроскопическую* кинетическую энергию колеса (оно затормозило). В свою очередь, трение колеса оказало на вашу руку действие *теплоты*, что увеличило *микроскопическую* кинетическую энергию вашей руки (повышение температуры).

В физике необходимо четко различать понятие теплоты (энергии, которую сила *придала* объекту) и понятие температуры (показатель энергии, которой *обладает* объект). Одним словом, положительная теплота в целом стремится повысить температуру, а отрицательная – понизить.

Пример

Чтобы внести ясность, приведем другой пример обмена энергией с помощью теплоты.

Распахните дверь своего дома среди зимы. Даже если не будет ни малейшего ветра, температура в помещении быстро начнет понижаться. Почему? Потому что даже если мы этого не видим, молекулы воздуха на улице и в помещении сталкиваются на большой скорости. Однако молекулы в помещении в среднем обладают большей кинетической энергией, чем те, что снаружи.

На рис. 8.5 показано, что происходит во время этого столкновения: более быстрая молекула придает кинетической энергии более медленной. Таким образом, действующая электростатическая сила совершила положительную работу на более медленную молекулу (придала ей ускорение) и отрицательную работу на более быструю молекулу (затормозила ее).

Эта работа производится на микроскопическом уровне, и ее последствия тоже микроскопического уровня: вырабатывается теплота. В итоге эта теплота подогрела воздух снаружи и охладила воздух внутри: произошел обмен энергией, хотя материя никак не изменилась (воздух остался на своем месте: человек в кресле вдыхает те же молекулы, хотя и более «охлажденные»).

В предыдущем примере энергия перешла из помещения на улицу с помощью теплоты. Мы предположили, что общая энергия системы сохранилась, а это значит, что теплота, переданная помещением улице, прямо противоположна теплоте, переданной улицей помещению. Однако даже если этот вывод выглядит интуитивным, он далеко не обычен.

На самом деле этот обмен энергией, уже упомянутый в предыдущей главе, достаточно важен, чтобы мы снова заострили на нем внимание. Мы еще раз уточним условия, при которых он возможен, обозначив при этом все подводные камни, которые следует обойти.

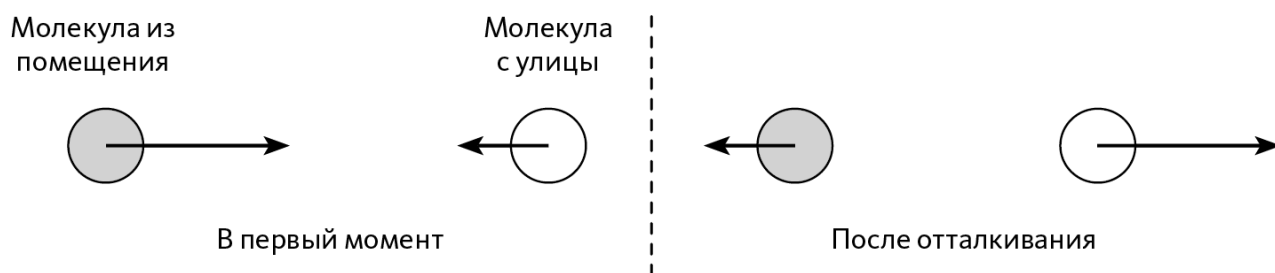


Рис. 8.5 – Столкновение двух молекул

Молекула из помещения осуществила положительную работу в отношении молекулы с улицы, повысив ее кинетическую энергию. Молекула с улицы осуществила отрицательную работу в отношении молекулы из помещения, уменьшив ее кинетическую энергию.



ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Мы описывали действие неконсервативной работы в виде: $\Delta E = A_{NC}$, где ΔE – изменение энергии объекта.

Мы подразделяем неконсервативную работу на макроскопическую часть (A_{NC}^{mac}) и микроскопическую (теплота Q): $A_{NC} = A_{NC}^{mac} + Q$.

Мы подразделяем энергию на макроскопическую (механическая энергия E_m) и микроскопическую (внутренняя энергия U): $E = E_m + U$.

Теперь выражение принимает вид: $\Delta E_m + \Delta U = A_{NC}^{mac} + Q$.

(A_{NC}^{mac} представляет всю неконсервативную работу, кроме теплоты).

По ходу уточним, что теплота всегда является неконсервативной работой.

Выражение, записанное таким образом, называется первым началом термодинамики. Отметим, что данный закон не является результатом опыта, универсальность которого мы могли бы предположить, – это всего лишь следствие наших определений энергии и работы¹.

3. Возвращение к сохранению энергии

Пример системы двух планет

В^[7] предыдущей главе мы сказали, что общая энергия изолированного объекта сохранялась. Чтобы показать, что этот результат не столь очевиден, как кажется, возьмем для примера две планеты («темную» и «светлую»), которые изолированы в межпланетном пространстве.

Никакая внешняя сила не действует на эту систему из двух планет (принцип изолированной системы), то есть никакая внешняя работа не применяется. Согласно выражению $\Delta E = A_{NC}$ напрашивается поспешный вывод о том, что энергия не меняется. Однако благодаря выражению $\Delta E_k = A$ следует также сделать вывод, что нет изменения кинетической энергии. В то же время, если мы поместим наши планеты друг против друга, они будут притягиваться, и их кинетическая энергия увеличится (→ рис. 8.6). Значит, в наших рассуждениях где-то содержится ошибка.

На самом деле в выражении $\Delta E_C = A$ A представляет собой работу, которая применяется к обеим планетам, то есть работа, действующая на темную планету, плюс работа, действующая на светлую. Сюда входит работа внешних сил и работа внутренних сил. Однако темная планета испытывает работу, которая является результатом силы притяжения светлой планеты. В свою очередь, и светлая планета подвержена работе благодаря темной планете.

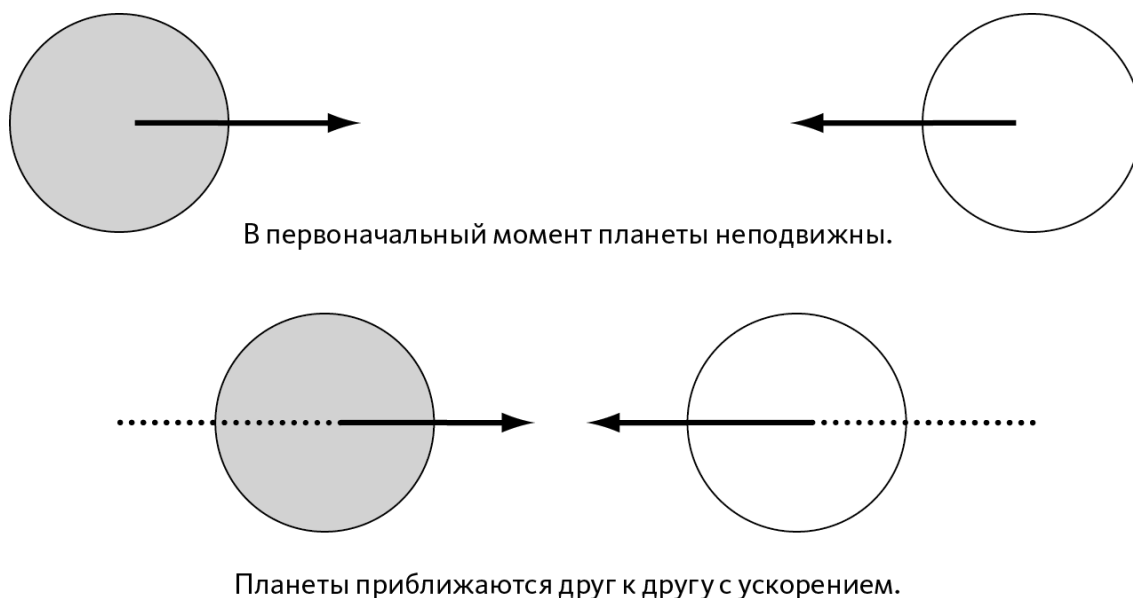


Рис. 8.6 – Притяжение между двумя планетами

Две силы противоположны друг другу, но обе они создают положительную механическую работу, то есть общая сила равна нулю, но общая работа не равна нулю. Это объясняет, что кинетическая энергия системы увеличивается, несмотря на то что она изолирована от всякого внешнего воздействия.

В противоположность тому, что можно было бы подумать, работа темной планеты по отношению к светлой не противоположна работе светлой по отношению к темной: сумма обеих работ не равна нулю.

Наличие ненулевой общей работы A указывает, что в системе есть изменение кинетической энергии ΔE_k .

Это легко проверить с помощью **рис. 8.6**: силы, действующие на каждую из планет, противоположны (принцип взаимодействия), но перемещение планет также происходит в противоположных направлениях. Таким образом, мы имеем дело с двумя случаями механической работы (сила, способствующая перемещению), то есть с положительной работой, а сумма двух положительных работ не может равняться нулю.

Потенциальная энергия взаимодействия

Остается понять, почему общая энергия системы сохраняется, в отличие от общей кинетической энергии.

Ни для одной из отдельно взятых планет мы не можем определить потенциальную энергию. В самом деле, каждая планета испытывает действие силы тела, которое не является неподвижным, то есть не соблюдается критерий, согласно которому можно было бы определить потенциальную энергию.

В свою очередь, общая работа, осуществляемая двумя силами, зависит только от расстояния между двумя планетами (это легко продемонстрировать математически). Таким образом, если планеты перейдут от расстояния d_1 к расстоянию d_2 , общая работа будет такой же, независимо от пройденного пути от d_1 к d_2 . То есть мы можем присвоить системе из двух планет вполне вычисляемую «потенциальную энергию», которая зависит лишь от расстояния между двумя объектами.

Эта общая потенциальная энергия двух взаимодействующих тел называется просто гравитационной энергией. Необходимо хорошенько усвоить, что, если потенциальная энергия системы определена таким образом, потенциальные энергии одной и другой планеты по отдельности *не имеют никакого смысла*.

В конечном итоге работа, не зависящая от пройденного пути, является *консервативной*: она сохраняет общую энергию системы двух планет. Увеличение общей кинетической энергии сопровождается автоматическим равноценным уменьшением потенциальной энергии взаимодействия.

Внешняя и внутренняя работа

Вывод о гравитационном взаимодействии аналогичен выводу о электростатическом взаимодействии (мы помним о сходстве двух этих сил). Между тем объект, каким бы он ни был, состоит из миллиардов и миллиардов атомов или молекул, находящихся в *электростатическом взаимодействии*. Это взаимодействие распространяет во все стороны разные силы, то есть огромное количество работы, которая действует на каждую молекулу. Но эта внутренняя работа объекта является консервативной: общая внутренняя работа, конечно, не равна нулю, но она проявляется в виде изменения *микроскопической потенциальной энергии*.

То есть внутренняя работа не меняет общую энергию объекта, поскольку является консервативной ($\Delta E = A_{\text{NC}} = 0$). С другой стороны, она может менять кинетическую энергию объекта ($\Delta E_k = A \neq 0$).

Например, во время химической реакции происходит перегруппировка молекул, что меняет потенциальную микроскопическую энергию вещества (действие электростатической работы). Это может повлечь за собой увеличение микроскопической кинетической энергии вещества (повышение температуры). Кинетическая энергия увеличилась за счет потенциальной: общая энергия сохранилась.

Запомним: Изменение общей энергии объекта является результатом только неконсервативной работы *внешних* сил, потому что *внутренняя* работа всегда *консервативна*. В частности, если объект является изолированным, его энергия сохраняется.



СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ ТЕРМИНАХ

Если работа всех сил не зависит от пройденного пути, значит, мы можем говорить о потенциальной энергии, как $\Delta E_p = -A$. Поскольку $\Delta E_k = A$, из этого следует, что $\Delta E_k = -\Delta E_p$. Мы убеждаемся в том, что потенциальная энергия изменяется противоположно изменению кинетической. Следовательно, $\Delta E_k + \Delta E_p = 0$, или $\Delta E = 0$: общая энергия сохраняется.

В этом же мы могли убедиться, рассматривая выражение $\Delta E = A_{NC}$. Общая работа является консервативной: $A_{NC} = 0$, то есть $\Delta E = 0$.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Мощность является способностью силы увеличивать кинетическую энергию объекта за одну секунду. Она зависит от силы, ее направления и скорости объекта и выражается в ваттах.
- Работа является способностью силы увеличивать кинетическую энергию объекта за определенный отрезок времени. Она зависит от силы, ее направления и расстояния, пройденного объектом. Выражается в джоулях.
- Если работа, проделанная силой, не зависит от пройденного пути, мы можем определить потенциальную энергию, связанную с этой силой. В этом случае данная сила не меняет общую энергию объекта, поскольку увеличение кинетической энергии сопровождается уменьшением потенциальной. Такую силу называют консервативной.
- Изменение кинетической энергии объекта равно общей работе действовавших сил (как внешних, так и внутренних по отношению к объекту).
- Изменение общей энергии объекта равно общей работе внешних неконсервативных сил. Работа внутренних сил всегда консервативна и не меняет энергию объекта.
- Теплота является микроскопической работой объекта на молекулярном уровне, результат действия которой проявляется на микроскопическом уровне (в частности, изменение температуры).

9. Энтропия и беспорядок

Первое начало термодинамики, представленное нами в предыдущей главе, выдвигает на передний план важный запрет: невозможность создания энергии. Настало время рассмотреть второе начало термодинамики, которое выдвигает другой, не менее строгий запрет: невозможность создания порядка. Мы должны будем дать точное определение понятию порядка, введя связанную с ним физическую величину – энтропию. Мы увидим, что невозможно создать порядок в одном месте, не уменьшив его одновременно в другом. Например, создание компьютера, в высшей степени упорядоченной системы, не может произойти без увеличения хаоса на Земле. Мы откроем неизбежное трагическое последствие: необратимый характер любых наших действий, которые неотвратимо увеличивают хаос во Вселенной без всякой возможности вернуться назад.

1. Неизбежное увеличение хаоса

Что такое энтропия?

Энтропия понятие довольно сложное и вместе с тем исключительно полезное, ибо она является ценнейшим источником информации для понимания некоторых необратимых процессов во Вселенной.

Чтобы ее понять, мы наблюдаем за естественным изменением тела, которому не будет сообщаться никакой энергии: энергия тела остается постоянной, но это не означает, что ничего не происходит. В термодинамике тело, которое не обменивается материей и энергией с внешней средой, называется изолированным.

Первый опыт

Перенесемся в космический корабль, в котором шлюзовая камера отделяет отсек с воздухом от отсека с вакуумом. Когда мы откроем шлюзовую камеру, воздух хлынет во второй отсек и поспешит заполнить все уголки доступного ему пространства. Причина этого в том, что молекулы воздуха испытывают толчки сзади (оттуда, где есть воздух), но не спереди (оттуда, где воздуха нет), – эти толчки вытесняют их в безвоздушное пространство, которое ими наполнится.

Вывод: газ стремится заполнить любое пустое пространство. И наоборот: чтобы его сжать и уменьшить его объем, необходимо проделать некоторую работу (нужна внешняя сила, которая переместит текучую среду, а если есть «сила» и «перемещение», значит, есть и «работа»). Но в этом случае тело перестает быть изолированным, поскольку мы придаем ему энергии с помощью работы.

С другой стороны, объем жидкости или твердого тела не меняется или меняется очень мало, потому что молекулы уже находятся в контакте друг с другом (сжатое состояние).

Итак, запомним: «как правило, объем изолированного тела не может уменьшиться, а может только увеличиваться или оставаться постоянным».

Второй опыт

Толкнем какой-нибудь предмет так, чтобы он проскользил по полу. В конце концов он остановится сам по себе. Если мы считаем, что система (пол+предмет) не взаимодействует ни с чем другим, общая энергия должна сохраняться: мы видели, что на практике она становилась микроскопической (повышение температуры).

Чтобы понять, что происходит на микроскопическом уровне, необходимо знать, что молекулы перемещаются каждое мгновение в самых разных направлениях с разной скоростью. Например, температура 20 °C указывает, что молекулы обладают определенной средней кинетической энергией, но каждая из молекул обладает разной скоростью: некоторые не двигаются, другие перемещаются со скоростью 10 м/с, третьи со скоростью 100 м/с и так далее.

На практике бесконечные столкновения вызывают постоянный обмен энергией между молекулами, которые то ускоряются, то тормозят, что объясняет разницу их скоростей.

Таким образом, столкновения приводят к совершенно хаотичному обмену энергией между молекулами и стремятся придать им такие же случайные направления. В нашем предмете, скользящем по полу, основное направление движения молекул сосредоточено в системе отсчета пола (движения по нему): столкновения с полом постарались восстановить равновесие между различными направлениями. В каком-то смысле молекулы, двигаясь в среднем быстрее в направлении движения объекта, претерпели столкновения более сильные, которые сильнее их затормозили.

В конечном итоге кинетическая энергия молекул сохранилась, но общее движение прекратилось: макроскопическая энергия исчезла и превратилась в микроскопическую.

Результат будет таким же для любого движения между двумя телами (например, для двух газов, которые двигаются относительно друг друга). В любом случае макроскопическое движение одного тела относительно другого стремится уменьшиться в пользу беспорядочного микроскопического движения молекул (повышение температуры).

Чтобы проделать обратную операцию (воссоздать макроскопическое движение), необходимо вмешательство извне (например, толкнуть объект). Но в этом случае система (пол+предмет) получает энергию и перестает быть изолированной.

Запомним: в основном температура изолированного тела не может уменьшаться, она может только увеличиваться или оставаться постоянной.

Первые выводы

Подведем итоги этих двух опытов.

- Объем изолированного тела обычно стремится к увеличению. Это значит, что молекулы стремятся занять как можно больше места в пространстве. Если мы заинтересуемся одной определенной молекулой, будет очень трудно узнать, где именно она находится, поскольку ее придется искать в более широком пространстве. По аналогии с повседневной жизнью, мы скажем, что «беспорядок» увеличился (молекулы больше не сосредоточены в ограниченном пространстве).

- Температура изолированного тела обычно стремится к повышению. Это значит, что молекулы стараются приобрести как можно больше различных скоростей: действительно, повышенная температура говорит о том, что некоторые молекулы двигаются очень быстро, но другие продолжают двигаться медленно. В каком-то смысле набор скоростей молекул

увеличивается, когда повышается температура. Можно сказать, что «беспорядок» усилился: на этот раз речь идет о хаосе скоростей, а не расположения.

Два первых опыта показывают, что хаос в изолированной системе может только увеличиваться.

Третий опыт

Представим формирующуюся планету. Предположим, что огромное количество газа равномерно распределено вокруг рождающейся планеты. Под действием гравитации газ будет притянут планетой: приближаясь к планете, он будет сгущаться. Молекулы будут скапливаться рядом с поверхностью планеты, что будет создавать давление вверх, компенсирующее гравитацию. Как и на Земле, когда равновесие будет достигнуто, давление у поверхности будет больше, чем на высоте.

В процессе этих трансформаций общая энергия тела сохранилась. И действительно, планета, конечно, проделывает работу относительно газа, но это лишь уменьшает потенциальную энергию газа в пользу его кинетической энергии (как в отношении мяча, который падает). Другими словами, речь идет о «консервативной работе».

Таким образом, мы констатируем, что газ сгустился сам по себе, мы не придавали ему энергии. В опыте 1 мы указали, что *обычно* объем газа стремится увеличиться, если нет притока энергии. Здесь мы видим, что так происходит не всегда.

Но интересно то, что первоначальная потенциальная энергия газа превратилась в *микроскопическую* кинетическую (макроскопическая энергия равна нулю, поскольку газ достиг равновесия), – иначе говоря, температура повысилась.

В опыте 2 мы показали, что температура тела стремилась к повышению при отсутствии обмена энергией, – это же мы наблюдаем в опыте 3.

В действительности в третьем опыте все происходит так, словно газ «разрывается» между двумя противоположными «устремлениями»: с одной стороны, он хочет увеличиться в объеме (даже если понизится температура), с другой – повысить температуру (даже если уменьшится объем). Если он выберет второй путь, значит, «желание» увеличить температуру больше «желания» увеличить объем.



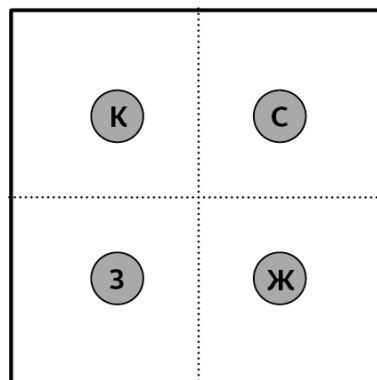
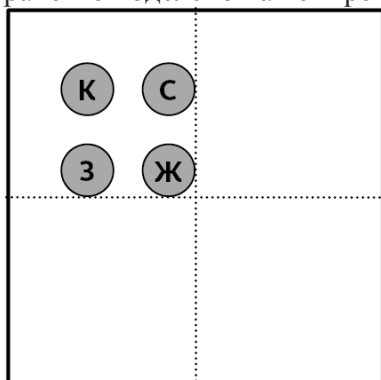
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТРОПИИ

Чтобы более точно определить понятие энтропии, рассмотрим на микроскопическом уровне поведение газа, в котором (условно) всего четыре молекулы: красная, зеленая, синяя и желтая.

Предположим, что эти молекулы помещены в некое огороженное пространство, которые мы мысленно поделим на четыре части (см. схему ниже). Мы не берем в расчет гравитацию. Столкновения между молекулами приводят к тому, что они занимают все ячейки пространства. Если мы в определенный момент сфотографируем огороженное пространство, где мы увидим молекулы?

Из-за толчков любое положение равновероятно: мы привели два примера на схеме.

Слева все молекулы находятся в одной зоне. Подобных расположений может быть четыре, поскольку пространство поделено на четыре зоны.



На схеме справа, напротив, в каждой зоне по одной молекуле. Сколько же может быть подобных комбинаций?

В таблице ниже мы приведем все возможные примеры того, как молекулы могут располагаться в четырех разных зонах: цифра соответствует номеру зоны, в которой находится молекула. Каждая строчка представляет новое расположение.

Молекулы	Красная	Зеленая	Синяя	Желтая
	1	2	3	4
	1	2	4	3
Зона, в которой	1	3	2	4
находится молекула	1	3	4	2
	1	4	2	3
	1	4	3	2

В шести указанных комбинациях каждая молекула находится в отдельной зоне. Здесь представлены варианты, когда красная молекула всегда в зоне № 1. Мы можем привести примеры, когда она будет в зонах 2, 3 и 4. Итого это даст 24 различные комбинации.

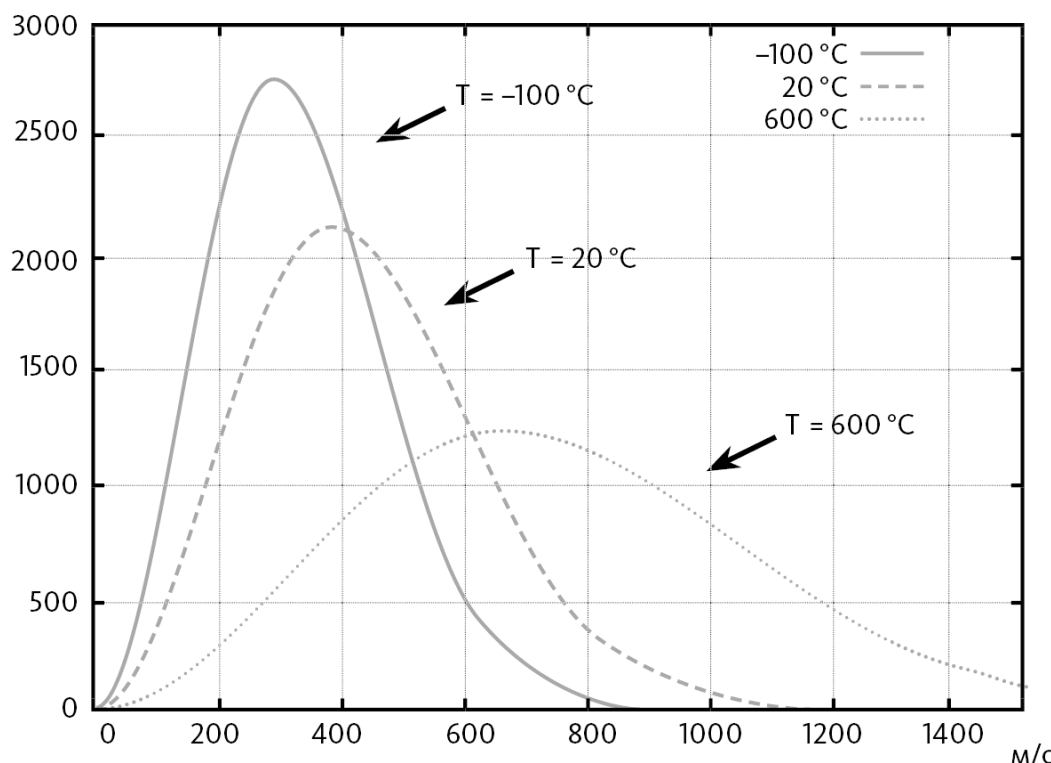
Сравним это с четырьмя вариантами, когда все молекулы сосредоточены в одной зоне. Поскольку каждый вариант одинаково возможен, это значит, что гораздо больше вероятности обнаружить молекулы рассредоточенными по всему пространству, чем сгруппированными в одном углу.

В реальности газ содержит огромное количество молекул в значительном объеме, так что предыдущий результат можно существенно дополнить. Если мы сделаем снимок в определенный момент, со 100-процентной уверенностью можно сказать, что молекулы будут равномерно распределены по всему пространству. Это установилось равновесие на макроскопическом уровне.

Таким образом, оперируя статистическими терминами, мы обнаруживаем, что газ стремится равномерно распределиться по всему доступному ему пространству.

Символом Ω обозначается число расположений молекул: формула энтропии выглядит как $S = k \cdot \ln(\Omega)$ (где k – постоянная Больцмана, уже упоминавшаяся в главе 8). Изолированный газ стремится занять все возможные позиции равновероятным способом: то есть энтропия S стремится к увеличению до тех пор, пока не достигнет максимума при равновесии.

В предыдущем примере мы рассматривали только расположение молекул, но мы можем провести точно такие же рассуждения относительно их скоростей. Предположим, что общая энергия газа равна U и состоит только из кинетической энергии молекул. Как она распределяется между разными молекулами? Необходимо снова пересмотреть все конфигурации, при которых общая энергия молекул равна U . И тогда можно продемонстрировать, что распределение молекул в зависимости от их скорости будет следующей:



Эти кривые показывают, что некоторые скорости дают особый результат. Например, при температуре $T = -100\text{ °C}$ многие молекулы движутся со скоростью 300 м/с. Чем выше температура, тем выше эти особые скорости, что логично, поскольку температура связана со средней кинетической энергией молекул.

С другой стороны, мы видим, что скорости движения молекул сильно отличаются друг от друга: при $T = -100\text{ °C}$ диапазон скоростей составляет примерно от 0 до 800 м/с. При $T = 600\text{ °C}$ диапазон скоростей от 0 до 1600 м/с. Мы видим, что чем выше температура, тем больше разброс скоростей молекул. Именно об этом мы говорили в самом начале данной главы.

Мы определили энтропию в виде $S = k \cdot \ln(\Omega)$, где Ω – количество вариантов не только расположений, но и скоростей молекул. Чем больше объем, тем больше вариантов позиций. Чем выше температура, тем больше вариантов скоростей.

Во всех случаях энтропия изолированной системы может только увеличиваться (общее количество конфигураций стремится к постоянному увеличению).

Уточним: когда уменьшается объем, уменьшается «беспорядок» в распределении молекул. Но когда повышается температура, «беспорядок» в скоростях молекул усиливается. Можно продемонстрировать, что во время этого действия «усиление беспорядка» из-за температуры интенсивнее, чем «уменьшение беспорядка» из-за объема: в совокупности беспорядок усиливается.

На практике изолированное тело всегда выбирает путь, который увеличивает беспорядок.

Обобщение

Такое понятие беспорядка может показаться неопределенным и расплывчатым; на самом деле можно дать более точное определение беспорядка, но оно будет довольно сложным. Именно поэтому мы вынесли его во врезку выше.

Достаточно запомнить, что бесчисленные столкновения влекут за собой самое беспорядочное распространение энергии тела: мы неотвратно стремимся к распространению всеобщего беспорядка. На деле этот беспорядок проявляется в распределении молекул (увеличение объема) и их скоростей (повышение температуры).

Слову «беспорядок» физики предпочитают термин «энтропия», и мы видим, что это понятие в основном связано с объемом и температурой тела.

Запомним: При отсутствии обмена энергией с внешней средой энтропия тела неизбежно увеличивается. Она достигает максимума, когда достигнуто равновесие».

Это составляет второе начало термодинамики.

Последствия увеличения энтропии

В качестве примера изолированной системы мы можем взять саму Вселенную: она изолирована по определению, потому что включает в себя все, что существует. Согласно рассуждениям в предыдущем параграфе, энтропия Вселенной может только увеличиваться.

Фактически там, где есть уменьшение объема (например, формирование планет и звезд), оно сопровождается повышением температуры. С другой стороны, если энтропия локально уменьшается (например, охлаждение без потери объема), это обязательно увеличивает энтропию в другом месте, *по меньшей мере* в таком же количестве.

Например, энтропия внутри холодильника уменьшается, когда мы его включаем, но это нагревает комнату. На деле увеличение энтропии комнаты больше, чем уменьшение энтропии холодильника. То есть общая энтропия увеличивается.



ФЕНОМЕН РАССЕЯНИЯ

Испеките пирог в печи. Его запах заполнит все помещение. Однако воздух выглядит неподвижным. Как же пахучие молекулы распространились по комнате?

Из-за столкновений каждая молекула газа имеет самую хаотичную траекторию. Сначала пахучие молекулы были сконцентрированы возле печи, но такая ситуация соответствует очень слабой энтропии, потому что молекулы далеки от того, чтобы занимать все возможные позиции в доступном для них пространстве. Мало-помалу из-за столкновений распространение молекул стремится стать равномерным, между тем растет энтропия газа.

Таким образом, рассеяние одного газа в другом является прекрасным примером роста энтропии путем увеличения объема. В человеческом теле или в компьютере, напротив, каждая молекула удерживается на определенном месте, что и позволяет всей системе функционировать... Это значит, что в подобных строго структурированных системах необходимо бороться против естественного стремления молекул заполнить собой все пространство, что привело бы к формированию однородного сгустка, лишённого всякой функциональности. Чуть позже мы вернемся к средствам, с помощью которых человеческое тело способно поддерживать столь слабую энтропию.

Термическая диффузия является очень похожим примером такого рассеяния: ваша батарея обогревает всю комнату, хотя никакого движения воздуха не наблюдается. На самом деле рядом с батареей молекулы воздуха двигаются быстрее, чем где-либо, то есть это еще один пример недостаточно высокой энтропии. Благодаря столкновениям повышенная кинетическая энергия будет распространяться от одной молекулы к другой до тех пор, пока температура в комнате не станет везде одинаковой. Следовательно, энтропия достигла максимума.

Таким образом, что бы вы ни делали, вы увеличиваете энтропию вокруг себя. Это происходит, даже когда вы лежите и ничего не делаете. Ваше тело с его температурой 36,6 °C постоянно нагревает атмосферу.

Аналогично этому технические работники собирают компьютеры, локально уменьшая энтропию: материя здесь строго упорядочена, и различные молекулы не смешиваются хаотичным образом по всему пространству. Однако во время сборки техники невольно нагревают воздух: во время сборки компьютера общая энтропия значительно возрастает.

Значит ли это, что глобальное потепление неизбежно? Так было бы, если бы Земля являлась изолированным объектом, но, к счастью, в космосе происходят постоянные переносы энергии. На практике радиация стремится удалить энтропию, созданную на Земле. Это значит, что для того, чтобы остановить глобальное потепление, необходимо как можно больше энтропии отправить в космос, облегчив путь радиации.

Однако газы, создающие парниковый эффект, как раз стремятся изолировать Землю от космоса, создавая экран, препятствующий распространению земного излучения. По этой

причине остановить глобальное потепление можно прежде всего сокращением выброса парниковых газов. Это сделало бы Землю менее изолированной и позволило бы энтропии, которую мы неизбежно создаем, легче уходить в космос...

2. Перемещение энтропии

Как снизить энтропию?

При отсутствии обмена энергией энтропия тела может лишь увеличиваться. Так, если мы хотим локально снизить энтропию какого-то тела, это можно сделать, только передав ему или лишив его части энергии. Другими словами, к нему необходимо применить работу (положительную или отрицательную).

Чтобы снизить энтропию, можно применить два метода: либо уменьшить объем тела, либо понизить его температуру.

- Уменьшение объема является процессом макроскопического уровня (изменение объема хорошо видно). Следовательно, необходимо применить макроскопическую работу. Чтобы уменьшить объем, эта работа должна быть обязательно «движущей»: приложенная сила должна способствовать уменьшению объема, а не препятствовать ему. Другими словами, телу, которое мы хотим сжать, нужно обязательно придать энергии. Проблема в том, что увеличение энергии повлечет повышение температуры. Нам кажется, что мы уменьшаем энтропию тела, уменьшая его объем, тогда как на деле мы ее увеличиваем, повышая температуру... Таким образом можно продемонстрировать, что увеличение энтропии из-за повышения температуры по меньшей мере равно уменьшению энтропии из-за сокращения объема. То есть применение макроскопической работы не может уменьшить энтропию тела.

- Вместо того чтобы сокращать объем, можно попробовать понизить температуру. Это будет процессом микроскопического уровня, и здесь нужно применить микроскопическую работу, то есть теплоту.

Чтобы понизить температуру, необходимо уменьшить энергию тела, то есть теплота будет отрицательной. Это легко проделать на практике, если прислонить тело к другому телу, более холодному.

Интересно констатировать, что в этот раз уменьшение температуры не компенсируется увеличением объема. Например, объем твердого тела остается постоянным или даже слегка уменьшается при охлаждении. Другими словами, нам удалось остановить энтропию тела.

Заключение: *единственный* способ уменьшить энтропию тела – отнять у него энергию с помощью «отрицательной теплоты» (то есть перенос тепла за пределы тела). Только теплота приводит к *изменению* энтропии, любое другое действие приводит к ее *созданию*.

Ситуация с человеческим телом

Возьмем пример: бурная деятельность внутри человеческого тела неизбежно создает большую энтропию. В то же время человеческое тело являет собой пример очень слабой энтропии: материя в нем распределена объемно и занимает пространство далеко не хаотично и не беспорядочно. Таким образом, если мы хотим жить долго и не превратиться в бесформенную пыль, эта энтропия должна удаляться по мере ее создания.

Мы только что видели, что это возможно только с помощью теплообмена: мы постоянно подогреваем окружающую среду, что между делом устраняет избыток нашей энтропии.

В действительности человеческое тело использует другой, весьма действенный способ удерживать энтропию на одном уровне: оно потребляет материю со слабой энтропией (пищу) и исторгает материю с высокой энтропией (пот, моча, экскременты). Человеческое тело не неподвижно, большая часть материи, которая его составляет, постепенно удаляется и заменяется новой – в физике это называется открытой системой.

Другими словами, большинство составляющих нас молекул уже не те, из которых мы состояли в детстве. Не будем забывать, что вся материя нашего тела состоит из пищи, которую мы переварили, и из пищи, которую переварила наша мать во время беременности.

3. Необратимые действия...

Почему наши действия необратимы?

Как мы видели, большинство видов деятельности вокруг нас создает энтропию. Эта энтропия ни при каких обстоятельствах не может быть уничтожена: она создана бесповоротно, до скончания Вселенной... Это означает, что невозможно вернуться назад к свершившемуся, туда, где всеобщая энтропия была меньше. Иными словами, наше действие было необратимым.

Единственное средство для «обратимости» – сделать так, чтобы не создавать никакой энтропии. В этом и только в этом случае мы можем вернуться точно к первоначальной ситуации, если тогожелаем.

Проблема в том, что такие действия редкость, вернее, их не существует. Действительно, если окружающая среда постоянно меняется, значит, она не находится в равновесии и отчаянно к этому равновесию стремится. Однако мы только что выяснили, что энтропия создается тогда, когда мы приближаемся к равновесию (энтропия максимальна при равновесии).

Иначе говоря, чтобы не создавать энтропию, нужно быть в равновесии. Но если мы будем в равновесии, всякое движение прекратится, трансформация остановится.

Таким образом, трансформация всегда необратима, но если понятие обратимой трансформации недостижимо, по крайней мере, мы в некоторых ситуациях можем к ней приблизиться.

Лучший способ понять суть явления необратимости – привести пример.

Действие трения

Пример с предметом, скользящим по полу, без сомнения, самый простой: он тормозит и останавливается, повышая температуру, а значит, и всеобщую энтропию. Можете смотреть на него сколько угодно, он никогда не поедет самостоятельно в обратную сторону.

А теперь толкните его, чтобы он обрел начальную скорость и вернулся на прежнее место. Удалось ли вам воспроизвести начальную ситуацию? Нет, потому что предмет стал теплее, чем был: температура повысилась во время торможения и увеличилась еще больше, когда вы толкнули его на место. Вы можете попробовать охладить его, но теплота будет вытеснена наружу, и это необратимо увеличит температуру окружающей среды.

Таким образом, торможение предмета абсолютно *необратимо*: воссоздать изначальную ситуацию *невозможно*. Вселенная *бесповоротно* изменилась и уже не такая, какой была до того, как предмет заскользил по полу...

Фактически мы увидели, что когда два тела начинают движение относительно друг друга, это создает энтропию, потому что столкновение молекул стремится прервать эту макроскопическую работу. Иными словами, всегда существует трение, и это трение делает развитие всех вещей необратимым.

Чем слабее трение, тем дольше длится макроскопическое движение, тем медленнее повышается энтропия. Таким образом, если трение действительно слабо, мы можем *стремиться* к обратимому изменению.

Влияние скорости действия

Возьмем другой пример: поместим воздух в герметичный ящик, который мы сможем по желанию сжимать или расширять с помощью поршня (→ **рис. 9.1.a**).

Сожмем воздух, надавив на поршень: мы видим, что во время такой компрессии температура газа повышается. Мы произвели над воздухом механическую работу, что прибавило ему энергии. Но в то же время его объем уменьшается, и мы можем задать себе вопрос: увеличилась ли энтропия воздуха во время эксперимента? Оставим пока вопрос без ответа.

Теперь очень быстро отведем поршень назад, по возможности мгновенно (мы также можем просто вынуть поршень). Этим мы создадим пустое пространство, в которое хлынет воздух (→ **рис. 9.1.b1**). Охладится ли воздух после расширения? Нет, потому что он расширяется в пустоте: нет никакой внешней силы, которая сопротивлялась бы этому расширению и создала бы работу. То есть воздух не теряет энергию во время такого необычного расширения, и его температура остается прежней.

В конце мы имеем первоначальную позицию, но с температурой более высокой, чем вначале, потому что она повысилась во время сжатия и осталась прежней во время расширения. Энтропия была создана, и, как и в примере с трением, к начальной ситуации возврат невозможен. Трансформация была необратимой.

Мы можем проделать опыт несколько раз подряд: поршень будет методично двигаться вперед-назад, и по мере этих движений воздух будет нагреваться, а его энтропия увеличиваться.

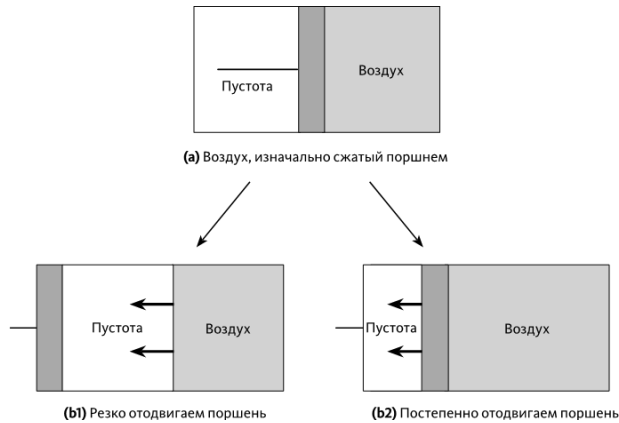


Рис. 9.1 – Два очень разных расширения

Теперь отодвинем поршень не быстро, а довольно медленно. На этот раз нам приходится сдерживать поршень, который хочет сдвинуться под давлением воздуха (→ **рис. 9.1.b2**). Таким образом, мы создаем силу, которая препятствует расширению. Другими словами, мы создаем работу сопротивления воздуху, это отнимает энергию у воздуха, температура которого во время расширения на этот раз понижается.

Таким образом, температура повысилась во время сжатия и снизилась во время расширения. Получили ли мы в конце температуру равную начальной? Для этого необходимо, чтобы энергия, потраченная во время расширения, точно компенсировалась энергией, приобретенной во время сжатия. То есть работа по сопротивлению при расширении должна быть противоположна механической работе при сжатии. Поскольку совершено два противоположных перемещения, работа, совершенная во время расширения, должна быть равна работе во время сжатия (не будем забывать, что работа пропорциональна перемещению и силе).

Проблема в том, что для сжатия воздуха пришлось применить более мощную силу, чем сила давления воздуха. Для расширения воздуха была применена сила меньшая, чем давление воздуха. Таким образом, работа сопротивления во время расширения слабее механической работы сжатия: в целом в течение операции воздух приобрел энергию, а температура повысилась. Энтропия повысилась, и произведенная нами операция была необратима.

Чем медленнее мы будем двигать поршень во время расширения, тем больше приложенная сила будет приближаться к давлению воздуха (когда поршень неподвижен, две силы равны). В этом случае работа, проделанная во время расширения, будет прямо противоположна работе, проделанной во время сжатия, и в конце воздух обретет почти ту же температуру, что и в начале: мы стремимся к обратимой трансформации.

На самом деле во всех случаях, чтобы произвести обратимую трансформацию, никогда не нужно удаляться от равновесия, то есть необходимо, чтобы изменения были очень медленные.

Нагревание – весьма эффективная операция!

В различных предыдущих примерах мы убеждаемся в том, как легко повысить температуру тела: будь то движения поршня, будь то трение, в обоих случаях мы повышаем температуру, сами того не желая. Причина этого в том, что любая трансформация является необратимой, а увеличение энтропии часто соответствует повышению температуры.

Именно по этой причине нагревательные приборы являются самыми простыми и самыми эффективными среди машин: нагревательные плиты и электрические печи – самые упрощенные электрические приборы, поскольку, по сути, являются обычными резисторами (мы уделим этому более пристальное внимание в главе, посвященной электричеству). Более того, их КПД 100 %, то есть вся электрическая энергия преобразуется в тепловую.

Мы можем даже вообразить приборы, продуктивность которых больше 100 % (на практике мы не говорим о продуктивности выше 100 %, а употребляем термин «эффективность больше 1», см. врезку ниже). Выставьте ваш холодильник на лестничную клетку, раскройте дверь холодильника в сторону улицы и включите его. Итак, у тепловой энергии, которая копится в вашей квартире, будет два источника:

- с одной стороны, компрессор холодильника на его задней стенке будет нагреваться и тем нагревать квартиру. В конце концов электрическая энергия холодильника превратится в тепловую энергию для вашей квартиры;

- с другой стороны, часть тепловой энергии внутренности холодильника (то есть воздух снаружи, поскольку дверь холодильника раскрыта в сторону улицы) будет вытеснена теплотой внутрь вашей квартиры (таков принцип холодильника, который берет энергию изнутри холодильника, чтобы вытеснить ее в комнату).

Таким образом, ваша квартира получила не только электрическую энергию, потребленную холодильником, но и часть внешней тепловой энергии. Ваш холодильник, установленный таким образом, имеет эффективность определенно выше 1. Вообще, если его использовать таким образом, это будет называться тепловым насосом. Таков же принцип работы некоторых кондиционеров, включенных на режим «обогрев».

В конечном итоге досадно видеть, что некоторые люди до сих пор не могут как следует обогреть квартиры зимой, когда мы видим, до какой степени легко выработать тепловую энергию. Не будем забывать, что это также служит примером повышенной энтропии. Работа телевизора, например, вызывает гораздо меньшую энтропию, то есть эти приборы обладают гораздо меньшим КПД, поскольку необходимо постоянно удалять создаваемую ими энтропию (ваш телевизор нагревает вашу квартиру...).



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЛИ КПД?

КПД является отношением между общей энергией машины, необходимой ей для работы, и полезной энергией, которую она вырабатывает. Он всегда меньше 100 %, ибо ни в коем случае не может создавать энергию (в этом смысл первого начала термодинамики).

Например, в случае с тепловым насосом «полезная энергия» соответствует теплоте, принесенной в помещение. Общая энергия, полученная машиной, имеет две составляющих: с одной стороны, электрическая энергия, необходимая для функционирования машины, с другой стороны, тепловая энергия воздуха внешней среды (тепловой насос получает теплоту извне, чтобы передать ее в нагреваемое помещение).

Между тем воздух бесплатный: тепловая энергия атмосферы доступна в неограниченном количестве. Единственная энергия, за которую надо платить, чтобы заставить машину работать, – это электрическая энергия.

По этой причине мы определяем эффективность машины отношением между полезной энергией и «дорогой» энергией, необходимой для ее функционирования. Здесь в роли дорогой энергии выступает только электрическая.

Таким образом, эффективность всегда выше КПД и может быть даже больше 1, в то время как КПД не может быть больше 100 %. В реальности можно найти тепловые насосы, чья эффективность равна 3 (тепловая энергия, вырабатываемая насосом, в 3 раза больше, чем затраченная электрическая энергия).



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Из-за столкновения молекул энергия тела стремится к наиболее хаотичному распространению. «Беспорядок» в расположении молекул и их скоростях стремится к постоянному увеличению.

- Энтропия является мерой этого беспорядка. При отсутствии обмена энергией с внешней средой энтропия может только увеличиваться – так происходит с энтропией Вселенной. Энтропия достигает своего максимума, когда устанавливается равновесие.

- Увеличение энтропии может быть, в частности, связано с повышением температуры («беспорядок скоростей») или с увеличением объема тела («беспорядок расположений молекул»).

- Обмен энтропией с внешней средой может производиться только с помощью теплоты. Таким образом, перенос тепла – единственный способ снизить энтропию тела, кроме обмена материей.

- Изменение, порождающее энтропию, называется необратимым. При этом невозможно вернуться к прежней ситуации. Можно стремиться к обратимым изменениям, но никогда их не достичь. Для этого необходимо всегда быть ближе к равновесию.

10. Газ, жидкости и твердые тела

Овладев принципами давления и температуры, мы готовы понять, почему существует так много состояний материи (твердое тело, жидкость и газ) и разные способы перехода одного в другое. Мы объясним, почему теплый воздух поднимается вверх и почему, расширяясь, газ охлаждается, что поможет понять понижение температуры на высоте и принцип работы холодильника. Мы расскажем о феномене поверхностного натяжения и его последствиях: формирование капель, способность ходить по воде. Наконец, мы представим некоторые свойства текущей жидкости, что позволит понять, как летит самолет или как придать мячу сложную траекторию.

1. Формирование жидкостей и твердых тел

Три состояния материи

Мы уже вкратце упоминали о различиях, которые существуют между твердыми телами, жидкостями и газами на микроскопическом уровне. В двух словах: молекулы удалены друг от друга в газах, касаются друг друга в жидкостях и «склеены» друг с другом в твердых телах (и могут лишь вибрировать, оставаясь на одном месте).

Это объясняет, почему твердые тела жесткие, а жидкости и газы нет. Это также объясняет, почему твердые тела и жидкости тяжелее воздуха: в них молекулы ближе друг к другу, следовательно, в заданном объеме в них содержится гораздо больше молекул.

Разница в весе у жидкостей и твердых тел не столь очевидна, поскольку в обеих субстанциях молекулы слеплены друг с другом: так, некоторые предметы плавают (как древесина), а некоторые тонут (большинство металлов).

Мы можем так кратко описать три состояния материи:

- твердые тела жесткие и плотные;
- жидкости не жесткие и плотные;
- газы не жесткие и не плотные.

И все же остается важный вопрос: *почему* молекулы соединены друг с другом в твердых телах и жидкостях, а в газах нет? Почему, когда мы нагреваем воду, она переходит от твердого состояния (лед) сначала в жидкое, а потом в газообразное (пар)? Почему эти изменения происходят при определенной температуре (от 0 до 100 °C для воды при атмосферном давлении)?

Чтобы это понять, необходимо изучить взаимодействие молекул на микроскопическом уровне. Для этого мы рассмотрим два типа молекул, которые ведут себя совершенно по-разному: полярные и неполярные молекулы.

Связь между молекулами

Полярные молекулы

Некоторые молекулы состоят из нескольких различных атомов, например молекула воды H_2O (два атома водорода, прикрепленные к атому кислорода). Как мы видели, каждый атом состоит из ядра, окруженного электронами. В одной молекуле эти электроны оказываются в контакте с соседними атомами.

Однако случается, что некоторые атомы имеют свойство притягивать электроны соседних атомов. Например, в молекуле H_2O кислород имеет тенденцию притягивать к себе электроны атомов водорода. Такое поведение невозможно понять, не познакомившись со свойствами квантовой физики (учитывая микроскопические масштабы).

Поскольку электроны имеют отрицательный заряд и группируются ближе к кислороду, это значит, что кислород молекулы воды имеет отрицательный заряд. Водород же, напротив, заряжен положительно.

В то же время отметим, что два атома водорода в молекуле воды не находятся с противоположных сторон атома кислорода, а образуют между собой угол ($\rightarrow$ **рис. 10.1**).

Поставим теперь две молекулы воды (темную и светлую, как показано на **рис. 10.1**) друг против друга. Кислород светлой молекулы притягивает атомы водорода темной и отталкивает кислород темной. Электростатическая сила заставит молекулы повернуться таким образом, чтобы атомы водорода темной молекулы были повернуты к атому кислорода светлой.

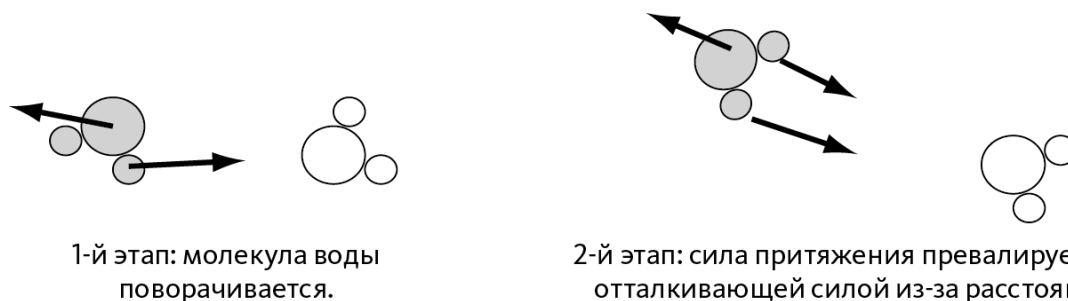


Рис. 10.1 – Взаимодействие между двумя молекулами воды

Молекулы воды представлены в виде одного большого шарика, символизирующего атом кислорода, и двух маленьких – атомы водорода.

Поскольку обе молекулы нейтральны, можно подумать, что на этом все и закончится. Но на **рис. 10.1** справа мы видим, что расстояние между светлым кислородом и темными атомами водорода меньше, чем расстояние между двумя молекулами кислорода. Из-за расстояния сила притяжения между водородом и кислородом превалирует над отталкивающей силой молекул кислорода. Таким образом, в целом между молекулами воды существует сила притяжения, которая объясняет их стремление присоединиться друг к другу: именно в этом причина существования твердого и жидкого состояния материи.

Молекулы, имеющие положительный и отрицательный заряд одновременно, называются полярными. Все другие называются неполярными.

Неполярные молекулы

Некоторые молекулы не имеют свойств полярных молекул. Так бывает, когда все атомы одной молекулы одинаковые. В качестве примера мы можем взять двухатомную молекулу азота N_2 и молекулу двухатомного кислорода O_2 , которые являются основными составляющими воздуха. Поскольку оба атома каждой молекулы идентичны, нет причин, чтобы один из этих атомов притягивал больше электронов, чем другой. Так, атомы этих молекул не несут никакого заряда.

Это объясняет, почему O_2 и N_2 при средней температуре и давлении газы, а H_2O жидкость: молекулы H_2O притягиваются друг к другу и соединяются (жидкость), в то время как O_2 и N_2 ,

чьи атомы лишены заряда, летят своей дорогой и не взаимодействуют, если не считать столкновений (идеальный газ).

Однако двухатомный кислород O_2 и двухатомный азот N_2 также могут превратиться в жидкость, если до определенного уровня понизить температуру и повысить давление. Это значит, что эти молекулы тоже могут крепко притягиваться друг к другу. То есть между ними также существует сила притяжения, даже если она и слишком слаба.

Причина в том, что электроны в атомах постоянно вибрируют. Возьмем пример двухатомного кислорода O_2 : в определенный момент из-за колебания электроны могут оказаться скорее со стороны одного из атомов кислорода, чем с какой-нибудь другой. Этот кислород несет отрицательный заряд, а другой несет положительный: перед нами снова полярная молекула. Таким образом, две молекулы O_2 также смогут притянуть друг друга (→ **рис. 10.2**).

Важное различие с полярной молекулой в том, что через мгновение отрицательный заряд может перейти к другому атому кислорода (из-за колебания электронов), то есть, чтобы снова притягиваться другими молекулами, молекула должна сменить заряд (→ **рис. 10.2**).

Таким образом, в среднем между молекулами O_2 существует притяжение, однако оно всегда сомнительно из-за колебания электронов, то есть оно определенно слабее, чем у полярных молекул.

Это объясняет, что гораздо труднее привести в жидкое состояние воздух (O_2 , N_2), чем воду.

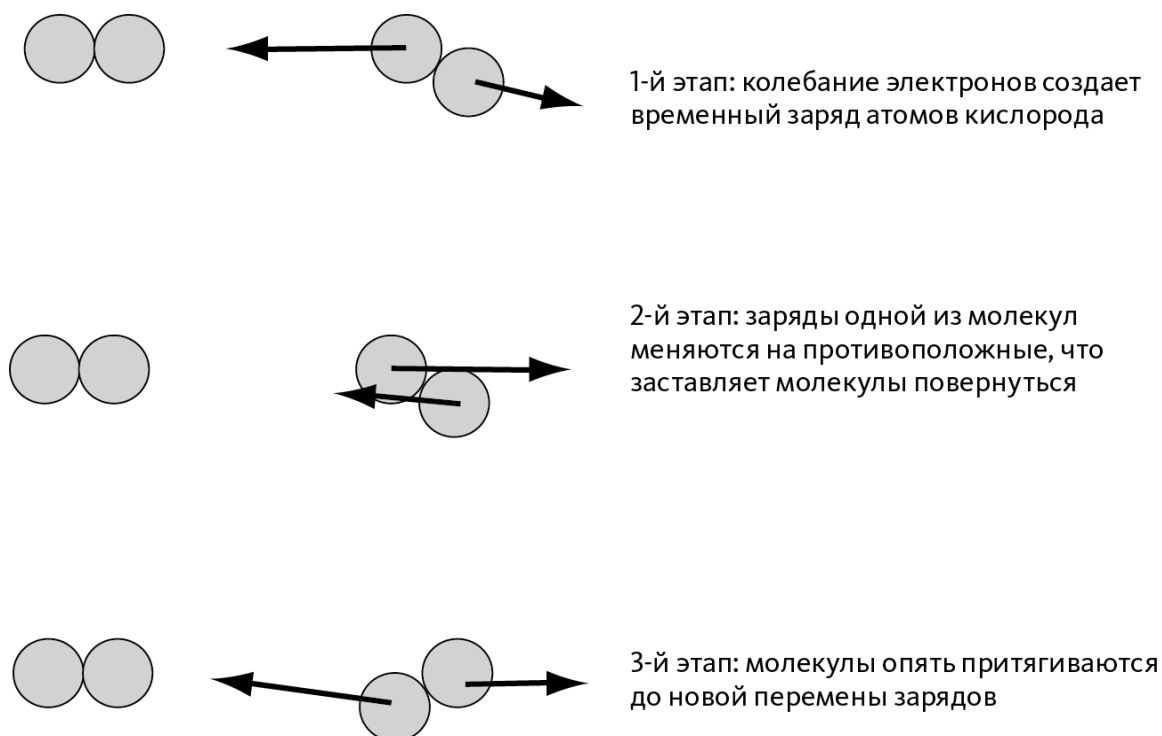


Рис. 10.2 – Взаимодействие между двумя молекулами двухатомного кислорода



МЕТАЛЛЫ

Металлы представляют собой чрезвычайно устойчивые структуры: большинство из них может перейти в жидкое состояние только при очень высокой температуре. То есть связь между их атомами должна быть очень сильной, гораздо сильнее, чем между молекулами, о которых мы говорили в этом параграфе (металлы отнюдь не плавятся при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, как это происходит со льдом).

Чтобы объяснить эту связь, нам понадобятся понятия из квантовой физики, а значит, мы остановимся на этом более детально в главе 25. А пока мы объясним, почему атомы могут

соединяться в молекулах, как в воде (H_2O) или в воздухе (O_2 , N_2). В действительности механизмы, объясняющие связь в металлах и в молекулах, очень похожи.

Микроскопические аспекты газа

В конечном счете, даже не будучи заряженными, *все* молекулы притягиваются друг к другу под действием электростатической силы. У этого притяжения, однако, есть пределы:

- Когда две молекулы вступают в *контакт*, это значит, что электроны этих молекул почти *касаются* друг друга. Между тем электроны отталкиваются друг от друга (как отрицательно заряженные), то есть на молекулярном уровне сила притяжения превращается в мощную отталкивающую силу, что не дает двум молекулам «смешаться».

- Напротив, когда две молекулы удаляются, сила притяжения быстро ослабевает, ибо она действует на очень малом расстоянии (поскольку в целом молекулы являются нейтральными, они не осуществляют никакой силы на большом расстоянии). Таким образом, мы можем уточнить траекторию молекул в газе:

- Когда давление газа невелико, это значит, что молекулы значительно удалены друг от друга (слабая концентрация, → **рис. 10.3.а**). В этом случае движение их очень просто: их траектория долго остается равномерной и прямолинейной до того, как они наконец приблизятся к другой молекуле. Тогда молекулы вступают во взаимодействие (притягиваются или отталкиваются, если есть «контакт»), но это происходит на чрезвычайно коротком расстоянии относительно дистанции между молекулами. Это краткое локальное взаимодействие выглядит как простой «удар», который резко меняет траекторию молекул. И они вновь следуют по равномерной прямолинейной траектории. Такой газ называют идеальным.

- Когда давление газа повышено, молекулы расположены близко друг к другу (высокая концентрация, → **рис. 10.3.б**). В этом случае молекулы находятся в постоянном взаимодействии из-за сил притяжения, и их траектории уже далеко не равномерны и не прямолинейны.

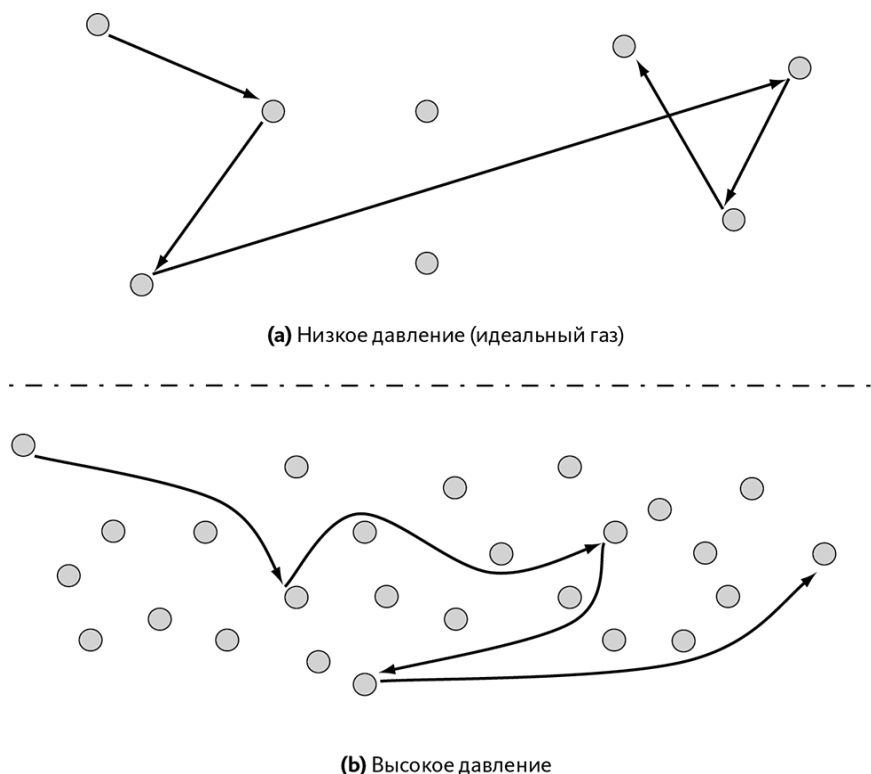


Рис. 10.3 – Движение молекул газа в зависимости от давления

2. Изменение состояния

Влияние температуры

Возьмите лед и поместите в него термометр: он покажет температуру ниже 0°C . Нагрейте лед. Вы увидите повышение температуры до 0°C . С этого момента, сколько бы вы ни нагревали, температура не изменится ни на градус; зато вы увидите, как лед начнет таять и превратится в смесь льда и воды. Температура останется 0°C до тех пор, пока в смеси будет хоть кусочек льда. Как только весь лед исчезнет, температура начнет подниматься.

Аналогично, когда вы вскипятите воду, температура будет держаться на отметке 100°C . Если вы сильнее нагреете кастрюлю, вода будет испаряться, но температура выше 100°C не поднимется.

Переход жидкости в газ

Чтобы понять эти опыты, начнем с аналогии крупного масштаба. Подбросим предмет вверх на высокой скорости. Он затормозит под действием гравитации, достигнет максимальной высоты, а потом упадет на землю. Однако если предмет подбросить достаточно быстро, он может достичь высоты, где преодолеет земное притяжение (за несколько тысяч километров от Земли...). В этом случае предмет не упадет на Землю, а продолжит свой путь в космическом пространстве.

Чтобы это произошло, объект должен обладать скоростью 11 км/с . Это называется скоростью освобождения: она необходима для преодоления земного притяжения.

Следует заметить, что общая энергия объекта при этом сохранилась: он потерял кинетическую энергию (поскольку земное притяжение заставило его затормозить), но взамен приобрел потенциальную энергию (он набрал высоту). Скорость 11 км/с едва позволяет предмету преодолеть земное притяжение. Ему удастся вырваться, но финальная скорость будет равна нулю. В этом крайнем случае его изначальная кинетическая энергия *целиком* превращается в потенциальную.

То же самое происходит при движении одной молекулы относительно другой в жидкости: так же как гравитация Земли, электростатическая сила между двумя молекулами является притягивающей. То есть молекуле достаточно придать минимальную кинетическую энергию, чтобы она могла отлететь на большое расстояние.

Между тем температура точно показывает среднюю кинетическую энергию молекул. При определенной температуре молекулы достигают «второй космической скорости» и отдаляются друг от друга на большое расстояние: жидкость становится газом.

Проблема в том, что, удаляясь до бесконечности, молекулы потеряли начальную кинетическую энергию, которая превратилась в потенциальную. Так, когда мы нагреваем воду до 100°C , энергия, которую мы придаем молекулам, в конце является не кинетической, а потенциальной. Иными словами, температура не повысилась. Все, что мы делаем при нагревании, – придаем «энергию освобождения» все большему количеству молекул: мало-помалу все большая порция жидкости превращается в газ, а температура не меняется.

Когда жидкость полностью исчезает, энергия, выработанная при нагреве, остается кинетической и способствует повышению температуры. Становится понятной устойчивость температуры при каждом изменении состояния.

Переход твердого тела в жидкость

А как обстоит дело с переходом твердого вещества в жидкость? В этом случае нет необходимости придавать молекулам «энергию освобождения».

Перейдем к крупномасштабной аналогии: предположим на этот раз, что мы хотим забросить предмет с Земли на Луну. Луна находится «недалеко» от Земли, и нет необходимости придавать предмету скорость освобождения, чтобы ее достичь, – достаточно чуть меньшей скорости. То есть чтобы перейти от одного тела к другому, достаточно более слабой энергии, чем для полета в бесконечность.

Так и в твердом теле молекулы не очень удалены друг от друга, поэтому достаточно придать молекуле умеренную кинетическую энергию, чтобы она покинула свою соседку и примкнула к другой ближайшей молекуле. С этой энергией молекула не сможет отправиться

в бесконечность, но теперь она может переходить от молекулы к молекуле. Другими словами, перед нами окажется жидкость.

Здесь тоже температура играет важную роль, потому что точно показывает среднюю кинетическую энергию молекул. При температуре ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ у молекул воды недостаточно энергии, чтобы переходить от одной к другой, и перед нами оказывается твердое тело. Если температура выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, молекулы скользят свободно, и мы видим перед собой жидкость.

В момент перехода от твердого тела к жидкости энергия, вызванная теплотой, в конечном итоге служит для передачи молекулам потенциальной энергии, то есть она не повышает температуру. Вот почему температура не меняется до тех пор, пока все вещество не превратится в жидкость.

Влияние давления

В предыдущем случае мы рассматривали одну молекулу, которая стремится освободиться от притяжения своей соседки. Но в реальности все немного сложнее, поскольку одна молекула взаимодействует с бесчисленным множеством других молекул, которые перемещаются в самых разных направлениях.

Переход из жидкости в газ

Рассмотрим пример капли воды в моменте ее перехода в газообразное состояние. При этом капля значительно увеличится в объеме, так как газ занимает больше места, чем жидкость. Проблема в том, что место уже занято другими молекулами (например, воздуха): вода переходит в газообразное состояние, а значит, должна «расчистить себе пространство», расталкивая уже имеющиеся молекулы воздуха. Воздух оказывает на воду давление, и эта сила препятствует увеличению объема воды. Другими словами, воздух оказывает «работу сопротивления» на воду, которая переходит из одного состояния в другое.

А где работа, там и обмен энергией! В данном случае вода тратит энергию (ее расширению препятствует воздух) из-за работы силы сопротивления. Таким образом, для перехода из одного состояния в другое воде необходимо придать дополнительной энергии, чтобы преодолеть сопротивление воздуха во время расширения.

Сделаем вывод:

- с одной стороны, воде необходима дополнительная энергия, чтобы преодолеть притяжение соседних молекул;
- с другой стороны, ей нужна энергия, чтобы оттолкнуть окружающий воздух, поскольку она начинает занимать больше места.

Чем больше давление воздуха, тем больше работа сопротивления, которую он оказывает, и тем больше должна быть кинетическая энергия молекул воды, чтобы перейти в газообразное состояние. Так, при повышенном давлении смена состояния воды происходит при более высокой температуре.

Например, вода кипит при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, если давление больше 1 бар. Таков принцип действия скороварки: увеличивая давление, она придает воде температуру выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что ускоряет приготовление пищи.

И наоборот, высоко в горах нелегко приготовить пищу из-за низкого давления: на вершине Монблана вода кипит при температуре $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, и макароны варятся гораздо дольше, чем при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Так, если мы хотим испарить воду температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, мы можем поступить двумя разными способами:

- либо повысить температуру воды до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- либо снизить давление до 23 микробар, чтобы температура кипения воды стала $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Переход твердого тела в жидкость и жидкости в газ

А как обстоит дело с переходом твердого тела в жидкость? Феномен, описанный выше, в этом случае влияет мало, потому что разница в объеме твердого и жидкого вещества невелика (оба состояния компактны). То есть давление не играет большой роли в температуре плавления твердого тела: лед тает при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ независимо от давления.

Однако здесь кроется кое-что интересное. Температура кипения воды понижается, когда понижается давление. А что происходит, когда эта температура кипения становится ниже 0°C (при очень низком давлении)? Это значит, что лед «кипит», прежде чем растаять... Другими словами, вода переходит от твердого состояния сразу к газообразному, минуя жидкое (это явление называется «сублимацией»). При очень низком давлении невозможно обнаружить воду в жидком состоянии ($\rightarrow$ рис. 10.4).

Граница давления, после которой вода может существовать в жидком состоянии, 6 микробар, то есть в 167 раз меньше атмосферного давления. Именно поэтому мы не знакомы с явлением прямого перехода воды из твердого состояния в газообразное. Но на Марсе давление составляет чуть ниже 6 микробар, и наличие жидкой воды там невозможно.

Во время смены марсианских сезонов летом лед переходит в пар, а зимой обратно в твердое состояние.

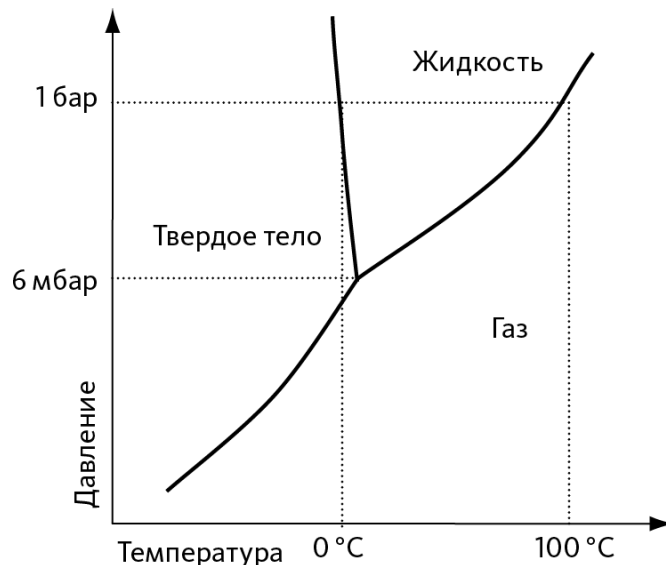


Рис. 10.4 – График «Давление – температура воды»

3. Поверхностное натяжение

Сила притяжения между молекулами, которая придает спаянность жидкости, является источником самых разных явлений в повседневной жизни.

Капли воды

Приоткройте немного кран у себя в ванной, вода начнет сочиться и формировать капли, которые падают, только достигнув определенного веса. Причина в том, что молекулы воды притягиваются друг к другу и к молекулам крана: это притяжение вверх (к крану) компенсирует вес капли. По мере того как капля растет, ее вес увеличивается, пока она наконец не сможет оторваться от крана.

Падающая капля имеет форму сферы: причина опять-таки в том, что в ней все молекулы притянуты друг к другу.

Проведем аналогию с Землей: если материя на ее поверхности находится на возвышении (например, на горе), рано или поздно она неизбежно стремится упасть вниз (обрушение скал из-за эрозии рек, уносящих материю вниз). Именно это и является причиной того, что Земля круглая: всякая неровность в конце концов исчезает из-за земного притяжения.

По тому же принципу капля воды притягивает любую возможную неровность, что позволяет ей сохранять форму сферы.

Приоткройте кран еще немного: теперь капли воды находятся слишком близко друг к другу, чтобы падать по одной, и образуют струю. Позвольте воде пролиться до дна ванны, она проложит себе путь к сливному отверстию. Вы видите, что, когда дорога проложена, вода с удовольствием устремляется по ней. Было бы очень трудно заставить воду изменить маршрут,

даже если вы измените почву, потому что молекулы воды притянуты своими предшественницами и стремятся пройти тот же путь, что и они.

Контакт воды на поверхности

Проведем другой, очень известный опыт: медленно поднесите ладонь к поверхности воды. На небольшом расстоянии вы вдруг почувствуете, что вода притягивается к вашей ладони. Если вы захотите убрать руку, то ощутите некоторое сопротивление из-за притяжения между вашей рукой и молекулами воды.

Это же является причиной возникновения «мениска», который появляется на поверхности воды в стакане: вода поднимается по стенкам, несмотря на силу тяжести, потому что молекулы воды крепко притягиваются молекулами стакана. Данный феномен называется капиллярностью.

Это явление особенно заметно в очень узких стаканах. В стеклянной трубке с маленьким диаметром вес воды достаточно небольшой, чтобы жидкость могла сама по себе подняться на несколько сантиметров, притянутая стеклянной стенкой. Тот же процесс капиллярности наблюдается во время подъема сока внутри дерева.

Поверхностное натяжение и вертикальная сила

Рассмотрим наконец последний, довольно классический опыт: осторожно положите булавку на поверхность воды. Булавка не утонет, хотя ее плотность больше плотности воды. Чтобы убедиться в этом, надавите на булавку пальцем. Когда вода покроет ее целиком, она утонет. **Рис. 10.5** позволяет понять, что происходит: мы изобразили углубление на поверхности воды, вызванное присутствием предмета, положенного сверху. Силы притяжения заставляют молекулы воды (шарики) максимально сблизиться друг с другом: в этом случае говорят, что на поверхности воды возникло «поверхностное натяжение».

Мы показали стрелками силы, которые действуют на молекулу на дне углубления, возникающие из-за притяжения между молекулами. Глядя на изгиб углубления, мы ясно видим, что это вызывает силу, в целом направленную вверх, которая стремится поднять молекулу вверх. Эта сила, направленная вверх и возникшая благодаря поверхностному натяжению, может компенсировать вес, направленный вниз: поэтому предмет держится на воде. Одним словом, вода пытается поднять любое углубление, образованное предметом на ее поверхности, что вызывает силу, направленную вверх, которая не дает предмету тонуть.

Поверхностное натяжение объясняет, каким образом некоторые насекомые могут передвигаться, скользя по поверхности воды, в то время как их лапки должны были бы погрузиться в воду: понаблюдав за ними, мы заметим небольшие углубления возле их лапок, которые и являются причиной этого чуда.

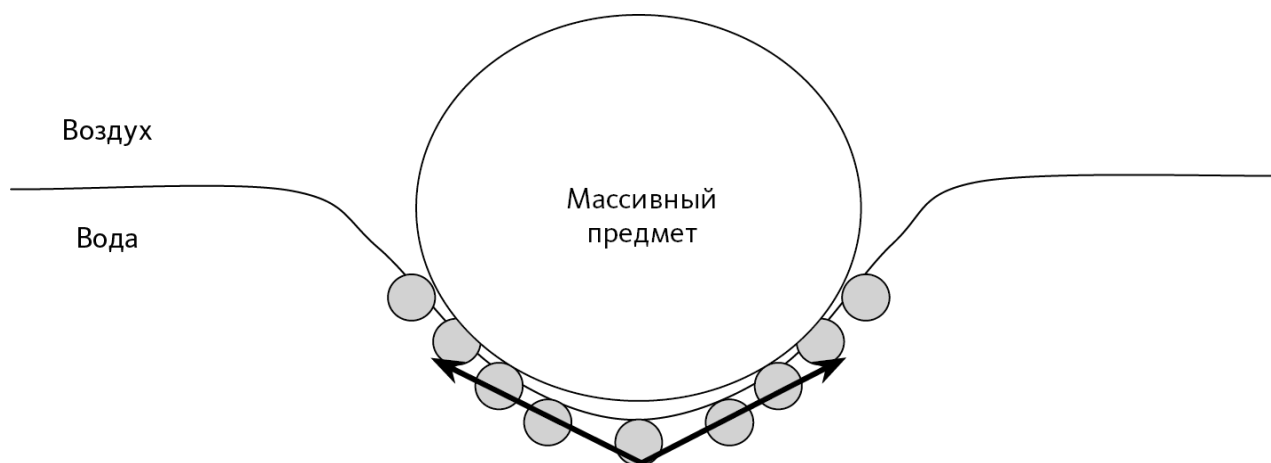


Рис. 10.5 – Деформация поверхности воды и поверхностное натяжение

4. Движение и температура газа

Теплый воздух поднимается...

Происхождение феномена

Тепловые аспекты газа во время расширения и компрессии лежат в основе многих распространенных явлений, и сейчас мы рассмотрим их.

Для начала вспомним формулу «идеального газа» $P = nkT$.

Она показывает, что давление пропорционально произведению концентрации и температуры. Этот факт, установленный опытным путем, позволил сделать заключение, что температура связана со средней кинетической энергией молекул: большая кинетическая энергия делает столкновения между молекулами сильнее, а значит, повышает давление. Большая концентрация также вызывает больше столкновений молекул и тоже повышает давление.

Это приводит нас к первому интересному заключению. Рассмотрим горячий воздух температурой 100 °C на уровне земной поверхности при атмосферном давлении 1 бар. Поскольку его температура выше окружающего воздуха, следовательно, концентрация молекул меньше. На самом деле в состоянии равновесия давление $P = nkT$ одинаково для теплого и для холодного воздуха (а иначе силы давления тут же привели бы молекулы в зону более низкого давления): если T больше, значит, n меньше. В каком-то смысле более сильные столкновения молекул заставляют горячий воздух занять больше места, что снижает его концентрацию.

Поскольку горячий воздух содержит меньше молекул, чем холодный (при одинаковом объеме), он более легкий: из-за действия силы Архимеда горячий воздух начинает подниматься вверх. На этом основан принцип действия воздушного шара, который надут горячим воздухом.

Попутно отметим разницу с аэростатом, который надут не воздухом, а другим газом легче воздуха (например, гелием), то есть в аэростате нет необходимости нагревать газ, поскольку он заведомо легче воздуха.

Воздействие на климат

Эта особенность воздуха лежит в основе многих климатических явлений первейшей важности.

Переместимся в центр Сибири. Она находится очень далеко от океанов. Между тем вертикальные течения океанов переносят энергию с поверхности до самых далеких глубин. Таким образом, требуется много энергии, чтобы нагреть поверхность океанов, что объясняет, почему их температура мало меняется в течение сезонов. То есть районы, близкие к океану, обладают более умеренным климатом, чем районы, расположенные дальше в глубине континента, как Сибирь.

Так, зимой в Сибири воздух очень холодный и стремится собраться у поверхности земли (холодный воздух опускается). Это приводит к росту давления: образуется обширный антициклон. Высокое давление приводит в движение воздушные массы, которые спешат покинуть эту зону: ветра дуют из центра континента к окраине. В Индии и Юго-Восточной Азии эти сухие ветра, пришедшие изнутри, не приносят никаких дождей. Наступает сухой сезон (зима).

Летом все наоборот. Внутренняя часть Азии сильно нагревается, воздух поднимается, что создает обширный циклон. Ветра, дующие с океана, притягиваются циклоном, и прибрежные районы Индии и Юго-Восточной Азии обильно поливает дождями. Это сезон дождей (лето). Такое чередование засушливого и очень влажного сезонов называется муссонным климатом.

В более широком смысле существование циклонов и антициклонов в основном связано с тепловыми колебаниями воздуха по всей планете. Именно это создает ветра и влияет на зоны плохой и хорошей погоды.

Расширение и сжатие газа

Охлаждение при расширении

Продолжим наше исследование теплового поведения газа. Представим давление в скороварке и внезапно освободим сжатый таким образом газ. Газ под таким давлением стремится лишь к одному: расшириться и занять больший объем. Поэтому будет стараться вырваться из узкого пространства скороварки, выходя через клапан.

Но рассуждения наши будут такими же, как при описании смены состояния материи: расширяющийся газ стремится занять место, уже занятое окружающим воздухом. То есть он будет расталкивать молекулы воздуха, а они будут этому сопротивляться. Они будут оказывать давление на газ, не давая ему увеличиться в объеме. То есть окружающий воздух оказывает работу сопротивления на расширяющийся газ.

Это значит, что энергия газа уменьшается. Это не «макроскопическая кинетическая энергия», поскольку газ был неподвижен в начале и станет неподвижным в конце. Значит, это «микроскопическая кинетическая энергия. Другими словами, температура газа уменьшилась из-за работы сопротивления воздуха.

Таким образом, расширение газа сопровождается снижением температуры. А сжатие газа вызывает повышение температуры.

Заметим, что сжатый газ, который стал теплее окружающего воздуха, в дальнейшем всегда может охладиться, потеряв энергию от теплоты в пользу окружающего воздуха.

Остается добавить пару замечаний к этим выводам:

- расширение, которое имело место во время перехода жидкости в газ, не сопровождается снижением температуры, потому что потеря энергии компенсируется теплотой, привнесенной извне (необходимо нагреть воду, чтобы она закипела, что позволит поддерживать одинаковую температуру);

- расширение газа в вакууме не сопровождается изменением температуры, поскольку расширяющийся газ не занимает ничье место (нет работы силы сопротивления).

Применение в холодильнике

Охлаждение газа при расширении лежит в основе работы холодильника: сначала мотор активирует компрессор, который сильно сжимает флюид, расположенный в задней части холодильника. Это сопровождается повышением давления и температуры. Затем, чтобы охладиться, флюид переходит в радиатор в задней части холодильника: теплота перешла в окружающий воздух помещения. Мимоходом заметим, что холодильник всегда нагревает помещение, в котором находится...

Сжатый таким образом и охлажденный при комнатной температуре флюид затем претерпевает в пути резкое внезапное расширение, что восстанавливает в нем нормальное давление. Этот процесс его сильно охлаждает: именно в этот момент флюид вступает в контакт с внутренностью холодильника. Будучи очень холодным, он охлаждает внутреннее пространство холодильника (передача энергии теплотой).

Интересно отметить, что в конце нам понадобилась энергия электричества, чтобы изъять энергию из внутренности холодильника (понижение температуры)... Таким образом, помещение не только получает обратно потраченное электричество, но и энергию изнутри холодильника. Одним словом, помещение получает больше тепловой энергии, чем холодильник ее теряет. Если бы мы оставили дверь работающего холодильника открытой, комната не переставая нагревалась бы: действительно, при сохранении энергии потребленная электрическая энергия обязательно куда-нибудь удаляется. В данном случае она преобразуется в микроскопическую кинетическую энергию помещения.

Понижение температуры на высоте

Завершим последним примером, касающимся явления, известного каждому: понижение температуры на высоте. Это кажется естественным, но происхождение его вовсе не тривиально.

Окружающий воздух находится в постоянном конвективном движении, воздушные массы поднимаются и опускаются. Это может, в частности, происходить из-за повышения температуры (теплый воздух поднимается) или ее понижения (холодный воздух опускается).

Но когда воздух поднимается, он достигает высот, где давление более низкое. Таким образом, поднявшийся воздух расширяется, давление внутри его постепенно ослабевает (так же, как расширяется пар в скороварке, возвращаясь к атмосферному давлению). А где расширение, там охлаждение: температура поднявшегося воздуха падает. Так же как опустившийся воздух вновь сжимается, и температура его растет.

Таким образом, понижение температуры на высоте напрямую связано с понижением давления, которое зависит от скопления молекул у поверхности земли, связанного с гравитацией.

5. Движение текучих веществ

Связь между давлением и скоростью текучего вещества

Представим поведение газа в каком-нибудь узком месте (→ **рис. 10.6**). Предположим, что мы разогнали газ до 50 км/ч. Это значит, что, несмотря на очень хаотичное движение молекул газа из-за столкновений, в целом они движутся вправо.

Что произойдет при приближении к месту сужения? Поскольку отверстие более узкое, пройти через него может меньшее число молекул. Таким образом, только часть молекул, движущихся слева, проникает через проход: молекулы собираются у входа. В этом месте создается повышенное давление, это давление тут же начинает ускорять молекулы, находящиеся впереди в узком проходе.

Это ускорение позволяет «пробке рассосаться», поскольку быстрее выгоняет молекулы. В конце концов получается, что в проходе молекулы движутся быстрее, чем перед проходом. Таким образом, когда в трубе существует сужение, газ ускоряется. С противоположной стороны сужения происходит обратный процесс: газ замедляет движение, чтобы приобрести начальную скорость.

Этот чисто «геометрический» способ ускорения газа применяется, в частности, в реактивных соплах, чья цель выбросить газ с как можно более высокой скоростью. Если самолет ускоряет газы назад, газы ускоряют самолет вперед (принцип взаимодействия).

Заметим, что жидкость, подобно газу, текла бы быстрее на выходе из сужения.

В предыдущем примере ускорение газа перед узким проходом происходит из-за повышенного давления, которое «толкает» газ. Это значит, что давление в самом проходе ниже, чем перед входом в него, – именно эта разница в давлении и придает газу ускорение. Иными словами, увеличение скорости в течение пути всегда связано с понижением давления.

Аналогичным образом с другой стороны узкого прохода давление снова повышается, и это тормозит газ: снижение скорости связано с повышением давления.

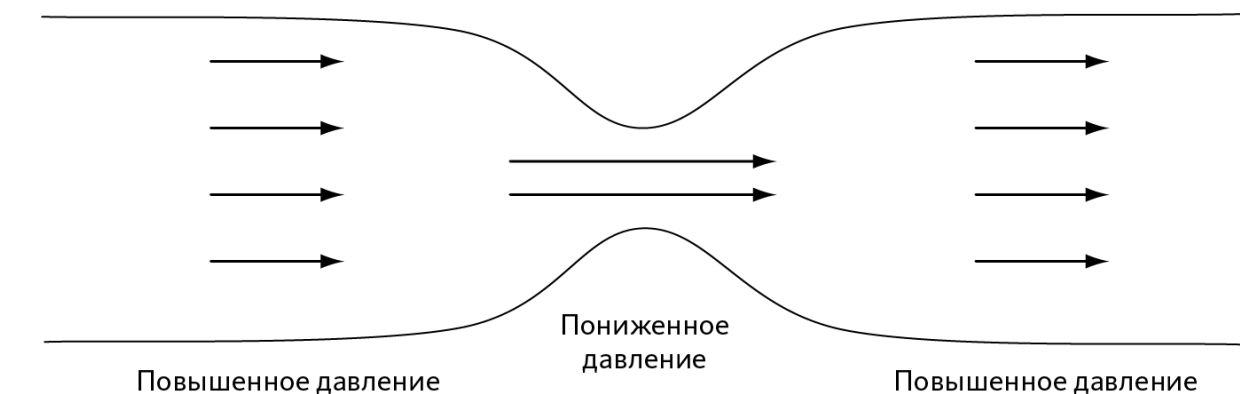


Рис. 10.6 – Скорость и давление газов в трубе

Ускоренное движение текучего вещества: применение

Создание вакуума

Эффект Вентури может быть использован, например, для создания вакуума в сосуде: если вода течет по трубке, которая в одном месте сужается, давление в месте сужения становится ниже. Если сужение соединено с закупоренной камерой, газ в камере притягивается низким давлением текущей воды (→ **рис. 10.7**). В конечном итоге из камеры выходит газ до тех пор, пока давление внутри не становится равным давлению водяного потока в месте сужения.

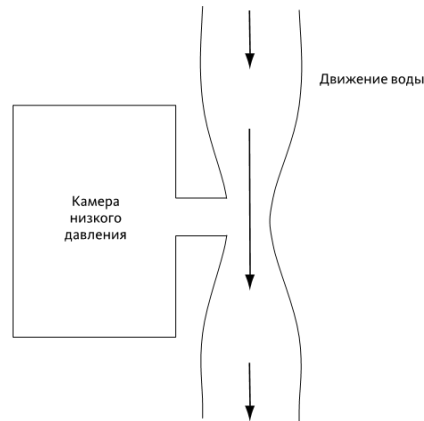


Рис. 10.7 – Гидроструйный насос

Эффект Магнуса

Когда теннисист заставляет шарик вращаться, это может придать ему поразительную траекторию – такой шарик называют «крученым». То же самое происходит с футбольным мячом. Уменьшение давления в ускоренном потоке помогает понять эти феномены.

На **рис. 10.8** мы изобразили мяч, летящий с большой скоростью и еще быстрее вращающийся вокруг своей оси. Мы видим, что воздух движется в том же направлении, что и нижняя поверхность мяча, и в противоположном с верхней. Из-за фрикции (трения газов) воздух замедляется над мячом и ускоряется под ним.

Вследствие этого возникает повышенное давление сверху (из-за торможения) и пониженное снизу (из-за ускорения). Это создает силу, направленную сверху вниз (от высокого давления к низкому): мяч отклоняется от начальной траектории, направленной влево.

Это явление называется эффектом Магнуса.

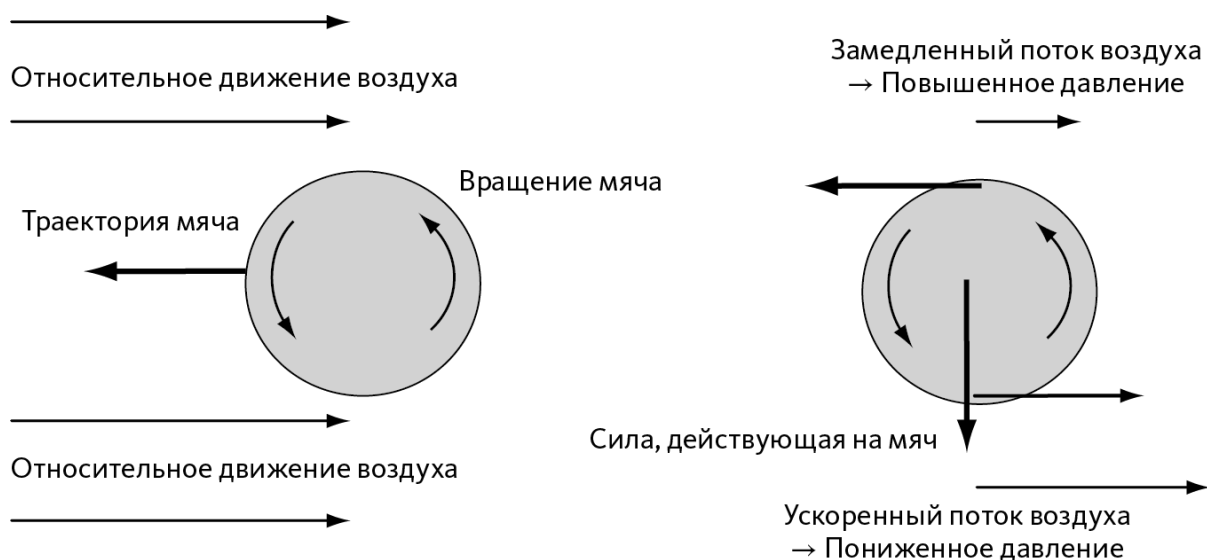


Рис. 10.8 – Эффект Магнуса

Подъемная сила крыла самолета

Способность создавать пониженное давление также позволяет самолетам летать. На рис. 10.9 мы изобразили крыло самолета, на которое ветер дует слева (то есть самолет летит влево). Крыло профилировано таким образом, что площадь верхней плоскости больше нижней.

Представим, что скорость воздушного потока под крылом и над ним одинакова. Воздух, который перемещается от передней части крыла к задней, быстрее преодолет расстояние под крылом, чем над крылом. На рис. 10.9 показано, что за одну секунду больше молекул прибывает в точку В, нежели в точку D. То есть в точке D создается более низкое давление, чем в точке В.

Пониженное давление в точке D будет втягивать воздух, протекающий над крылом, ускоряя его. В итоге воздух над крылом движется явно быстрее воздуха под крылом. Эта более высокая скорость сопровождается пониженным давлением над крылом. Таким образом, крыло «притянуто» вверх этим давлением. Если скорость самолета достаточно высока, этой верхней тяги может быть достаточно, чтобы оторвать аппарат от земли.

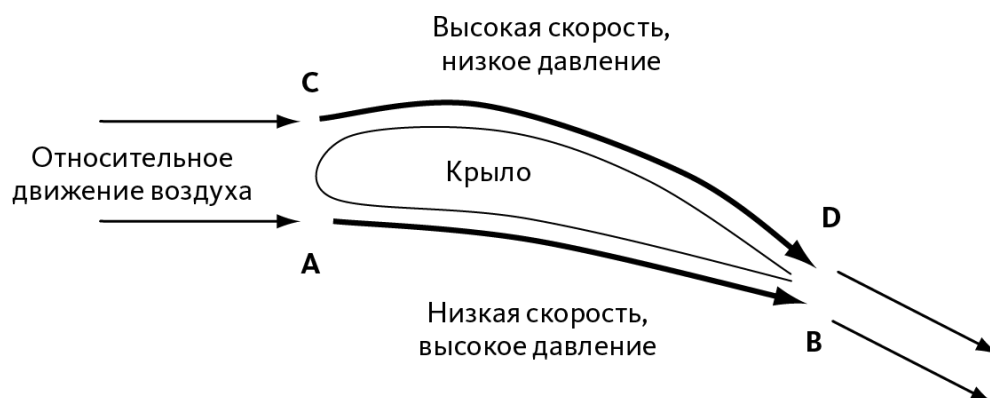


Рис. 10.9 – Вертикальная тяга крыла самолета

Интуитивно мы представляем, что самолет летит, «опираясь» на воздушные массы снизу. В реальности мы видим, что самолеты летают, потому что их «присасывает вверх» из-за вакуума, который создается над крыльями... Другими словами, низкое давление над крылом играет более важную роль, чем высокое давление под крылом.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Существование жидкостей и твердых тел связано с притягивающими электростатическими силами, действующими между молекулами.
- Перехода жидкости в газ можно добиться, увеличив температуру или снизив давление. При смене состояния вещества определенное давление требует определенной температуры, которая остается постоянной, пока жидкость целиком не перейдет в газ.
- Ниже определенного уровня давления жидкое состояние невозможно, и твердое тело сразу переходит в газ. Это называется сублимацией.
- Поверхностное натяжение, существующее на границе соприкосновения с жидкостью, возникающее благодаря силе притяжения молекул, объясняет множество различных феноменов: капли воды, плавающие предметы тяжелее воды, подъем жидкости по стенке (капиллярность).
- Теплый газ занимает больший объем, чем холодный, и поднимается вверх благодаря силе Архимеда. Таков принцип действия воздушного шара и многих климатических явлений.
- Обычно расширение газа сопровождается охлаждением, а сжатие нагреванием. Этот принцип лежит в основе работы холодильника, а понижение температуры на высоте служит тому наглядным примером.
- Чем выше скорость движения жидкости или газа, тем ниже давление. Именно это свойство позволяет самолету летать. Оно также объясняет некоторые эффекты поведения теннисного и футбольного мячей.

11. Звук

Микроскопические свойства материи, представленные нами в предыдущих главах, позволяют нам приступить к рассмотрению явления, играющего важнейшую роль в нашей повседневной жизни, – звуку. Что такое звук, как он распространяется, как его создать, как его уловить? С какой скоростью он передвигается, что представляют собой высокие и низкие звуки и как воспроизвести нужный тон? Это послужит удобным случаем рассказать о принципе работы музыкальных инструментов. Мы остановимся на понятии резонаторного ящика, важного для многих разделов физики, в том числе для фундаментальных концептов квантовой физики.

1. Звуковая волна

Природа звука

Что такое звук? Речь идет ни больше ни меньше как о вибрации среды на микроскопическом уровне. Как температура связана с хаотичным движением молекул, так и звук связан с более упорядоченным движением целого скопления молекул.

Когда мы говорим, наши голосовые связки вибрируют на высокой частоте, заставляя вибрировать окружающий воздух. Создается черед низкого и высокого давления в то время, как голосовая связка вибрирует среди молекул воздуха (→ **рис. 11.1**).

В зонах повышенного давления силы давления стремятся вытеснить молекулы воздуха на соседние участки, из-за этого на соседних участках повышается давление из-за притока туда молекул. Тем временем в начальной зоне установилось низкое давление из-за вибрации голосовой связки (→ **рис. 11.1.с**).

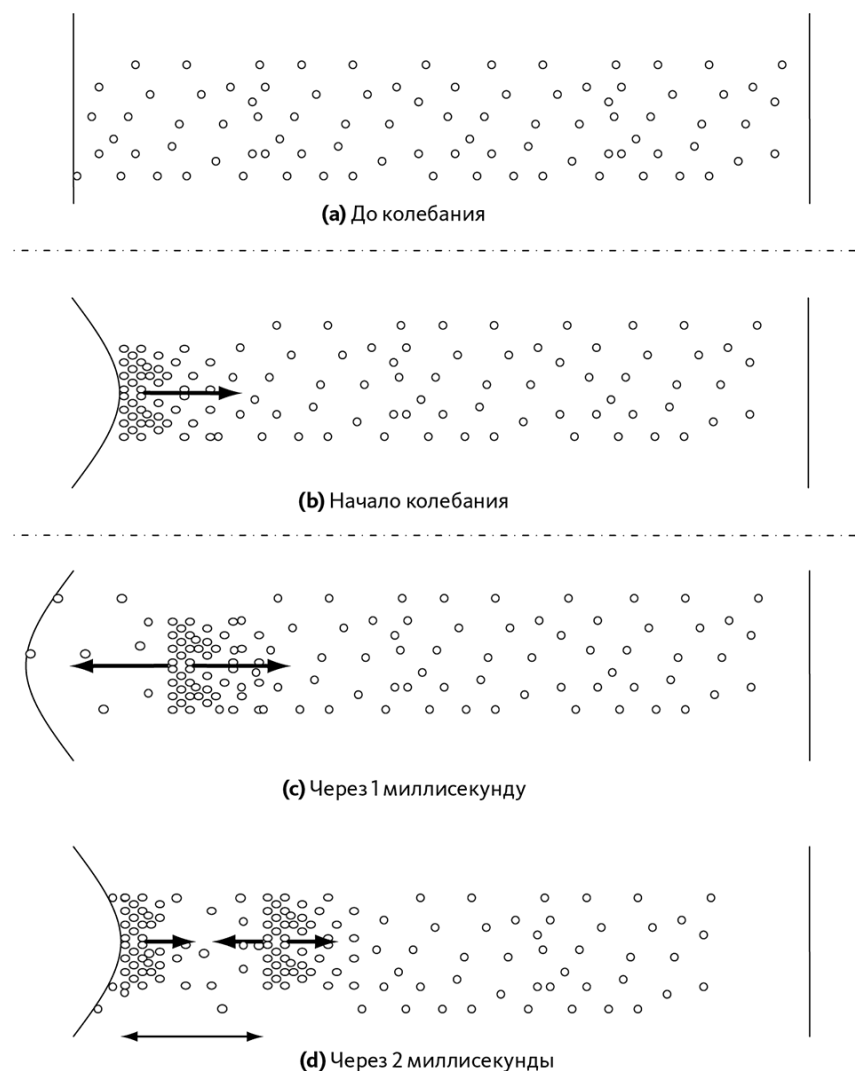


Рис. 11.1 – Распространение звуковой волны

(а) – молекулы воздуха равномерно распределены в пространстве.

(б) – изгиб голосовой связки вызывает повышенное давление рядом с ней. Из-за сил давления молекулы стремятся переместиться вперед.

(с) – связка возвращается назад, что создает возле нее низкое давление. Зона высокого давления переместилась вперед.

(д) – воздух перед голосовой связкой и снова сжат. Таким образом, чередование высокого и низкого давления распространяется вперед.

Зона высокого давления будет все больше приближаться к центру воздуха, так же как и следующая за ней зона низкого давления. Таким образом, вибрация, созданная голосовыми связками, передается по всему пространству. Если мы посмотрим на определенный участок воздуха, мы «увидим», что на этом участке высокое и низкое давление поочередно сменяют друг друга (временные колебания). Если же мы охватим все пространство, то «увидим» смену зон высокого и низкого давления (колебание в пространстве).

Иными словами, мы создали «волну»: волна представляет собой колебания в пространстве и времени. Обычно такая волна распространяется: так, на **рис. 11.1** мы видим, как зона высокого давления понемногу «перемещается» слева направо.

Однако необходимо усвоить, что молекулы воздуха не сопровождают волну. На **рис. 11.1** мы видим, что не одни и те же молекулы составляют зоны высокого давления (b) и (d). Зато те же самые молекулы находятся прямо перед голосовой связкой в положениях (b) и (d). Иными словами, молекулы только вибрируют во время прохождения волны, а потом возвращаются на прежнее место.

Проведем аналогию с морскими волнами: они будто бы перемещаются в заданном направлении, но вода остается на прежнем месте. Поверхность воды лишь поднимается и опускается при прохождении волны: вода перемещается только вертикально, но не горизонтально. Корабль в океане перемещается не благодаря волнам, он всего лишь поднимается и опускается при их прохождении.

Характеристики звуковых волн

Здесь мы представим некоторые основополагающие характеристики волн. То, что мы скажем, справедливо не только для акустических волн (звука), но и для волн на поверхности воды, для света и любых других излучений (с которыми мы познакомимся в разделе «Оптика») и, наконец, для самой материи на микроскопическом уровне (об этом мы поговорим в разделе «Квантовая физика»). То есть данные характеристики чрезвычайно важны.

Частота, период и длина волны

Посмотрим еще раз на **рис. 11.1**: в части **11.1.d** мы обозначили λ (лямбда) расстояние между двумя соседними зонами повышенного давления, которое называют длиной волны. Если провести аналогию с поверхностью воды, речь шла бы о расстоянии между двумя последовательными волнами.

Кроме того, на **рис. 11.1.b** и **11.1.d** мы видим, что одно колебание голосовой связки заняло 2 миллисекунды. В этом случае говорят, что период колебания связки T равен 2 миллисекундам: период – длительность колебания.

Это значит, что за одну миллисекунду прошла половина колебания, то есть частота колебания голосовой связки равна 0,5 колебаний за 1 миллисекунду. Отметим, что частота – это период наоборот (период колебания 2 миллисекунды соответствует частоте 0,5 колебания за одну миллисекунду).

0,5 колебания за миллисекунду соответствует 500 колебаниям в секунду: говорят, что частота составляет 500 герц. Единица «герц», обозначаемая Гц, означает количество колебаний в секунду – это стандартная единица частоты. Кроме того, частота обозначается буквой ν , которая произносится «ню».

Скорость звука

Скорость звука соответствует скорости перемещения высокого и низкого давления, как показано на **рис. 11.1**. Что же на практике определяет эту скорость?

Продвижение высокого давления вперед происходит из-за сил давления, которые действуют на молекулы и которые толкают некоторых из них вперед. Мы видим, что высокое давление не может двигаться быстрее, чем сами молекулы. Однако скорость молекул напрямую зависит от температуры: чем выше температура, тем быстрее распространяется звук. На практике скорость звука в воздухе все же немного ниже скорости молекул.



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

То, что мы говорили о газе, справедливо также для жидкости и твердых тел. Главная разница на этот раз в том, что здесь молекулы находятся в тесном контакте друг с другом, то есть достаточно малейшего перемещения, чтобы вызвать повышенное или пониженное давление. Кроме того, из-за тесного соседства молекул действие повышенного давления передается от одной к другой очень быстро: молекулам почти не нужно перемещаться, чтобы «сообщить» другим о прохождении зоны повышенного давления.

То есть в жидкости и твердых телах звук распространяется гораздо быстрее, чем в газе. Так, при одинаковой температуре звук распространяется в 4–5 раз быстрее в воде, чем в воздухе... А что касается распространения звука в стали, оно в пятнадцать раз быстрее, чем в воздухе!

Только в вакууме звук распространяться не может, поскольку там нет молекул, чтобы создавать высокое и низкое давление, само существование звука в вакууме не имеет никакого смысла.

При обычной температуре скорость звука примерно равна 340 м/с: так, если молния сверкнет на расстоянии километра, пройдет примерно три секунды, прежде чем прогремит гром.

Связь между частотой, скоростью и длиной волны

Вернемся последний раз к **рис. 11.1**. Между схемами (b) и (d) мы видим, что зона повышенного давления прошла расстояние λ (равное длине волны). Тем временем между обоими моментами прошел период T . Если мы обозначим v скорость распространения волны, то получим выражение $\lambda = vT$ (пройденное расстояние равно произведению скорости на истекшее время).

Однако частота ν является противоположностью периода T : $\nu = 1/T$. Из чего следует: $\lambda = v/\nu$.

Это выражение означает, что быстрое колебание связки в сочетании с низкой скоростью волны приводит к зонам высокого давления, очень близким друг к другу, что достаточно интуитивно. Для данной скорости звука это означает, что высокая частота (быстрое колебание связки) связано с короткой длиной волны (зоны высокого давления – очень близко друг к другу).

Восприятие звука

Каким образом улавливается звук после своего распространения? На самом деле восприятие звука очень похоже на его передачу. Чередование высокого и низкого давления было создано вибрацией голосовой связки или мембраны. Точно так же эти зоны высокого и низкого давления могут заставить вибрировать другую мембрану, в каком-то смысле вибрация голосовой связки передается другой связке с помощью воздуха...

Такой воспринимающей мембраной в ухе служит барабанная перепонка. Мембрана колеблется под действием звука: высокое давление ее отталкивает, низкое притягивает. Кроме того, чем больше амплитуда высокого и низкого давления, тем сильнее звук (сильное колебание мембраны).

В ухе или в микрофоне, эта вибрация потом преобразуется в электрический сигнал. Принцип этой трансформации мы более подробно рассмотрим в дальнейшем. Превращение этого электрического сигнала в звук в мозге относится к области субъективного, а не объективного, то есть это выходит за пределы области, изучаемой физикой...

Мы также видим, что восприятие высоких и низких звуков напрямую связано с частотой колебаний воздуха. Чем быстрее переход от высокого давления к низкому, тем выше звук. Такие колебания очень быстры, порядка 1000 в секунду! Это значит, что за одну секунду повышенное давление 1000 раз касается нашей барабанной перепонки, которая колеблется 1000 раз.

Область слышимого простирается от 20 колебаний в секунду (20 Гц – очень низкий звук) до 20 000 колебаний в секунду (20 000 Гц: очень высокий звук), за нижней границей область инфразвуков, за верхней – область ультразвуков. Такие колебания нам не слышны.

2. Музыкальные инструменты

Передача звука

Чтобы создать звук, необходимо заставить воздух колебаться на высокой скорости. В частности, такая задача стоит перед музыкальными инструментами. В струнных инструментах (скрипка, пианино, гитара) струны колеблются подобно голосовым связкам. В других инструментах это скорее мембрана, например, в некоторых духовых инструментах (простой или двойной язычок, который вибрирует), а также в некоторых ударных (например, кожа барабана).

Мы убедились, что высокие и низкие звуки связаны с частотой колебания. Чтобы уточнить, что именно может повлиять на частоту этих колебаний, рассмотрим колебания струны (рассуждения об этом будут аналогичны и для мембраны).

Проведем аналогию с маятником: подвесим предмет на нитку, привязанную к потолку, и заставим его качаться. Кажется очевидным, что период колебания маятника зависит от его длины: чем длиннее маятник, тем длиннее путь, который пройдет предмет, тем больше времени ему на это понадобится. Также и длинная струна колеблется медленно, то есть маленькая частота (низкий звук), потому что колебания более «широкие».

Чтобы помешать струне «проделать долгий путь» во время колебания, мы можем сильнее ее натянуть. Тогда струна не сможет сильно отдалиться от своей начальной уравновешенной позиции (более жесткая струна). Колебание длится меньше, потому что путь стал короче: частота колебаний увеличивается (звук более высокий).



ПОВСЕДНЕВНЫЕ ШУМЫ

Чтобы извлечь звук, достаточно заставить вибрировать мембрану; но эта мембрана не обязана быть очень гибкой, чтобы прийти в движение. Поверхность твердого на вид предмета может деформироваться достаточно, чтобы издать звук.

Так происходит, когда мы идем: удар ног по земле производит звук, потому что атомам земли придается вибрация, которая передается молекулам воздуха. Множество звуков, окружающих нас, происходят от ударов предметов друг о друга.

Что касается шума мотора машины или самолета, он происходит из-за вспышек, вызываемых химическими реакциями внутри (об этом мы еще поговорим в главе 25). Эти вспышки происходят из-за резкого увеличения объема, связанного с зоной повышенного давления. Зоны высокого давления, вызванные первоначальным повышением давления, в дальнейшем распространяются по воздуху в виде звуковой волны.

Та же природа и у грома, который возникает из-за скачка давления, вызванного электрическим разрядом молнии, нагревшим воздух. Здесь также зоны высокого давления распространяются по воздуху в виде звуковой волны.

Таким образом, короткая и жесткая струна дает высокий звук, а длинная и гибкая – низкий. Кроме того, в реальности колебание струны не происходит разом: не все точки струны колеблются в одинаковой фазе, и движение струны может быть очень сложным. Так многочисленные звуковые частоты передаются синхронно, и мы не получаем «чистого звука» с единой частотой: издаваемый звук состоит из наложения большого числа частот.

Резонатор, сортировщик звуков

Принцип

Как правило, в музыкальном инструменте струна и мембрана существуют не сами по себе: они связаны с резонатором (внутренность акустической гитары, барабана или саксофона). Чтобы понять роль резонатора, сосредоточимся для начала на духовом инструменте.

Подуем в саксофон: колебание язычка создает звуковую волну, которая распространяется внутри инструмента. Небольшое отверстие в глубине резонатора позволяет звуку выйти наружу. А другое маленькое отверстие при входе в резонатор позволяет вдуть туда воздух.

Что управляет нотой, звучащей из инструмента? **Рис. 11.2** поможет нам это понять. Мы изобразили почти полностью закрытый резонатор, за исключением небольших отверстий на входе и выходе. Это значит, что звуковая волна будет перемещаться вперед-назад, «отскакивая» от стенок, прежде чем сможет выйти из инструмента.

Чтобы упростить рассуждения, представим, что мы посылаем с левой стороны звуковую волну, которая проникает в резонатор. Предположим, что звук распространяется со скоростью 300 м/с, а длина резонатора 30 см. То есть звук проходит по резонатору за одну миллисекунду.

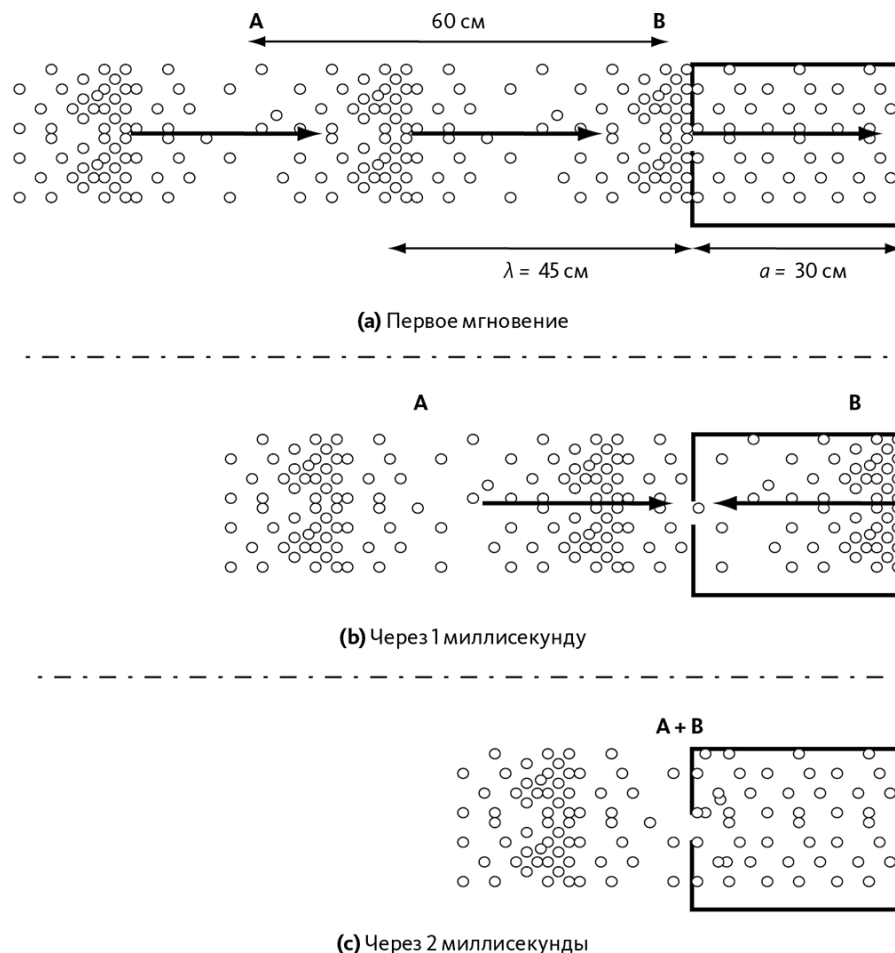


Рис. 11.2 – Разрушение волны в резонаторе

Волна распространяется со скоростью 300 м/с. По прошествии миллисекунды первая зона высокого давления достигла конца резонатора и отскочила. Через 2 миллисекунды она возвращается к началу резонатора, где накладывается на зону низкого давления, пришедшую слева: взаимное наложение разрушает волну внутри резонатора.

Некоторые волны гасят сами себя...

На рис. 11.2.а зона повышенного давления В собирается войти в резонатор. Предположим, что длина волны звука на входе 45 см. Что произойдет через 2 миллисекунды?

Зона высокого давления В успела переместиться вперед и назад внутри резонатора: то есть она снова находится у входа в резонатор, готовая к новому перемещению вперед и назад. Кроме того, звук продолжает прибывать слева (музыкант продолжает дуть), и через 2 миллисекунды на рис. 11.2 мы видим, что ко входу резонатора подошла зона низкого давления А.

Таким образом, у входа в резонатор возникает соперничество между высоким давлением В, пришедшим справа, и низким давлением А, пришедшим слева (→ рис. 11.2.б). Наложение одного на другое приводит к образованию «среднего» давления (→ рис. 11.2.с). Другими словами, волна погасила сама себя из-за происшедшего отражения: звук с длиной волны 45 см не может выйти из инструмента.

Другие сами себя подпитывают...

На рис. 11.3 мы изобразили аналогичную начальную ситуацию, но с длиной волны входящего звука 60 см. На этот раз через 2 миллисекунды у входа в резонатор оказывается зона высокого давления А: она наложится на зону высокого давления В, пришедшую справа. В итоге зона высокого давления становится вдвое больше, а звук вдвое сильнее. Таким образом, звук сможет

усиливаться во время каждого возвращения: на выходе инструмент издаст громкий звук с длиной волны 60 см. Эта длина волны соответствует определенной частоте $\nu = v/\lambda$, то есть определенной ноте. Частота, соответствующая этой ноте, называется основной.

Читатель может нарисовать новую схему с длиной входящей волны 30 см. В этом случае звук тоже будет сильным (зоны высокого давления накладываются друг на друга). Если точнее, любая длина волны, соответствующая дистанции прохода волны внутри резонатора от входа до выхода и обратно, дает громкий звук и может выйти из инструмента. Такие размеры волны подтверждают выражение $\lambda = 2a/n$ (где a – длина инструмента, а n – какое-то целое число). Составляющие такой звук частоты называются обертонами.

Мы убедились, что, если мы посылаем «хаотично» вибрирующую волну ко входу резонатора, на выходе волна будет вибрировать с определенной частотой, именуемой основной, на которую накладываются сопутствующие частоты, называемые обертонами. В каком-то смысле резонатор помог «навести порядок» во входящей волне, сохранив лишь определенные частоты.

Таким образом, мы видим, что духовой инструмент не способен издать «чистый звук», соответствующий одной частоте. Он издает целый набор частот, одна из которых является основной, а сопутствующие – обертонами. Пропорция различных обертонов по отношению к основной частоте влияет на то, что называется «тембром» инструмента. Именно по этой причине одна и та же нота звучит очень по-разному в разных инструментах, потому что обертоны находятся в разных пропорциях.

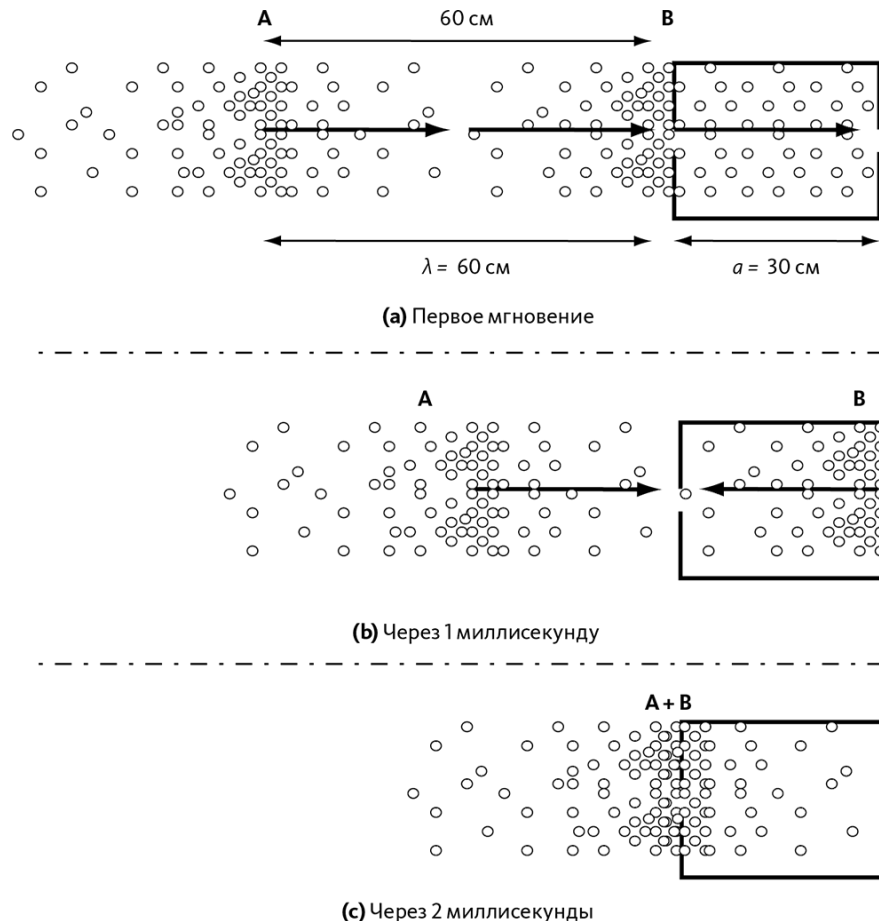


Рис. 11.3 – Усиление волны в резонаторе

Волна распространяется со скоростью 300 м/с. По прошествии миллисекунды первая зона высокого давления достигла конца резонатора и отскочила. Через 2 миллисекунды она возвращается к началу резонатора, где накладывается на зону высокого давления, идущую слева. Такое наложение усиливает волну внутри резонатора. Усиление волны будет происходить при каждом прохождении резонатора вперед и назад.

Обобщение

Таким же образом струнные инструменты издают ноты, соответствующие наложению различных частот. На самом деле струна не вибрирует целиком, ее движение гораздо сложнее. Общее колебание соответствует «основному», а вибрации, которые накладываются друг на друга, образуют обертоны.

Чтобы завершить тему звука, остается упомянуть важный момент: результаты, которые мы только что описали для звуковых волн, соответствуют любому типу волны. *Так, любая волна, запертая в ограниченном пространстве (резонаторе), может иметь строго определенную длину, соответствующую размеру резонатора.* Это связано с тем, что волны такой длины усиливаются, в то время как волны другой длины гасят сами себя во время отражений. Без всякого умысла мы только что сформулировали результат, который позволит нам понять одно из наиболее фундаментальных понятий квантовой физики – к этому мы вернемся в главе 24.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Звук является чередованием зон высокого и низкого давления в пространстве. Его можно создать с помощью струны или мембраны и таким же способом уловить.
- Скорость звука увеличивается вместе с температурой. При средних температурах она равна 340 м/с в воздухе. Звук гораздо быстрее распространяется в твердых телах и жидкостях, чем в газе.
- Высокие звуки соответствуют быстрому колебанию давления, низкие – медленному.
- В каждой волне частота ν , длина волны λ и скорость волны v связаны выражением $v = \nu\lambda$. Оно показывает, что «гребни» волны настолько близки друг к другу, насколько высока частота колебаний и низка скорость распространения.
- Длина любой волны, запертой в замкнутом пространстве, может принимать сугубо определенный размер, связанный с длиной резонатора.
- Ноты, которые издает музыкальный инструмент, состоят из главной частоты, называемой основной, к которой добавляются второстепенные частоты – обертоны. Тембр инструмента зависит от пропорции этих различных обертонов.

Часть 3

Электричество и магнетизм

Микроскопические заряды – колоссальные последствия

12. Некоторые электростатические явления

В части, посвященной механике, мы дали понять, что электромагнитная сила является источником большинства окружающих нас явлений: в механике (большинство сил являются ее производными), в электричестве и в оптике (все явления, связанные со светом, вызваны этой силой). Для того чтобы спокойно приступить к электричеству и оптике, нам необходимо более подробно остановиться на этой важнейшей физической дисциплине – электромагнетизме.

В данной главе мы останемся в рамках электростатики, чтобы познакомить вас со многими важными понятиями в электричестве: поле, потенциал, напряжение и электрический ток. Мы поговорим о наиболее наглядном электростатическом явлении – молнии. Мы объясним, в частности, принцип действия клетки Фарадея, и станет понятно, почему в грозу мы в безопасности внутри автомобиля.

1. Не такое уж пустое пространство...

Электростатическое поле

В начале XIX в. человек научился создавать более или менее заряженные предметы (в частности, с помощью трения). Для начала рассмотрим неподвижный заряженный шар. Если мы положим рядом какой-нибудь заряженный предмет, на него подействует сила сферы. Таким образом, в каждой точке пространства вокруг сферы существует невидимое «нечто», способное придать ускорение заряду, попавшему в эту зону. Это нечто называется электростатическим полем.

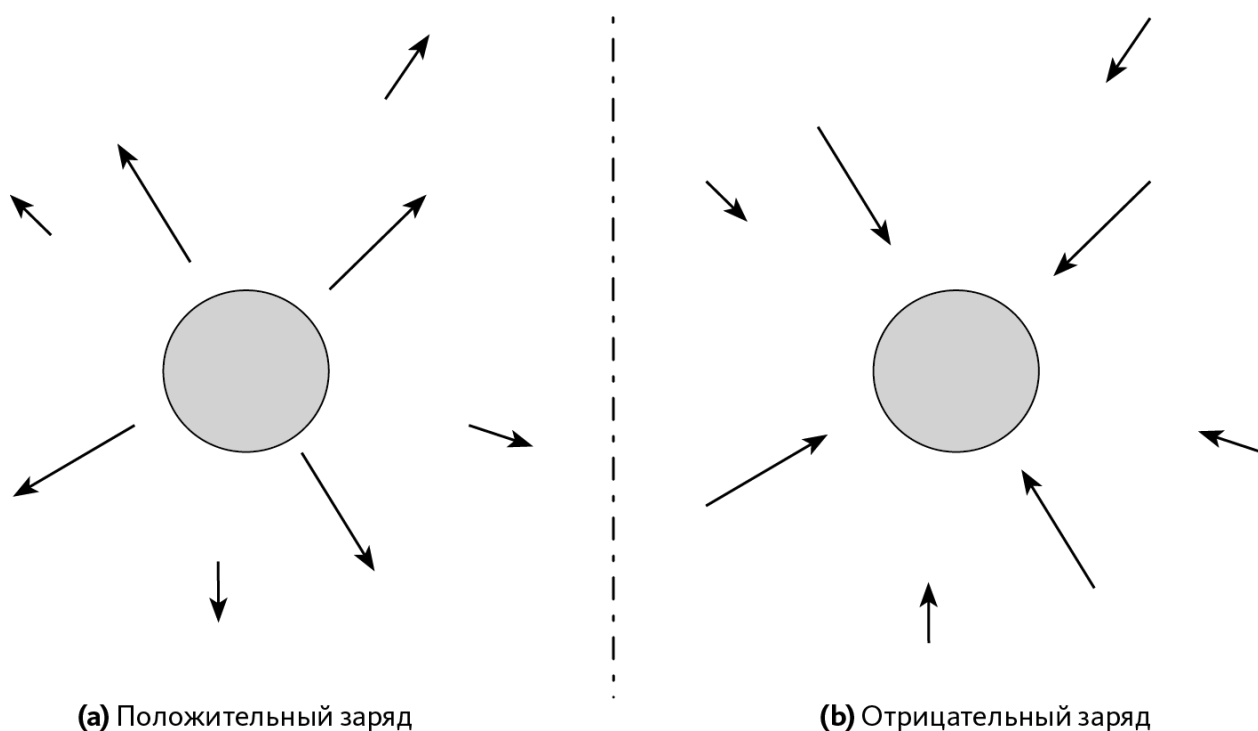
Всякий неподвижный заряд создает вокруг себя электростатическое поле, охватывающее пространство. Как только мы поместим в эту область какой-то предмет, электростатическое поле проявит себя в силе, которая придаст предмету ускорение.

Электростатическое поле представлено вектором, обозначаемым $E^{\rightarrow}$; . Он обозначает силу, которую ощутил бы положительный заряд в 1 кулон, помещенный в эту точку (во врезке ниже поясняется, что представляет собой заряд в 1 кулон). Поскольку электростатическая сила уменьшается пропорционально квадрату расстояния, то же самое происходит с электростатическим полем.

Таким образом, положительно заряженный шар создает поле $E^{\rightarrow}$; , действие которого направлено «наружу»: он оказывает *отталкивающую* силу на любой положительно заряженный предмет. Говорят, что поле «расходится» от положительного заряда (→ **рис. 12.1.а**).

В противоположность этому, отрицательно заряженный шар создает поле $E^{\rightarrow}$; , направленное в сторону сферы: он оказывает *притягивающую* силу на любой положительно заряженный предмет. В этом случае говорят, что поле $E^{\rightarrow}$; сходится к отрицательному заряду (→ **рис. 12.1.б**).

Необходимо хорошенько усвоить, что сила может воздействовать только на материальный объект, в то время как поле охватывает все пространство, даже если оно свободно от любой материи.



(а) Положительный заряд

(б) Отрицательный заряд

Рис. 12.1 – Электростатическое поле, созданное заряженным шаром

С одной стороны, электростатическое поле расходится от положительного заряда и сходится к отрицательному, с другой стороны, сила поля уменьшается пропорционально квадрату расстояния.



КУЛОН

Кулон является единицей измерения электрического заряда, так же как килограмм является единицей измерения массы. Чтобы иметь представление о размере этой единицы, мы можем запомнить, что это заряд малюсенького шарика, диаметром меньше 1 мм, у которого удалили все электроны (заряд протонов больше не компенсируется зарядами электронов).

Мы могли бы сказать, что речь идет об очень слабой единице, но это вовсе не так, а совсем наоборот: если положим два таких шарика в 1 кулон на расстоянии 1 метра друг от друга, отталкивающая сила между ними будет равна весу десятков тысяч автобусов, поставленных друг на друга! Таким образом, речь идет о колоссальной силе. Вспомним, что электростатическая сила полностью раздавила бы гравитацию, если бы заряды не уравнивали друг друга.

Также не следует забывать, что наши шарики содержат десятки миллиардов протонов, что объясняет мощность силы, которую они оказывают.

В конце концов, заряды, с которыми мы традиционно имеем дело, гораздо меньше кулона, потому что предметы всегда заряжены очень поверхностно: совершенно невозможно лишить вещество абсолютно всех электронов! Пример двух наших шариков, потерявших все электроны, полностью вымышленный.

Кроме того, отношение между полем и силой очень простое. Поле – это сила, которая воздействовала бы на заряд в 1 кулон. Если взять некий заряд q , на него будет действовать сила $\vec{F} = q\vec{E}$.

Электростатический потенциал

Таким образом, в каждой точке пространства, окружающего заряженный шар, существует электростатическое поле. Если туда поместить заряд, он получит ускорение, иначе говоря, приобретет кинетическую энергию. То есть заряд, помещенный в эту точку, обладает потенциальной энергией.

Говорят, что в данной точке шар делает возможным существование «потенциала»: по определению, *потенциал равен потенциальной энергии, которую имел бы заряд в 1 кулон, помещенный в данную точку*. Как и для электростатического поля, можно определить потенциал, созданный шаром в любой точке пространства, даже если оно лишено материи.

Потенциал обозначается φ (фи) и измеряется в вольтах (В).

Потенциал φ соответствует потенциальной энергии заряда в 1 кулон. То есть если мы поместим заряд q в заданную точку, его потенциальная энергия будет $E_p = q\varphi$.



ЗНАЧЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА

В главе 8 мы говорили, что в физике происхождение потенциальной энергии признано условно. Отсюда следует, что только изменения потенциальной энергии имеют смысл. Поскольку $E_p = q\varphi$, то же самое верно для потенциала.

Так, потенциал может равняться нулю в положительно или отрицательно заряженной точке (поскольку начало потенциала выбрано условно). В электротехнике нулевой потенциал называют массой, а когда одна точка соединена с землей (то есть заряд нулевой), это называют землей.

Мы условились, что в этой книге мы придаем потенциалу максимальный физический смысл: если нет заряда, потенциал будет нулевым. Если есть отрицательный заряд, потенциал вокруг него будет отрицательным. Если есть положительный заряд, потенциал будет положительным.

Можно показать, что потенциал пропорционален заряду шара, который его создает, и обратно пропорционален расстоянию до этого шара. Это значит, что если шар имеет положительный заряд, то и потенциал будет положительный. Если шар несет отрицательный заряд, то потенциал будет отрицательным (см. врезку ниже).

Электростатическое поле отклоняет положительные заряды и притягивает отрицательные, то есть оно всегда направлено от наиболее положительных зарядов к наиболее отрицательным. Это значит, что положительный заряд естественным образом переместится от положительных зарядов к отрицательным. С отрицательным зарядом все наоборот.

Это также подразумевает, что если потенциал одинаков во всех точках пространства, значит, электростатическое поле ничтожно: нет отрицательного потенциала большего, чем другие, такого, который поле могло бы притягивать.

2. Движение зарядов

Электрический ток

Попробуем соединить положительно заряженный шар с отрицательно заряженным бруском металла. Мы увидим, что заряды обоих шаров будут расти до тех пор, пока не станут одинаковыми.

При этом есть два варианта, которые не являются взаимоисключающими.

- Возможно, положительные заряды через металл перешли от положительного шара к отрицательному. Это снизило заряд первого шара и компенсировало отрицательный заряд второго.

- Возможно, отрицательные заряды через металл перешли от отрицательного шара к положительному. Это снизило заряд второго шара и компенсировало положительный заряд первого (→ рис. 12.2).

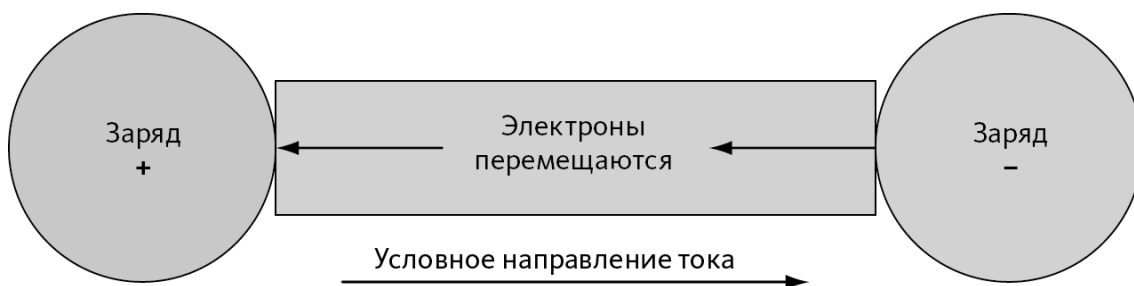


Рис. 12.2 – Ток между двумя заряженными объектами

В любом случае в металле произошло перемещение зарядов, то есть возник электрический ток. Исторически сложилось, что условным направлением тока считается движение положительных зарядов, то есть обратное отрицательным зарядам.

Увы, после открытия в конце XIX в. электрона стало ясно, что по металлу перемещаются только отрицательные заряды (электроны). Действительно, электроны (со знаком «минус») могут оторваться от своих атомов и более или менее свободно перемещаться. В то время как протоны (со знаком «плюс») остаются сгруппированными в глубине атомного ядра, не имея возможности выйти наружу.

Поскольку перемещаются всегда только электроны, вероятно, стоило скорее обозначить направление тока как направление движения электронов (а не наоборот!). Но исторически сложившееся определение сохраняется и по сей день.

Диэлектрики и проводники

Вернемся к нашему опыту. Если для соединения двух заряженных шаров мы вместо металла используем пластик, то заметим, что заряд обоих шаров не изменился. То есть присутствие подвижных зарядов свойственно не каждому материалу. Рассмотрим все более детально на микроскопическом уровне.

В атомах металла электроны привязаны к ядру электростатической силой. Но все атомы соединены друг с другом: влияние соседних атомных ядер со счетов не сбросишь. Между тем не все электроны в атоме расположены на одном расстоянии от ядра, некоторые довольно значительно удалены, так же как некоторые планеты Солнечной системы удалены от Солнца. Именно удаленные электроны сильнее притягиваются ядрами соседних атомов. Благодаря этому соседству они могут оторваться от своего ядра, чего они не смогли бы сделать, если бы атом был

одиноким. Так они могут путешествовать от атома к атому, при этом говорят, что они находятся в зоне проводимости. Говорят также, что они стали свободными электронами.

Разница между проводниками и диэлектриками в способности атомов легко отдавать электроны, что зависит от их природы. Глава 25 поможет понять суть этих разных способностей.

Мы можем провести аналогию с твердыми телами и жидкостями: в диэлектрике электроны остаются привязанными к атому, тогда как в проводнике они могут перемещаться от атома к атому. Это немного напоминает устойчивость молекул твердого тела и способность передвигаться от одной к другой у молекул жидкости.

Также заметим, что, если мы значительно увеличим температуру, электроны могут приобрести «энергию выхода» и быть вырваны из вещества. Именно так Томсон сумел впервые отделить электроны от атома, сильно нагрев металл. И вновь мы видим аналогию с переходом от жидкого состояния к газообразному.

В итоге это объясняет наблюдения за нашими заряженными шарами: поскольку пластик является диэлектриком, электроны не могут в нем перемещаться, то есть не может возникнуть ток, который уравнивает заряды. Металл же, напротив, является проводником: свободные электроны вещества спешат покинуть отрицательно заряженный шар и присоединиться к положительно заряженному шару, что быстро восстанавливает равновесие зарядов.

3. Молния, вспышки и искры

Поведение металла в присутствии заряда

Возьмем отрицательно заряженную металлическую пластину и поднесем к ней незаряженную ручку. Ручка попадет в электростатическое поле пластины: стержень ручки находится в большем отрицательном потенциале, чем другой ее конец, потому что он ближе к пластине. Таким образом, внутри ручки создается электростатическое поле, направленное от конца к стержню (→ **рис. 12.3.a**)

Между тем ручка является проводником: свободные электроны приходят в движение под действием электростатического поля и движутся к концу ручки (зона большего положительного потенциала). Другими словами, отрицательный заряд пластины отталкивает свободные электроны ручки.

Таким образом, отрицательные заряды (электроны) скапливаются в конце ручки, в то время как на стержне, наоборот, образуется дефицит электронов (заряд «+») (→ **рис. 12.3.b**). Такое распределение зарядов внутри ручки уменьшает потенциал ее конца (благодаря отрицательному заряду) и увеличивает потенциал стержня (благодаря положительному заряду). Равновесие достигается, когда электростатическое поле внутри металла ручки становится нулевым, то есть когда потенциал внутри ручки везде становится одинаковым. Действительно, у свободных электронов больше нет причин перемещаться (если поле нулевое, никакая сила на них больше не действует).

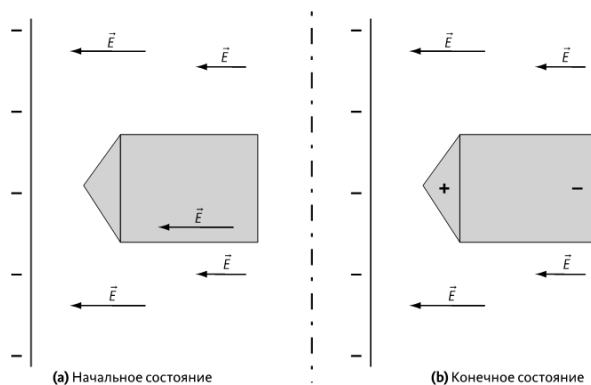


Рис. 12.3 – Металлическая ручка со стержнем, направленным к пластине

Ручка находится в электростатическом поле, созданном пластиной (a). Свободные электроны спешат покинуть стержень ручки, их отталкивает отрицательный заряд

пластины **(b)**. Равновесие достигнуто, когда электростатическое поле внутри ручки становится нулевым (везде одинаковый потенциал).

Тогда как же именно распределяются заряды? Ясно, что чем ближе ручка к заряженной пластине, тем мощнее окружающее ее электростатическое поле. То есть, чтобы компенсировать это поле, разница в зарядах между стержнем и концом ручки должна быть большой.

Тут примешивается еще один важный фактор. Чтобы его объяснить, мы временно заменим ручку металлическим прутом.

Эффект острия

Предположим, что мы поместили металлический шар в начале металлического прута (→ **рис. 12.4**). Он становится положительно заряженным из-за убегания электронов.

С точки зрения свободных электронов прута в этом случае две силы прекрасно компенсируют друг друга:

- Отрицательно заряженная пластина толкает свободные электроны к задней части прута.
- Положительно заряженный шар притягивает свободные электроны к передней части.

Однако можно продемонстрировать, что заряженный шар оказывает такое воздействие, как если бы весь его заряд был сосредоточен в центре. Впрочем, ту же особенность мы отмечали у планет (Земля оказывает такую силу, как будто вся ее масса сосредоточена в ее центре).

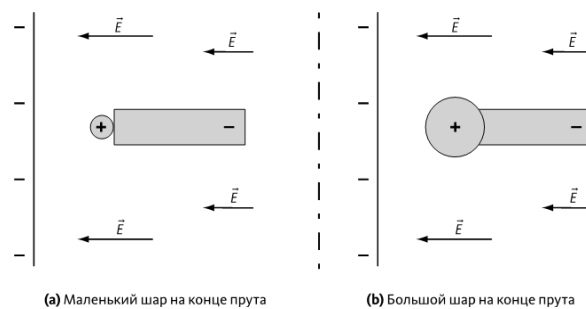


Рис. 12.4 – Металлический предмет в электростатическом поле

В обоих случаях центр шара имеет одинаковый потенциал (потенциал прута), что означает, что шар несет одинаковый заряд: в **(a)** такой же положительный заряд находится в более ограниченном объеме, чем в **(b)**.

Это значит, что огромный шар и совсем маленький действуют с одинаковой силой, если у них одинаковый заряд. В пруте эта сила должна компенсироваться силой металлической пластины и быть одинаковой, каким бы ни был шар, то есть заряд шара одинаковый, каким бы ни был его размер.

Но если шар совсем маленький, заряд сжат в чрезвычайно малом объеме. Это значит, что локально в этом маленьком шаре накапливается значительное число положительных зарядов.

Таким образом, чем более заострен предмет (очень маленький шар на его кончике), тем больше зарядов скапливается в малом объеме, что и называется эффектом острия.

Возникновение молнии

Ионизация воздуха и прохождение тока

Металлическая ручка – прекрасный пример заостренного предмета. Возьмем ее и рассмотрим молекулу воздуха, которая приближается к острию ручки. Здесь она встречает большую концентрацию положительных зарядов, которые с большой силой притягивают электроны

молекулы. Эта сила может быть достаточной, чтобы оторвать электроны молекулы (→ **рис. 12.5**). Таким образом, сама молекула становится заряженной. В этом случае говорят, что она была ионизирована (стала ионом).

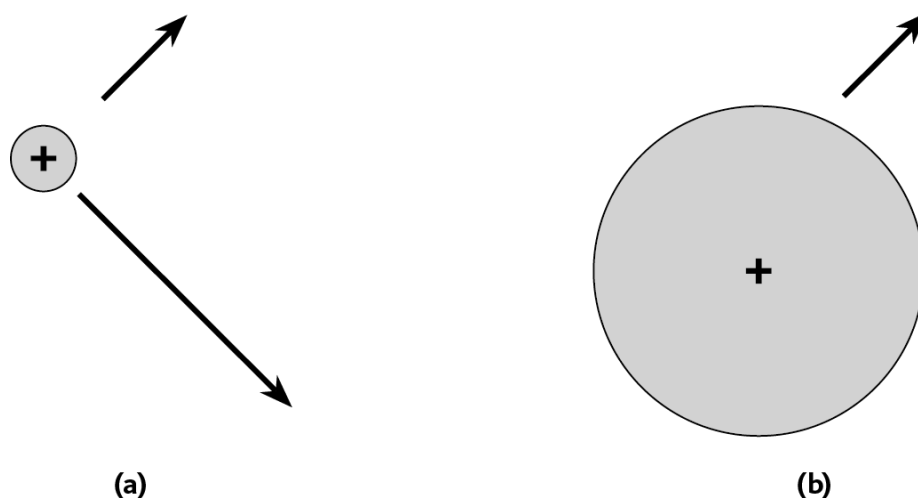


Рис. 12.5 – Размер шара и электростатическая сила

Два шара с одинаковым зарядом оказывают одинаковое воздействие на заданном расстоянии от их центра независимо от их размеров. Однако маленький шар позволяет ближе подойти к его центру и ощутить более мощное воздействие – благодаря ионизации молекул воздуха, приближающихся к заостренному объекту.

В то время как острие ручки ионизирует все молекулы воздуха, пролетающие мимо, образовавшиеся ионы сталкиваются с другими молекулами воздуха. Благодаря этим столкновениям ионы могут отбирать недостающие электроны, отнимая их у других молекул. Другая молекула, в свою очередь, становится ионизированной, то есть в воздухе происходит переход заряда по мере столкновений.

Мало-помалу ионизация, которая постоянно происходит на острие ручки, с большой скоростью распространяется на другие, более дальние молекулы, в основном по направлению отрицательно заряженной пластины (которая притягивает положительные ионы). Эта сеть заряженных молекул, которые быстро распространяются, составляет приманку для электрической дуги. Воздух стал здесь проводником, поскольку сами молекулы переносят заряды.

Как только эта сеть ионов достигает металлической пластины, возникает настоящая молния: мощный отрицательный заряд металлической пластины выбрасывается в воздух-проводник, пока не достигнет положительно заряженного острия ручки. Этот разряд происходит за очень короткое время, потому что ионам не нужно перемещаться от ручки к пластине, чтобы переместить заряд. Им достаточно переместиться до следующей молекулы, чтобы передать свой заряд, что происходит за долю секунды. В каком-то смысле все ионы, расположенные между ручкой и пластиной, перемещаются «одним махом» (→ **рис. 12.6**).

Такое очень быстрое перемещение огромного количества зарядов вызывает мощнейший электрический ток молнии. Это сопровождается выбросом огромной энергии, о которой мы подробнее поговорим в главе 14. Речь идет о тепловой энергии, а также световой (это в буквальном смысле вспышка) и звуковой (сухой щелчок). Мы объясним природу передачи света в главе, посвященной оптике. Что же касается шума, он напрямую связан с нагревом газа, что увеличивает давление ($P = nkT$): газ высокого давления очень резко расширяется (как при взрыве). Резкие скачки давления затем распространяются в воздухе в виде звуковых волн (глава 12).

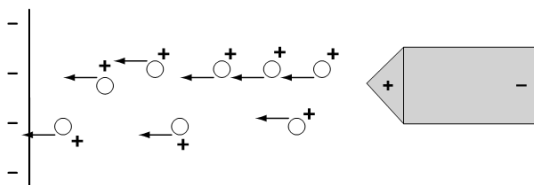


Рис. 12.6 – Общее движение ионов во время вспышки молнии

Ионам нет необходимости проходить весь путь от ручки до пластины, чтобы перенести заряд и разрядить пластину: каждый ион, который забирает электрон при контакте с пластиной, вызывает общее перемещение других ионов, которые приближаются к пластине. Таким образом, расстояние, пройденное каждым ионом, самое незначительное.

Обобщение

Чтобы создать наилучшие условия для вспышки молнии, необходимо следующее:

- присутствие сильно заряженного тела, образующее мощное электростатическое поле;
- присутствие заостренного металлического предмета, помещенного как можно ближе к заряженному телу.

Наиболее известным примером сильно заряженного тела является грозовое облако, которое называется кучево-дождевым. Оно образуется при интенсивной конвекции воздуха, то есть при быстрых восходящих и нисходящих воздушных потоках. Мы видели, что такое может происходить при больших перепадах температуры (теплый воздух поднимается, холодный опускается). Так, в облаках существует феномен трения восходящих и нисходящих воздушных масс, точно так же, как когда мы трем линейку, чтобы ее ионизировать, это трение вырывает электроны некоторых молекул, чтобы передать их другим (трибоэлектрический эффект). Отрицательные заряды скапливаются в одном месте облака, положительные – в другом.

Остается лишь поднять металлическое острие в направлении основания облака. Если заряд облака превосходит определенный размер, может возникнуть молния, разряжающая эту часть облака. Нам становится ясно, как у молнии получается «попасть» в громоотвод, несмотря на феноменальную скорость. На самом деле это сам громоотвод вызывает электрическую дугу, и молнии лишь остается в нее ударить.

Увы, начиная с определенной мощности заряда облака, молния может ударить даже при отсутствии металлического острия. Достаточно, например, чего-то высокого (дерево), чтобы молния в него ударила. Смысл громоотвода в том, чтобы вызвать разряд молнии *до* того, как в облаке накопится слишком много зарядов...

Если молния – это очень мощная световая вспышка, в повседневной жизни большинство вспышек безобидны и могут превратиться в простые искры. Всем известен феномен, который возникает, когда мы выходим из машины. Из-за трения воздуха во время езды на металлическом корпусе автомобиля могут накапливаться заряды (трибоэлектрический эффект). Поднесите свой палец (заостренный проводник!) к дверце, чтобы ее закрыть, вы почувствуете электрический разряд в сопровождении хорошо видимой вспышки между вашим пальцем и наэлектризованным кузовом.

То же самое происходит, когда вы снимаете свитер при низкой влажности воздуха. Можно увидеть искры в сопровождении характерного треска. Ваши волосы получили заряд благодаря трибоэлектрическому эффекту, и они стремятся избавиться от него с помощью мелких неопасных вспышек. Конечно, разряды в данном случае слабые, но не будем забывать, что благоприятным условием для возникновения молнии являются мельчайшие расстояния.

Клетка Фарадея

Заряд в полнотелом металлическом шаре

Рассмотрим отрицательно заряженный металлический шар, то есть в нем переизбыток электронов (заряд «минус») по сравнению с протонами (заряд «плюс») в атомах. Между тем, поскольку речь идет о металле, шар содержит «свободные электроны», способные перемещаться внутри вещества. Эти свободные электроны чувствуют заряд шара, который толкает их, и они

будут убегать от этого заряда, по возможности подальше. Однако «как можно дальше» в данном случае означает поверхность шара, то есть свободные электроны скапливаются на его поверхности. В результате заряд уменьшается в центре шара, поскольку часть свободных электронов покинули эту зону. Электроны прекращают стремиться на периферию, когда центр шара перестает быть отрицательно заряженным.

В конце концов:

- внутреннее пространство шара не заряжено;
- поверхность шара заряжена отрицательно, потому что там скопилась часть свободных электронов.

В итоге заряд объекта проводник всегда сосредоточен на поверхности. Внутреннее пространство объекта остается незаряженным. Такой же результат будет и при положительном заряде, на этот раз свободные электроны притянуты внутрь шара. Процесс продолжается до тех пор, пока электроны (с зарядом «минус») компенсируют положительный заряд в центре шара, и в этом случае при равновесии внутреннее пространство не имеет заряда, тогда как поверхность (где не хватает электронов) заряжена положительно.

Внутри шара столько же электронов, сколько и протонов (в целом шар нейтрален). На практике внутри остаются свободные электроны, и если они не перемещаются, то потому, что на них не действует никакая сила. Это значит, что внутри всякого проводника, находящегося в равновесии, электростатическое поле равно нулю.

Внутреннее пространство полого металлического шара

Теперь рассмотрим полый металлический шар. Заряд, разумеется, сосредоточен на поверхности, и перед нами абсолютно идентичная конфигурация, как и в случае с полнотелым металлическим шаром. Это значит, что по всему внутреннему пространству заряженного шара электростатическое поле равно нулю.

Так, если вы находитесь внутри заряженного шара, вы совершенно ничего не почувствуете. Конечно, ваше тело содержит подвижные заряды (поскольку является проводником), но раз электростатическое поле нулевое, эти заряды ничто не беспокоит. То же самое будет, если вы коснетесь стенок шара изнутри.

Вы находитесь в так называемой клетке Фарадея. Можно продемонстрировать, что электростатическое поле осталось бы нулевым внутри металлического куба, металлического цилиндра и любой металлической структуры, которая целиком вас окружает. То же самое с металлическим корпусом автомобиля: если молния ударит в машину, ее поверхность получит огромный заряд. Но, находясь внутри, вы ничем не рискуете (даже если дотронетесь до заряженного кузова), потому что ни одна сила на вас не подействует.

Мы подчеркнули, что клетка Фарадея действует, только если поверхность металлическая. Уточним почему. Для этого сравним металлический шар с шаром-диэлектриком. При ударе молнии что вы почувствуете, находясь внутри каждого из них?

В случае с металлическим шаром заряд, принесенный молнией, немедленно распространится по шару (поскольку вещество содержит свободные электроны, которые спешат переместиться, чтобы уравновесить заряды). Если мы поместим электрон куда-то внутрь, он ощутит силу всего шара. Каждый элемент шара оказывает на него разнонаправленное воздействие (→ **рис. 12.7**). В итоге все эти силы уравниваются, и общая сила равна нулю. Именно поэтому электростатическое поле внутри заряженного шара равно нулю.

Но если шар является диэлектриком, огромный заряд концентрируется в месте удара (нет ни одного свободного электрона, чтобы его перераспределить). Таким образом, электрон, находящийся внутри шара, ощущает действие мощной силы исключительно в направлении точки удара: общая сила больше не нулевая и она довольно значительна. Шар перестает быть клеткой Фарадея.

Если вы находитесь внутри шара-диэлектрика во время удара молнии, может произойти нечто радикальное: мощный заряд шара не долго останется на одном месте, он вызовет новую молнию (продолжительнее первой), удар которой может быть направлен на проводник, которым являетесь вы... Шар, диэлектрик ни в коем случае не защитит вас: в вас ударит молния.

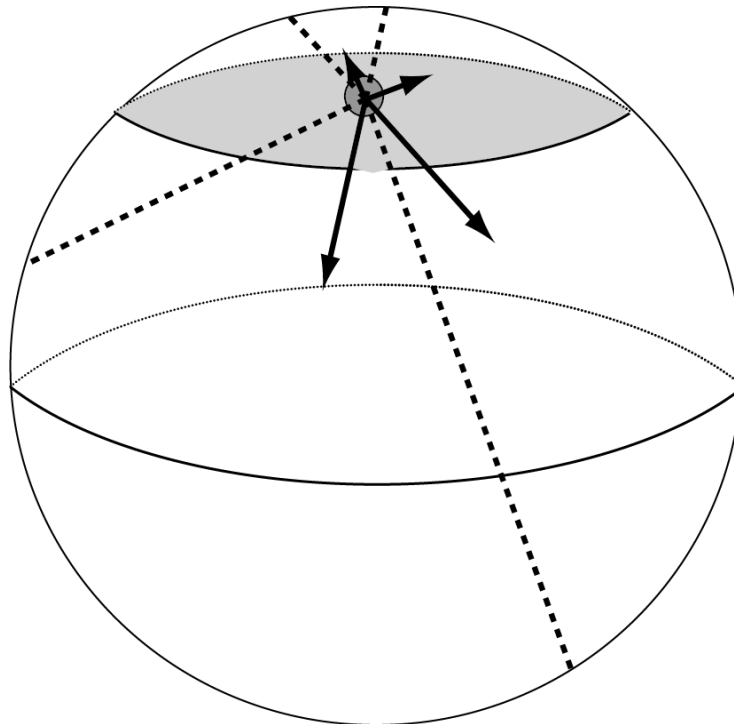


Рис. 12.7 – Силы заряженной сферы, действующие на внутренний заряд

По рисунку можно предположить, что сфера заряжена отрицательно, как и шарик внутри ее. Каждая точка сферы оказывает отталкивающую силу на заряженный шарик. Под шариком зарядов больше, чем над ним, но они и больше удалены: в целом все силы компенсируют друг друга, и общая сила равна нулю.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Мы видели, что в металлическом шаре заряды стремились покинуть внутреннее пространство, чтобы сосредоточиться на поверхности. Можно было бы сказать, что в металлическом диске заряды также покидают внутреннюю плоскость, чтобы собраться на периферии (по периметру).

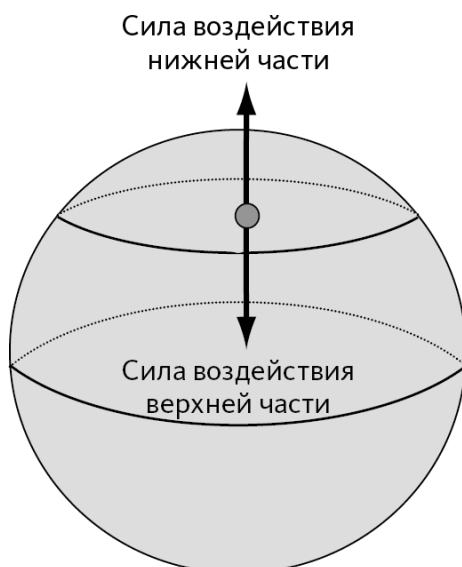
На самом деле это не так, и заряды остаются распределенными по всей поверхности диска. Схема ниже позволяет это проиллюстрировать.

В части **(а)** мы изобразили сферу с отрицательно заряженной поверхностью, а внутрь поместили отрицательно заряженный шарик. Верхняя часть сферы отталкивает шарик вниз, нижняя часть – вверх. Мы видим, что верхняя часть гораздо меньше, то есть на ней меньше зарядов, но зато эти заряды гораздо ближе к шарiku. Можно продемонстрировать, что два этих противоположных эффекта уравнивают друг друга: общая сила, действующая на шарик, равна нулю.

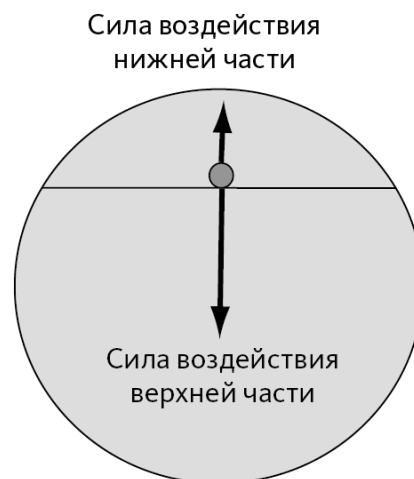
В части **(б)** показан диск, отрицательно заряженный по окружности. Здесь тоже нижняя часть содержит более удаленные заряды, но их больше, чем в верхней части.

Предположим, что в части **(а)** отношение поверхности нижней части к верхней равно 4, – это соответствует соотношению *длины*, которая в части **(б)** равна всего 2. Таким образом, большее количество зарядов в нижней части больше не компенсирует их удаленность. В целом отталкивающая сила в нижней части слабее, чем в верхней. То есть шарик поспешит приблизиться к центру диска.

Таким образом, диск, изображенный в части **(б)**, не стабилен: заряды, показанные на его периметре, стремятся покинуть свое место, чтобы переместиться к центру диска. При равновесии заряды распределены по всей поверхности диска, в то время как в части **(а)** ни один заряд не находится внутри сферы.



(a) Сфера, заряженная на поверхности



(b) Диск, заряженный по периметру

**СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ**

- Заряженный предмет создает электрическое поле в любой точке пространства. Он соответствует силе, которую ощутил бы заряд в 1 кулон, помещенный в эту точку.
- Заряженный предмет создает потенциал в любой точке пространства. Он соответствует потенциальной энергии, которой обладал бы заряд в 1 кулон, помещенный в эту точку. Потенциал имеет такой же знак, что и создавший его заряд. Он выражается в вольтах.
- Электростатическое поле выталкивает положительные заряды и притягивает отрицательные. То есть оно всегда направлено от самых больших положительных зарядов к самым большим отрицательным.
- Металлический проводник имеет свободные электроны, которые перемещаются от атома к атому. Вещество-диэлектрик их не имеет.
- Молния возникает из-за ионизации воздуха, созданной накоплением зарядов на поверхности объекта. Эта ионизация делает воздух проводником, позволяя пройти через него мощному электрическому току. «Эффект острия» значительно повышает вероятность удара молнии.
- Заряды всегда сосредотачиваются на поверхности материала проводника. Внутреннее пространство проводника находится в равновесии и не имеет заряда, электрическое поле там равно нулю, а потенциал одинаковый в любой точке.
- Когда металлическая поверхность полностью окружает внутреннее пространство, электростатическое поле этого пространства всегда нулевое, даже если поверхность имеет заряд. Это называется клеткой Фарадея.

13. Основы электричества

Здесь мы расскажем о принципе действия некоторых основных составляющих электрической цепи: сопротивлении, конденсаторе, батарее. Мы объясним их роль и значение в цепи: использование сопротивлений при нагревании (принцип печей, металлических листов и электрических радиаторов), использование конденсаторов как накопителя энергии. Это будет повод более подробно объяснить, что такое электрическая мощность, с которой мы знакомы благодаря электросчетчикам.

1. Установление тока в проводнике*Основные электрические величины***Сила тока**

Чтобы создать электрический ток, мы видели, что можно, например, соединить два противоположно заряженных шара с помощью проводника. Мы также увидели, что разные

материалы являются проводниками в большей или меньшей степени: в зависимости от выбора материала передача заряда от одного шара к другому будет быстрее или медленнее. Быстрота передачи заряда характеризуется понятием силы тока. Силой тока называют количество заряда, прошедшего определенный участок проводника за определенное время. Это также называют током заряда. Сила обозначается I и выражается в амперах (А).

Напряжение

Когда мы соединяем положительно заряженный шар с отрицательно заряженным с помощью металла, свободные электроны металла перемещаются от шара «минус» к шару «плюс». Иными словами, они перемещаются от отрицательного потенциала к положительному благодаря двум дополнительным условиям:

- с одной стороны, отрицательный потенциал *отталкивает* электроны к другому потенциалу;
- с другой стороны, положительный потенциал *притягивает* электроны к себе.

Теперь представим, что мы соединяем шар -10 В с шаром -5 В. Это значит, что оба шара заряжены отрицательно, но второй имеет меньший заряд, чем первый. Что же произойдет?

- Электроны сильно отталкиваются от шара -10 В.
- Электроны слабо отталкиваются от шара -5 В.

В итоге электроны перемещаются от первого шара ко второму. Мы видим, что электроны прекрасно могут двигаться в сторону отрицательного потенциала.

Таким образом, в электричестве параметров потенциала недостаточно, чтобы определить направление перемещения электронов. Нужно обязательно знать *разницу* потенциалов между двумя точками, чтобы понимать, куда будут перемещаться электроны. Эта разница потенциалов, ключевое понятие электричества, называется напряжением, часто обозначается U и выражается, конечно же, в вольтах (В).

Электроны всегда притягиваются к зонам с бóльшим положительным зарядом (или меньшим отрицательным): если потенциал равен -10 В в пункте А и -5 В в пункте В, электроны будут двигаться к В.

Положительное напряжение U всегда представлено вектором, направленным от большего отрицательного потенциала (который мы обозначим φ^-) в сторону большего положительного (φ^+), что соответствует «естественному» смыслу перемещения электронов (→ **рис. 13.1**). Выражение выглядит $U = \varphi^+ - \varphi^-$.

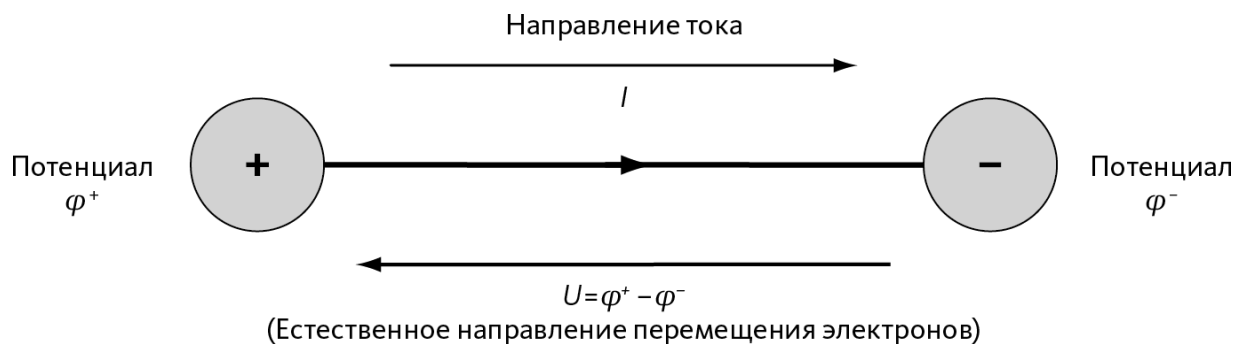


Рис. 13.1 – Направление движения электронов

Материалы-проводники

Уточнения по перемещению зарядов

И вновь вернемся к примеру с двумя заряженными шарами, соединенными проводником. Двигаясь от отрицательного шара к положительному, электроны восстанавливают равновесие между зарядами обоих шаров. За какое время происходит это восстановление?

Внутри проводника электроны перемещаются посредством последовательных столкновений: как и с молекулами газа, эти толчки приводят электроны к весьма хаотичному движению.

В среднем электроны продолжают двигаться от минуса к плюсу, но со смехотворной скоростью – не более 1 мм в секунду, даже в таком прекрасном проводнике, как медь.

Если два шара расположены на расстоянии 1 м друг от друга, значит ли это, что понадобится ждать 1000 секунд, пока заряды не уравновесятся? Нет, потому что заряду отрицательного шара не нужно двигаться для этого к положительному шару.

На практике свободные электроны проводника, которые находятся рядом с положительным шаром, устремляются к нему, быстро компенсируя заряд. Это происходит почти мгновенно, потому что им не нужно преодолевать почти никакого расстояния. Перемещение электронов происходит так же, от ближайшего к ближайшему по всей длине проводника (→ **рис. 13.2**).

В итоге все электроны переместились от шара «минус» к шару «плюс», но по очень короткому пути, а значит, за очень малое время. Впрочем, мы сделали похожее наблюдение в предыдущей главе относительно перемещения ионов в молнии: благодаря общему движению кучево-дождевое облако разряжается почти мгновенно, несмотря на значительное расстояние между ним и землей.

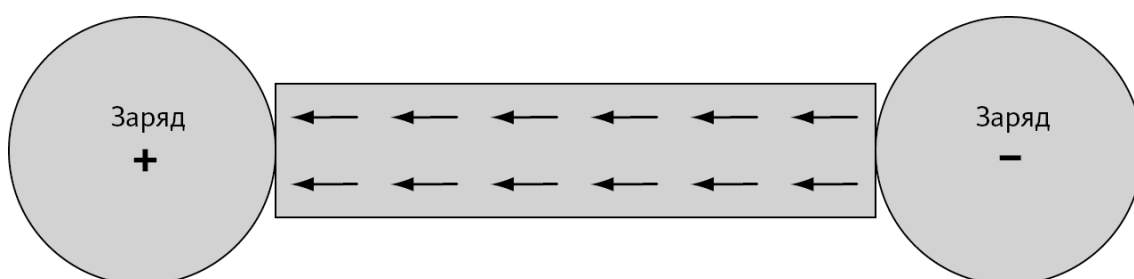


Рис. 13.2 – Перемещение электронов

Стрелки показывают перемещение электронов. Мы видим, что достаточно небольшого перемещения, чтобы заряды двух шаров уравновесились, даже если они удалены друг от друга.

Сопротивление

Соединим теперь два заряженных шара материалом умеренной проводимости, как показано на **рис. 13.3**.

Поскольку перемещение электронов в меди происходит очень легко, заряды уравниваются почти мгновенно на протяжении всей длины медной проволоки. Равновесие устанавливается, когда потенциал везде становится одинаковым (потому что в данном случае больше не действует никакая движущая сила). Таким образом, в электричестве потенциал одинаков в любой точке проволоки проводника. Назовем φ^+ и φ^- потенциалами проволок, взаимно соединяющих положительный и отрицательный шары.

Материал умеренной проводимости будет называться просто сопротивлением. Это сопротивление соединяет два различных потенциала φ^+ и φ^- . Говорят, что оно соединяет положительный полюс с отрицательным. Любой компонент, соединяющий таким образом два пункта с различными потенциалами, называется «диполь» – именно им является сопротивление.

В сопротивлении электроны перемещаются с большим трудом, чем в меди, и, следовательно, необходимо больше времени, чтобы заряды уравнились от одного конца материала к другому. За это время проходит ток, вызванный перемещением зарядов.

Теперь мы постараемся определить силу этого тока.

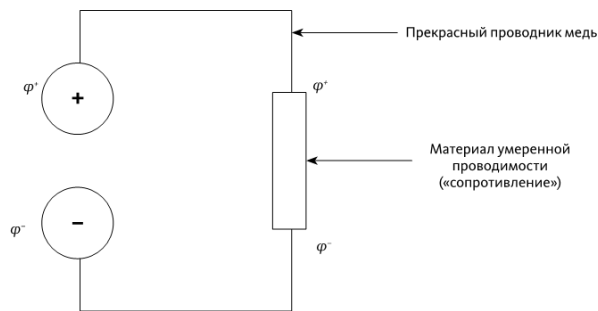


Рис. 13.3 – Два шара, соединенные с помощью сопротивления

Отношение «сила – напряжение» в сопротивлении

Ознакомление

Во время своего движения свободные электроны проводника подвержены действию двух сил:

- движущая сила, являющаяся результатом разности потенциалов между противоположными концами проводника;

- сила трения, вызванная тем, что свободные электроны должны «прокладывать себе путь» внутри проводника от атома к атому: чем быстрее двигаются свободные электроны, тем сильнее их тормозят закрепленные электроны других атомов (электростатическое отталкивание).

Эта сила трения прямо пропорциональна скорости электронов.

Движущая сила стремится ускорить электроны в соответствии с формулой $F^{\rightarrow} = ma^{\rightarrow}$. Но чем быстрее они движутся, тем сильнее их тормозит сила трения: начиная с определенной скорости сила трения компенсирует движущую силу, и электроны теряют ускорение. Они достигли своего оптимального ритма.

В оптимальном ритме движущая сила F равна силе трения и пропорциональна скорости электронов v . Мы запишем это как $F = kv$.

Иначе говоря, заданная движущая сила вызывает определенную скорость. Если движущая сила удваивается, скорость электронов тоже удваивается.

Между тем движущая сила пропорциональна разности потенциалов, то есть напряжению U . А сила тока I пропорциональна скорости электронов (эти два результата будут объяснены во врезке ниже). Таким образом, если сила F пропорциональна скорости v , значит, напряжение U пропорционально силе тока I .

Это записывается $U = RI$.

Это выражение называется законом Ома. R – коэффициент пропорциональности. Его называют сопротивлением проводника, потому что он напрямую связан с материалом. Чем выше трение, тем меньше скорость электронов (для заданной движущей силы), то есть чем выше сопротивление, тем меньше сила тока (при определенном напряжении).

Сопротивление R выражается в омах (Ом).

От чего зависит сопротивление?

Мы уже указывали, что сопротивление зависит от рода материала. Температура также может оказывать влияние. Более того, можно продемонстрировать, что сопротивление R пропорционально длине проводника l и обратно пропорционально площади его сечения S (см. врезку ниже). Это напрямую связано с тем, что прохождение проводника легче, если он широкий (большое сечение) и короткий (маленькая длина). Это записывается как $R = \rho(l/S)$.

Где ρ – удельное электрическое сопротивление и зависит в основном от рода материала, например, у меди сопротивляемость слабая (она легко проводит ток).



Отношение $U = RI$ было получено при допущении пропорциональности между силой и напряжением, с одной стороны, и силой тока и скоростью – с другой. Уточним некоторые моменты, что поможет нам определить, от чего зависит сопротивление проводника.

Начнем с силы тока. Это заряд, проходящий через сечения S проводника за одну секунду. Этот заряд целиком несут свободные электроны. То есть необходимо узнать, сколько свободных электронов проходят поверхность S за одну секунду.

Проведем аналогию с водопроводной трубой: если удвоить площадь сечения трубы, через нее сможет пройти вдвое больше жидкости. Так же и с сечением проводника: если удвоить площадь его плоскости, вдвое больше электронов смогут пройти (заряд станет вдвое больше) – сила тока пропорциональна площади сечения проводника.

Предположим, что электроны перемещаются со скоростью 1 мм/с. По прошествии секунды электроны, находящиеся на расстоянии больше 1 мм от поверхности, не успеют ее достичь. Электроны, пересекающие поверхность в течение этой роковой секунды, те, что находились на расстоянии менее 1 мм (см. схему ниже).

Если их скорость 2 мм/с, все электроны, находящиеся на расстоянии менее 2 мм от поверхности, пересекут ее. Мы видим, что таких электронов в два раза больше. Таким образом, если скорость удваивается, число электронов, проходящих по поверхности, удваивается: сила тока пропорциональна скорости электронов.

В результате сила тока I пропорциональна скорости электронов v и площади сечения проводника S : $I = kvS$.

Теперь сосредоточим внимание на напряжении: это разница потенциалов между двумя концами проводника. Исходя из определения, получается, что это изменение потенциальной энергии, которую ощутит на себе заряд в 1 кулон, перемещающийся от одного конца проводника к другому.

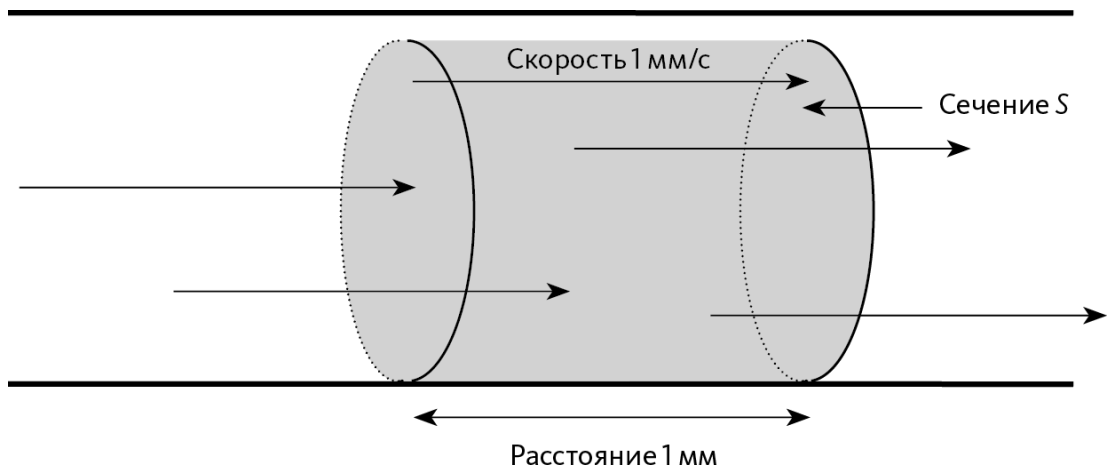
Между тем именно работа силы стремится придать кинетическую энергию частице и параллельно заставить ее потерять потенциальную (глава 9), то есть напряжение соответствует работе электростатической силы, приложенной к заряду в 1 кулон.

Поскольку сила приложена в направлении перемещения, работа равна произведению силы и пройденного расстояния, то есть в данном случае это произведение движущей силы и длины проводника.

В результате напряжение U пропорционально силе F , действующей на заряды, и длине проводника l . Поскольку сила F сама пропорциональна скорости, из этого следует, что напряжение пропорционально скорости и длине проводника: $U = k'vl$.

Подведем итог:

- $I = kvS$
- $U = k'vl$
- То есть $\frac{U}{I} = \frac{k'vl}{kvS} = \rho \frac{l}{S}$ (при условии, что $\rho = \frac{k'}{k}$).
- Получаем $U = RI$, где $R = \rho \frac{l}{S}$.



Электроны перемещаются со скоростью 1 мм/с: длина 1 мм, пройденная за 1 секунду, обозначена стрелками. Только электроны, расположенные на расстоянии менее 1 мм, достигают или переходят на поверхность S по истечении секунды. Кроме того, если поверхность S увеличить вдвое, число таких электронов также увеличится вдвое.

Проводимость

Вместо того чтобы писать, что напряжение пропорционально силе тока ($U = RI$), можно также написать, что сила тока пропорциональна напряжению: $I = GU$.

G – новый коэффициент пропорциональности и называется проводимостью: поскольку $I = (1/R) U$, то G попросту обратно сопротивлению $G = 1/R$.

Отсюда следует, что проводимость пропорциональна сечению проводника и обратно пропорциональна его длине. Это записывается так: $G = \sigma (S/l)$.

Здесь σ называется удельной проводимостью, и она обратно пропорциональна удельному сопротивлению материала: $\sigma = 1/\rho$.

2. Сохранение тока

Конденсаторы

Как создать более длительный ток?

Когда мы питаем сопротивление двумя заряженными шарами, проблема в том, что мало-помалу положительный и отрицательный заряды шаров стремятся к равновесию под действием движения электронов, то есть разность $\phi^+ - \phi^-$ уменьшается до тех пор, пока не исчезнет, так же и с силой тока. Наша цель теперь создать ток в сопротивлении, который будет длиться как можно дольше.

Используем два заряженных шара, как мы делали до сих пор ($\rightarrow$ **рис. 13.3**). Чтобы получить ток более длительного действия, можно увеличить заряд шаров. Но если мы зарядим их сильнее, положительный шар будет иметь более мощный положительный потенциал ϕ^+ , а отрицательный шар более мощный отрицательный потенциал ϕ^- . Приложенное к сопротивлению напряжение тоже увеличится, а с ним увеличится сила тока ($I = GU$). А если увеличится сила тока, проход заряда будет быстрее.

Таким образом, шары будут иметь более мощный заряд, но изменится он быстрее, в итоге их заряды уравниваются так же быстро, и нам не удастся создать более длительный ток.

На самом деле следовало бы увеличить заряд, не увеличивая потенциал. Существуют два основных способа это сделать:

- Увеличить размер шаров. В заряженном шаре все происходит так, как будто весь заряд сосредоточен в его центре. Но когда шар большего диаметра, его поверхность находится дальше от центра: при одинаковом заряде потенциал на поверхности будет слабее. То есть мы можем сильнее зарядить большой шар, а не маленький.

- Значительно приблизить друг к другу отрицательно и положительно заряженные шары. В этом случае потенциал положительного шара будет слабее, потому что отрицательный заряд соседнего шара частично компенсирует действие положительного заряда. И здесь тоже мы сможем снизить потенциал на поверхности, не уменьшая заряд шара.

На практике использование заряженных шаров не очень целесообразно, если мы хотим добиться наибольшего эффекта от взаимного воздействия. Гораздо лучше заряженные плоские поверхности, установленные друг против друга: таким образом получится совокупность положительных зарядов, которые находятся вблизи от отрицательно заряженной поверхности. Обычно используется два металлических диска, расположенные очень близко друг к другу, с противоположными зарядами Q и $-Q$: получается «конденсатор» ($\rightarrow$ **рис. 13.4**). Диски служат «обкладками» конденсатора.

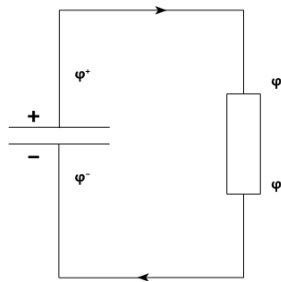


Рис. 13.4 – Конденсатор, подключенный к сопротивлению

В конденсаторе близость отрицательно заряженного диска позволяет уменьшить потенциал положительно заряженного диска, и наоборот. Поэтому диски можно зарядить сильнее, не повышая напряжения. Увеличение поверхности дисков также позволит достичь этой цели.

Свойства конденсатора

Уточним немного свойства конденсатора.

Потенциал каждой обкладки связан с зарядом, который его создает. Если точнее, мы видим, что разница потенциалов между двумя обкладками пропорциональна их заряду. Если мы обозначим U напряжение на зажимах конденсатора, это запишется $Q = CU$, где C – коэффициент пропорциональности и называется емкостью конденсатора, которая измеряется в фарадах (Ф).

Емкость представляет собой заряд, накопленный на обкладках при напряжении 1 В. От чего зависит эта емкость? Наши предыдущие рассуждения позволяют ответить на этот вопрос.

- Большая поверхность дисков позволяет накапливать больше зарядов (как и в случае с шаром). Для заданного напряжения емкость пропорциональна поверхности дисков.
- Меньшее расстояние между двумя дисками позволяет накапливать больше зарядов: будет проще приблизить плюсовой заряд к плюсовому диску, несмотря на отталкивание, благодаря притяжению минусовых зарядов соседнего диска. Таким образом, для заданного напряжения емкость обратно пропорциональна расстоянию, разделяющему два диска.
- Электростатическое отталкивание мешает накопить слишком большой заряд на каждой обкладке: емкость обратно пропорциональна силе тока с индексом $1/(4\pi\epsilon_0)$ электростатической силы. То есть она пропорциональна ϵ_0 .

Если мы обозначим S площадь поверхности обкладок и d расстояние между ними, емкость C будет равна $C = (\epsilon_0 S)/d$.

Чем больше емкость конденсатора, тем больше он позволяет накапливать зарядов, не увеличивая напряжения контактов конденсатора. Для заданного напряжения сила тока, поданная в сопротивление, будет одинаковой, но, поскольку зарядов в конденсаторе больше, ток продлится дольше.

По сути, конденсатор является накопителем электрической энергии. И однако, роль его на этом не исчерпывается. В этом мы убедимся в последующих главах.

Батареи

Конденсаторы позволяют получить ток более длительного действия, но проблема, которая встала перед нами в случае с заряженными шарами, так до конца и не решена. На самом деле, по мере прохождения тока заряд обоих дисков уменьшается, и соответствующий ему потенциал тоже. Как следствие, напряжение на контактах конденсатора уменьшается и сила тока в сопротивлении тоже. Нам пока так и не удалось создать настоящий постоянный ток.

Чтобы получить постоянный ток, необходимо снова заряжать оба диска по мере того, как они разряжаются. Изобретение батареи в начале XIX в. решило эту проблему: с помощью химических реакций, о которых мы расскажем в главе 25, на положительном и отрицательном полюсах поддерживается постоянный потенциал. Эти реакции заставляют положительные заряды двигаться к положительному полюсу, а отрицательные – к отрицательному. Это происходит вопреки «естественному» движению зарядов, поскольку необходимо преодолевать

электростатическое сопротивление. Химические реакции батареи вырабатывают необходимую энергию для этой операции.

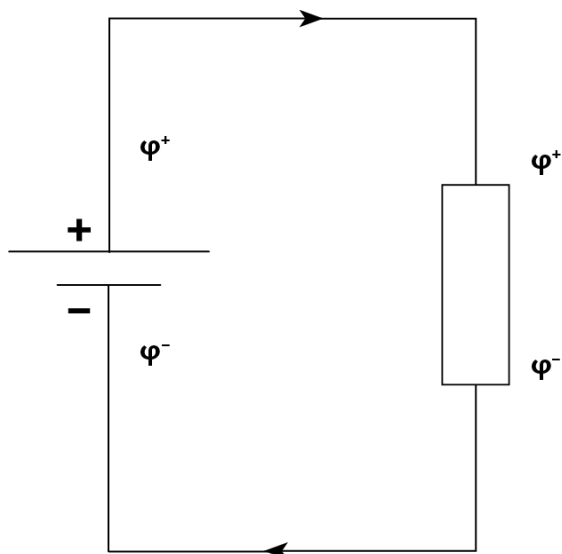


Рис. 13.5 – Электрическая цепь, созданная с помощью батареи и сопротивления
Стрелки показывают направление тока (противоположное движению электронов)

Мы получаем установку, изображенную на **рис. 13.5**, где мы заменили конденсатор символом батареи.

Мы видим, что внутри батареи ток движется от «минуса» к «плюсу» (принудительный ход), тогда как везде он движется от «плюса» к «минусу» (естественный ход). Таким образом, заряды проходят всю цепь. Монтаж такой цепи необходим, если мы хотим создать длительный постоянный ток.

Если с течением времени сила тока остается неизменной, значит, нам удалось создать постоянный ток.

3. Некоторые свойства электрических цепей

Последовательное сопротивление

Сохранение силы тока

Бросим последний взгляд на **рис. 13.5**: видно, что сила тока одинакова в любой точке цепи.

Предположим, что это не так. Тогда электроны скапливались бы там, где их ход замедляется, то есть там, где уменьшается сила тока (→ **рис. 13.6**). Такое скопление отрицательных зарядов тут же создало бы отталкивающую силу для электронов, которые поспешили бы покинуть этот участок. Таким образом, движение электронов ускорилося бы, и сила тока увеличилась бы до той же величины, что и на остальных участках цепи.

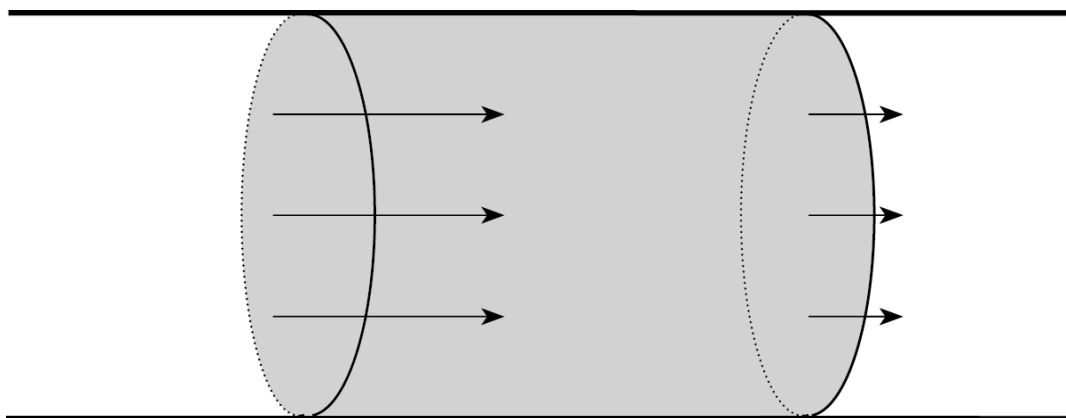


Рис. 13.6 – Уменьшение силы тока и накопление зарядов

Здесь мы предполагаем, что сила тока уменьшается слева направо вдоль проводника. Это значит, что заряд, входящий в заштрихованный объем, больше, чем выходящий из него. Как следствие, заряд внутри обозначенного объема со временем увеличивается: происходит накопление зарядов.

Аддитивность напряжений

Рассмотрим теперь электрическую цепь на **рис. 13.7**. Сила тока I везде одинаковая, и в частности в двух сопротивлениях. Сопротивления R_1 и R_2 называются последовательными.

Однако что касается напряжения, оно разное: действительно, $U_1 = R_1 I$, тогда как $U_2 = R_2 I$. Если R_1 в 10 раз больше R_2 , напряжение U_1 также в 10 раз больше. Чем ниже сопротивление, тем ближе мы к проводу с нулевым напряжением (одинаковый потенциал в каждой точке).

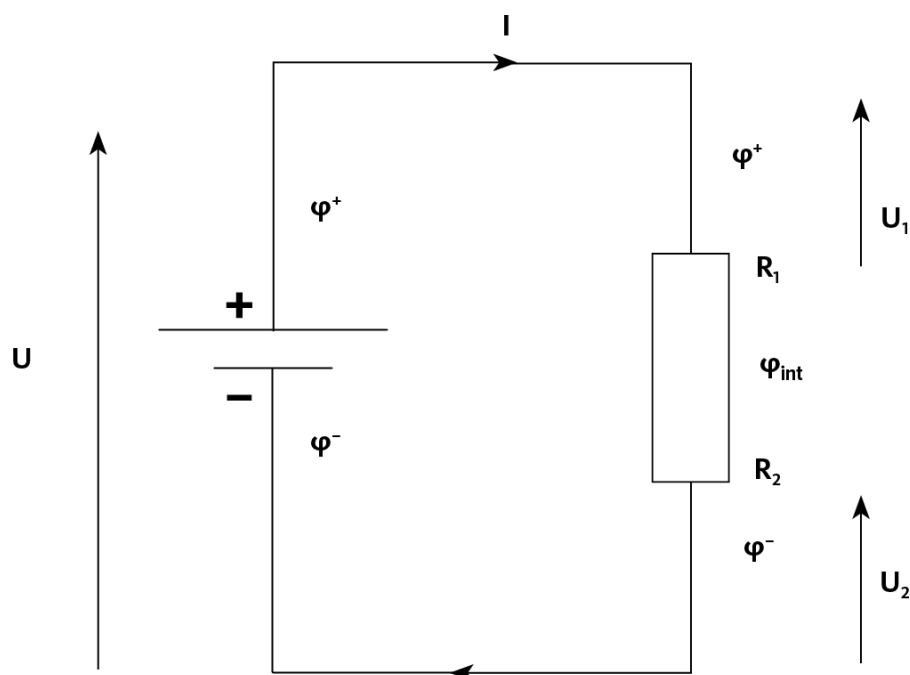


Рис. 13.7 – Два последовательных сопротивления

Кроме того, можно легко продемонстрировать, что общее напряжение U равно сумме последовательных напряжений U_1 и U_2 , что можно записать как $U = U_1 + U_2$. Это правило аддитивности напряжений (см. врезку ниже).



ПРАВИЛО АДДИТИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

Установим связь напряжений с потенциалами на **рис. 13.7**:

$$U = \varphi^+ - \varphi^- \quad U_1 = \varphi^+ - \varphi_{int} \quad U_2 = \varphi_{int} - \varphi^-$$

Добавив два напряжения U_1 и U_2 , получаем:

$$U_1 + U_2 = \varphi^+ - \varphi_{int} + \varphi_{int} - \varphi^- = \varphi^+ - \varphi^- = U.$$

И в итоге получаем: $U = U_1 + U_2$.

Общее сопротивление

Заметим в итоге, что установка двух одинаковых последовательных сопротивлений идентична установке единого сопротивления с удвоенной длиной. Поскольку сопротивление пропорционально длине, из этого следует, что сопротивление вдвое больше. Если говорить в общих чертах, то можно без труда продемонстрировать, что два последовательных сопротивления R_1 и R_2 эквивалентны единому сопротивлению R , как $R = R_1 + R_2$ (см. врезку ниже).

Запомним: последовательные сопротивления складываются.



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Если на **рис. 13.7** мы выражаем сопротивление в зависимости от силы тока, мы получаем:

$$U = U_1 + U_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I.$$

Получаем следующее выражение: $U = R I$, где $R = R_1 + R_2$.

То есть все вместе соответствует единому сопротивлению, которое является суммой сопротивлений R_1 и R_2 .

Параллельные сопротивления

Первое правило Кирхгофа

Изменим электрическую цепь и предоставим электронам выбор между различными возможными путями, осуществив монтаж согласно **рис. 13.8**.

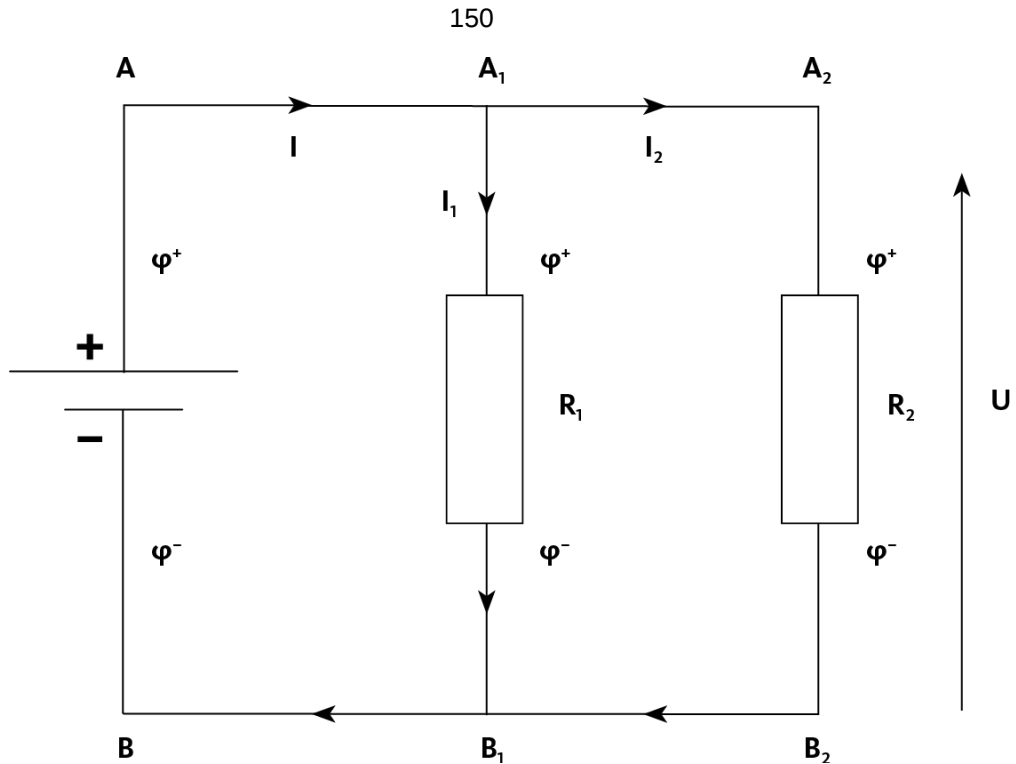


Рис. 13.8 – Два параллельных сопротивления

В дальнейшем мы обозначим G_1 и G_2 проводимость, связанную с сопротивлениями R_1 и R_2 : $G_1 = 1/R_1$ и $G_2 = 1/R_2$.

Точки A_1 и B_1 называются узлами: это места, где сходятся многочисленные провода цепи. Когда ток попадает в A_1 , мы видим, что у него есть два возможных пути на выбор. Между тем число зарядов, прибывших в A_1 , должно быть равно числу зарядов, которые оттуда выходят (действительно, любое накопление зарядов невозможно, потому что оно было бы тут же поглощено электростатическим отталкиванием). Следовательно, сила тока, поступающая в A_1 , равна общей силе тока, которая оттуда выходит: $I = I_1 + I_2$.

Это выражение называется первым правилом Кирхгофа.

Соотношение силы тока

Мы не знаем, пойдет ли ток по ветви 1 (с сопротивлением R_1) или по ветви 2 (сопротивление R_2). Выражение $I = GU$ ответит нам на этот вопрос.

Точки B , B_1 и B_2 имеют одинаковый потенциал φ^- , потому что они соединены проводом. Аналогично обстоит дело с точками A , A_1 и A_2 с потенциалом φ^+ . Это значит, что напряжение U на контактах R_1 такое же, как на контактах R_2 : $U = \varphi^+ - \varphi^-$. В этом случае говорят, что R_1 и R_2 параллельны (или «в параллельном соединении»).

Таким образом, мы имеем: $I_1 = G_1 U$ и $I_2 = G_2 U$. Итак, если G_1 в 10 раз больше G_2 , сила тока I_1 будет в 10 раз больше I_2 . В некотором смысле ток предпочитает тот путь, по которому легче двигаться (высокая проводимость).

Общее сопротивление

В конечном итоге отметим, что установка двух одинаковых параллельных сопротивлений идентична установке одного сопротивления с удвоенной длиной. Поскольку проводимость пропорциональна сечению, отсюда следует, что проводимость вдвое больше.

В целом можно без труда продемонстрировать, что две параллельные проводимости G_1 и G_2 равнозначны единой проводимости G , то есть $G = G_1 + G_2$ (см. врезку ниже).

Запомним: параллельные проводимости (противоположные сопротивлениям) складываются.



ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

На рис. 13.8 общая сила тока выражается $I = I_1 + I_2 = G_1 U + G_2 U = (G_1 + G_2) U$.

Получаем следующее выражение: $I = GU$, где $G = G_1 + G_2$.

Таким образом, все вместе эквивалентно единой проводимости, которая является суммой двух проводимостей G_1 и G_2 .

4. Электрическая энергия

Выражение полученной мощности

Мы видели, что напряжение между точками А и В в цепи соответствовало работе, приложенной к заряду в 1 кулон, который перемещается из точки А в точку В. Таким образом, напряжение связано с понятием энергии.

Но на практике из А в В перемещается большое число электронов, а не один заряд в 1 кулон, что немного усложняет задачу.

Чтобы рассмотреть все подробнее, постараемся определить мощность электростатической силы, которая действует на движущиеся электроны. Поскольку сила направлена по ходу движения, эта мощность будет равна произведению силы F и скорости электронов v : $P = Fv$.

Мы видели, что сила пропорциональна напряжению. С другой стороны, скорость пропорциональна силе тока. То есть выражение $P = Fv$ идентично выражению $P = UI$.

Чтобы лучше это понять, читатель может воспользоваться сведениями из врезки ниже.



ВЫРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

Для начала вспомним, от чего зависит напряжение U и сила тока I .

Напряжение U между двумя точками соответствует работе A , приложенной к заряду в 1 кулон, который перемещается от одной точки к другой. На практике же происходит перемещение большого количества электронов. Обозначим число электронов N , а их заряд q . Общий заряд, который перемещается, равен Nq , а работа, соответственно, равна $A = NqU$.

С другой стороны, поскольку сила приложена по направлению движения, работа является произведением силы F и пройденного расстояния l : $A = Fl$.

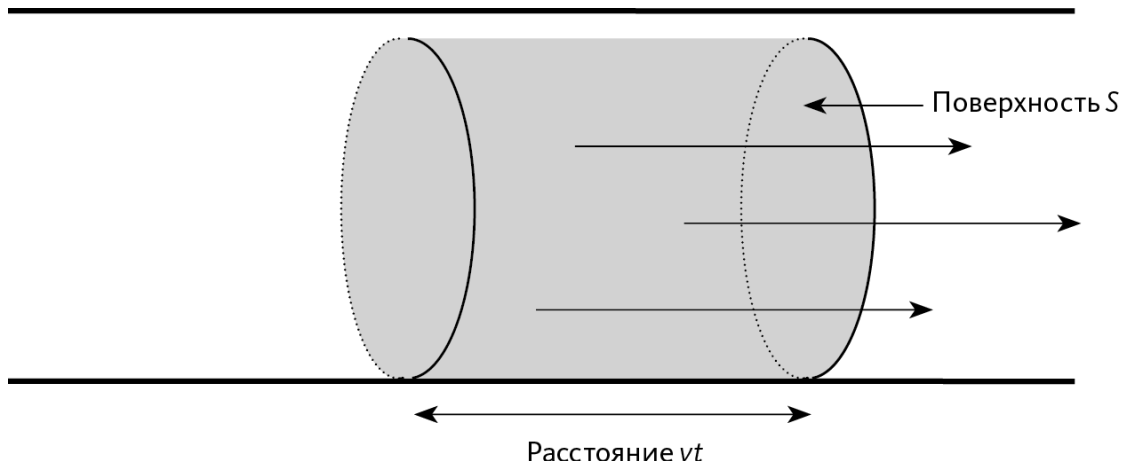
Таким образом, мы получаем точную связь между напряжением и электростатической силой:

$$U = \rho (Fl/Nq).$$

Перейдем к силе тока: если электроны движутся со скоростью 2 мм/с, то, что преодолевают поверхность S меньше чем за секунду, находятся на расстоянии менее 2 мм от этой поверхности. Аналогичным образом, если их скорость v , расстояние до поверхности должно быть меньше v (см. схему ниже). Электроны, которые пересекают пространство S за 1 секунду, являются теми, что заполняют собой объем $V = vtS$, где $t = 1$ секунда.

Обозначим c концентрацию электронов, то есть число электронов на единицу объема. Общее число электронов, пересекающих пространство S за 1 секунду, равно $N = cV$ или $N = cvSt$.

Поскольку каждый электрон несет заряд q , заряд, преодолевающий поверхность за 1 секунду, равен $I = qcvSt$. Согласно определению, речь идет о силе тока.



Подведем итог:

- Сила тока равна произведению концентрации свободных электронов, их скорости, их заряда и площади сечения конденсатора за единицу времени:

$$I = \frac{qcSvt}{t} = qcSv.$$

- Напряжение равно произведению приложенной силы, длине пройденной дистанции и обратному отношению заряда количества заданных электронов N :

$$U = \frac{Fl}{Nq}.$$

- Отсюда получаем

$$UI = \frac{Fl}{Nq} \cdot qcSv = \frac{FvcSl}{N}.$$

В этом выражении произведение Sl в точности соответствует общему объему V , на который действует напряжение U . Более того, произведение концентрации электронов и объема соответствует общему числу электронов N на данном участке, то есть мы имеем $N = cV = cSl$; $t = 1$ с необходимо лишь для того, чтобы сошлась размерность.

В упрощенном виде выражение выглядит $UI = Fv$.

Поскольку $P = Fv$, получается $P = UI$.

Что происходит с полученной энергией?

Сопротивление

Мощность $P = UI$ – мощность, полученная электронами от электростатической силы. Однако на практике в проводнике электроны не получают никакой кинетической энергии (их скорость остается постоянной). Это значит, что вся данная им энергия распределена в другом месте. Это происходит из-за силы трения, которая совершает *работу сопротивления* по отношению к электронам. С помощью силы трения общее количество энергии, сообщенной электронам, передается *атомам* вещества, которые начинают колебаться сильнее: температура проводника повышается.

На практике именно столкновения электронов с атомами (трение) передает полученную электронами кинетическую энергию атомам. Таким образом, в проводнике (то есть в сопротивлении) совокупность полученной электрической энергии превращается в тепловую энергию – это тот же принцип нагревания сопротивления, который мы встречаем у конфорок, электрических печей или электрообогревателей. Нагревшись, сопротивление стремится передать тепловую энергию наружу путем обогрева.

Уточним мощность, полученную сопротивлением:

- Поскольку $P = UI$ и $U = RI$, мы делаем вывод, что $P = RI^2$ (где R – сопротивление).
- Поскольку $P = UI$ и $I = GU$, мы делаем вывод, что $P = GU^2$ (где G – проводимость).

Оба этих выражения верны. Однако в одном случае мощность пропорциональна сопротивлению, в другом она пропорциональна *проводимости* (обратной сопротивлению!): это выглядит несколько противоречивым. Врезка ниже позволяет уточнить смысл этих двух выражений.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

Мы можем попробовать определить энергетические последствия установки последовательного (→ **рис. 13.7**) и параллельного (→ **рис. 13.8**) сопротивлений.

- В последовательном сопротивлении сила тока одинакова в R_1 и R_2 : мощность распределена соответственно $P_1 = R_1 I^2$ и $P_2 = R_2 I^2$. Мы видим, что наибольшее сопротивление выделяет больше энергии.

- В параллельном сопротивлении напряжение U одинаково на контактах R_1 и R_2 : $P_1 = G_1 U^2$ и $P_2 = G_2 U^2$. Мы видим, что больше энергии выделяет наибольшая проводимость (то есть наименьшее сопротивление).

Рассмотрим теперь нагревательную плиту, которую питает напряжение электросети 220 В. Поскольку $P = GU^2$, очень большая проводимость (очень маленькое сопротивление) должна позволить приобрести максимальную мощность, то есть нагреть гораздо быстрее.

Но электропровода, по которым проходит ток к плите, обладают слабым сопротивлением, которое является последовательным по отношению к нагревательной плите. Однако при последовательном сопротивлении наибольшей мощностью обладает наибольшее сопротивление, то есть желательно выбрать для плиты достаточно большое сопротивление, чтобы мощность не пропала даром.

Мы видим, что оптимальное сопротивление плиты с целью выработки максимальной мощности должно быть тщательно рассчитано: оно не должно быть ни слишком маленьким (мощность рассеется), ни слишком большим (низкая сила тока подразумевает низкую мощность).

Конденсаторы

Энергетические значения в конденсаторе довольно разные. Он содержит обкладки, разделенные диэлектриком (например, воздухом), то есть заряды не могут пройти через конденсатор. Они только накапливаются на обкладках. Мощность $P = UI$, переданная электронам, служит тому, чтобы толкать их к обкладкам, несмотря на электростатическое сопротивление.



ПОРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Чтобы энергия распределилась, необходимо, чтобы ток прошел через вещество ($P = UI$). Таким образом, если вы, подобно канатоходцу, пойдете по проводам высокого напряжения, вы будете в полной безопасности. Вы находитесь в зоне высокого потенциала, то есть вы «заряжены», но электрический ток сквозь вас не проходит. Действительно, чтобы возник ток, необходимо, чтобы вещество-проводник соединяло два разных потенциала, а этого не происходит, если вы касаетесь только одного провода.

Но если вы поставите ноги на два разных провода, вы соедините два разных потенциала, и возникнет высокое напряжение: через вас пройдет мощный ток, а тепловая мощность распределится по телу. У вас не только будут сожжены все клетки, но нарушится нервная система, которая является электрической цепью. Это может привести к остановке сердца и называется поражением током.

То же самое произойдет, если вы коснетесь электрического провода, стоя на земле: вы соедините высокий потенциал с нулевым (земля), и сквозь вас пройдет электрический ток.

Наконец, мы видели, что молния представляет собой чрезвычайно мощный электрический ток, проходящий через ионизированный воздух. Если вас ударит молния, этот ток пройдет через вас в землю. Но это ток огромной силы, и распределенная тепловая мощность будет колоссальной. Нарушение нервной системы ничто по сравнению с тем, что молния сожжет все ваши клетки на своем пути.



ЭНЕРГИЯ КОНДЕНСАТОРА

Сила тока является зарядом, проходящим через определенное пространство проводника за одну секунду. Дойдя до конденсатора, этот заряд не может пройти сквозь него, а может лишь

осесть на его обкладке. Таким образом, сила тока соответствует заряду, который накапливается на обкладке конденсатора за одну секунду.

Между тем мощность, полученная конденсатором, равна $P = UI$: произведение напряжения и заряда, накапливаемого за одну секунду. Чтобы получить образовавшуюся энергию, необходимо принять в расчет длительность всей операции. Накопленная в конденсаторе энергия, таким образом, пропорциональна произведению напряжения и накопленного заряда за определенный период времени.

Поскольку общий накопленный заряд равен $Q = CU$, энергия, переданная конденсатору, пропорциональна CU^2 . Можно продемонстрировать, что она равна просто:

$$E = \frac{1}{2}CU^2.$$

Эта энергия накоплена в электрической форме: мы снова видим, что чем больше емкость конденсатора, тем больший интерес он представляет как накопитель энергии.

В итоге движущая мощность, переданная электронам, на этот раз компенсируется отталкивающей электростатической силой, а не силой трения. Таким образом, энергия, переданная электронам, не распределяется в тепловой форме, а остается в виде потенциальной энергии (связанной с отталкивающей электростатической силой): конденсатор не рассеивает электрическую энергию, а аккумулирует ее. Затем он может ее отдать, если к нему подключат сопротивление.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Согласно определению, напряжение между двумя точками является разницей потенциалов между этими точками.
- Согласно определению, сила тока — это заряд, проходящий через определенное пространство проводника в заданной точке за единицу времени.
- В проводнике сила тока пропорциональна напряжению U , что записывается как $I = GU$, или $U = RI$. R называется сопротивлением, а G — проводимостью.
- Сопротивление пропорционально сопротивляемости материала и длине проводника и обратно пропорционально площади его сечения.
- Последовательные сопротивления складываются. Параллельные проводимости складываются.
- Конденсатор состоит из двух металлических обкладок, установленных друг против друга на небольшом расстоянии. Это позволяет накопить сильный заряд, поддерживая слабое напряжение.
- Заряд Q обкладки конденсатора пропорционален напряжению U на контактах конденсатора: $Q = CU$. C обозначает емкость конденсатора, она пропорциональна площади поверхности обкладок и обратно пропорциональна расстоянию, которое их разделяет.
- Батарея является составной частью цепи, где химические реакции заставляют положительные заряды двигаться к отрицательному полюсу, и наоборот — это позволяет поддерживать разность потенциалов на ее контактах, даже если она вырабатывает ток.
- Мощность, с которой электростатическая сила действует на совокупность свободных электронов диполя, выражается $P = UI$ (где U — напряжение на контактах диполя, а I — сила проходящего тока). В сопротивлении она полностью преобразована в тепловую энергию.

14. Магнетизм

В предыдущих главах мы неоднократно наблюдали, какое огромное влияние оказывает электростатическая сила на окружающую среду. Между тем она является лишь частью той фундаментальной силы, которая называется электромагнетизмом. Настало время рассмотреть все ее аспекты, не ограничиваясь больше неподвижными зарядами. Таким образом, на сцену выходит новая сила, на первый взгляд совершенно отдельная от предыдущих, — речь идет о силе магнетизма. Мы проникнем внутрь магнита, чтобы понять, как он работает, и осветить поистине удивительные свойства силы магнитного поля. На интригующие вопросы, которые возникают при его изучении, можно ответить только в рамках теории относительности.

1. Открытие силы магнетизма

Магниты

Первые наблюдения

Вы наверняка догадались, что этой таинственной силой первыми заинтересовались греки, а произошло это в VI в. до н. э. Они обратили внимание, что один минерал, названный магнетитом, имеет любопытное свойство притягивать к себе некоторые металлические предметы. Греки также отметили, что эти минералы в различных условиях могли притягиваться между собой, но дальше этого их изучение не продвинулось.

Сразу стала очевидной связь с наэлектризованным янтарем, настолько, что электрическая и магнитная силы стали представляться единым загадочным явлением. Тем не менее янтарь и магнетит оказывали действие на разные предметы. Более того, янтарь нужно было потереть, чтобы наэлектризовать, в то время как магнетит, похоже, сохранял свои свойства постоянно.

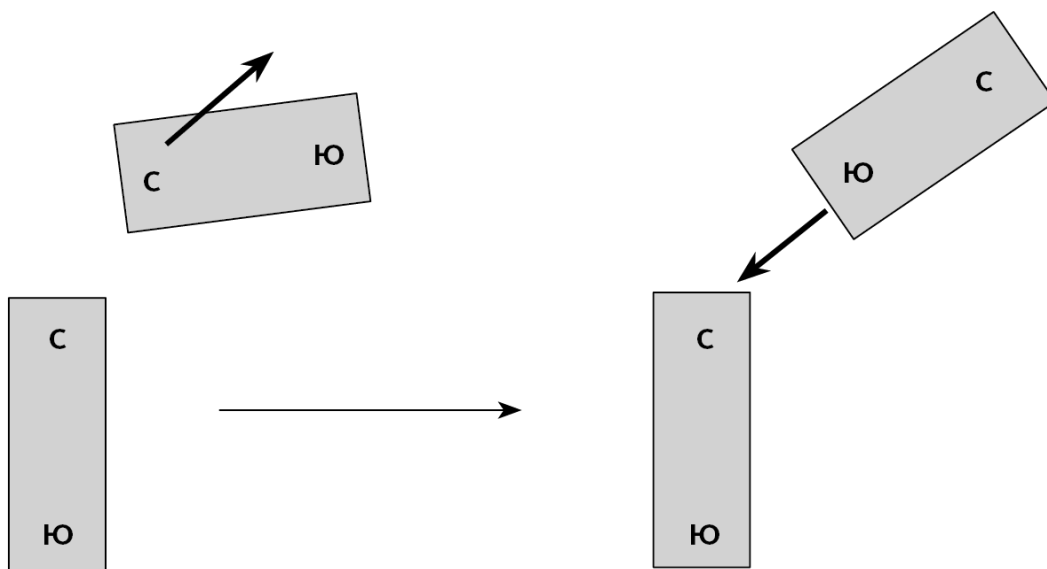
Независимо от греков китайцы пришли к тем же выводам в IV в. до н. э. И все-таки позже они отметили, что некоторые железосодержащие вещества, такие как магнетит, всегда поворачивались определенным образом по отношению к сторонам света: они открыли принцип действия компаса.

Европейцы изобретут компас позднее. И все же в Европе этим феноменом начнут интересоваться лишь в 1600 году.

Вещества, обладающие столь особенными «магнетическими» свойствами, были названы магнитами. Та сторона магнита, которая всегда была обращена на север, получила название северного полюса, а другая южного полюса.

Взаимодействие магнитов

Если поднести магниты друг к другу, мы увидим, что их «северные полюса» отталкиваются, так же как и южные. Зато северный полюс одного магнита притягивает южный полюс другого. Таким образом, два магнита имеют тенденцию вращаться вокруг своей оси под действием этих сил, пока не повернутся друг к другу противоположными полюсами (→ **рис. 14.1**). Повернувшись таким образом, они притягиваются.



(a) Магниты вращаются

(b) Магниты притягиваются

Рис. 14.1 – Взаимодействие двух магнитов

Аналогия между электрической и магнитной силой всегда так же очевидна: в электричестве нужно всего лишь заменить термины «северный» и «южный полюс» на «отрицательный» и «положительный полюс». Здесь также полюсы с одинаковым знаком отталкиваются, а с разными – притягиваются. Более того, обе силы уменьшаются на расстоянии.

Земля – гигантский магнит

Два магнита вращаются, когда мы ставим их рядом друг с другом. Но то же самое происходит и со стрелкой компаса (которая является не чем иным, как маленьким магнитом): она вращается *относительно Земли*, чтобы всегда оставаться обращенной в одну сторону. Это значит, что Земля сама является гигантским магнитом! Это было одним из величайших открытий начала XVII в. (→ **рис. 14.2**).

Между тем два противоположных полюса притягиваются: северный полюс компаса должен быть направлен к южному полюсу другого магнита. Это значит, что север Земли является южным магнитным полюсом. А северный магнитный полюс находится... где-то в Антарктике!

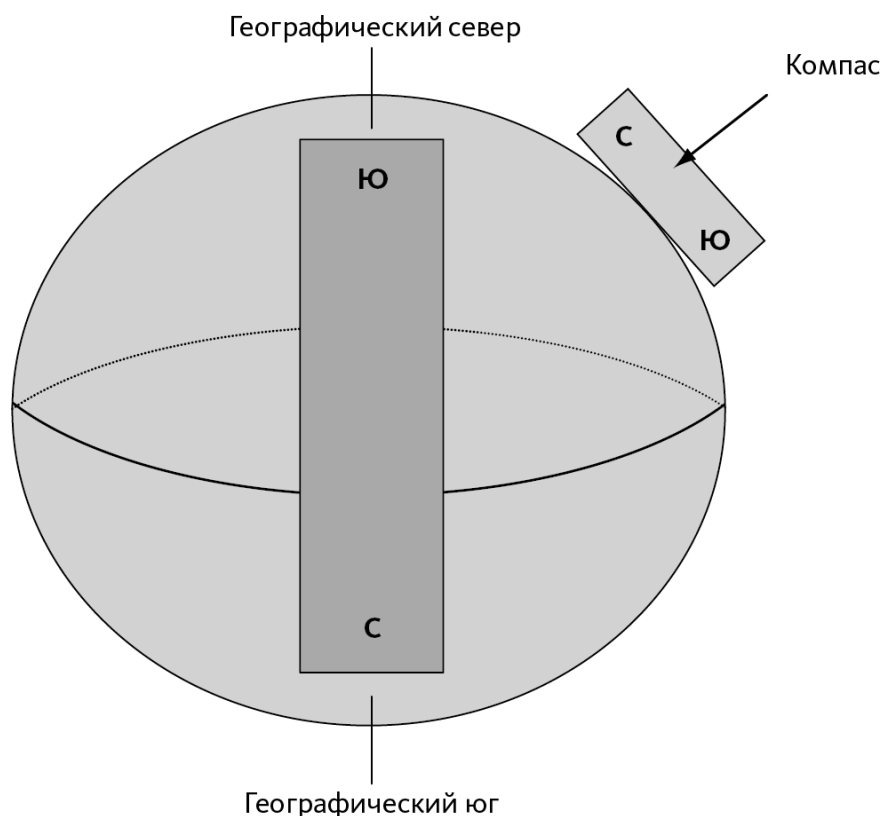


Рис. 14.2 – Земля – гигантский магнит

Магнитный север компаса притягивается магнитным югом Земли, который находится... на географическом севере.

Как мы видим, земные магнитные полюса противоположны географическим полюсам, но это связано с исторической проблемой их определений.

Как намагнитить предмет?

Для изучения электростатической силы можно наэлектризовать некоторые предметы с помощью более-менее интенсивного трения. Можно ли так же «намагнитить» какие-нибудь предметы? Можно!

Возьмите горсть железных гвоздей: они не притягиваются друг к другу, потому что не являются магнитами. Поднесите их к магниту: вы убедитесь, что он их притягивает. Гвозди нагромождаются друг на друга, прилипнув к магниту.

Когда же вы отделите массу гвоздей от магнита, что вы увидите? Что гвозди липнут друг к другу, хотя рядом магнита нет! Иными словами, гвозди сами стали маленькими магнитами.

Это объясняет, почему некоторые металлы притягиваются магнитом: потому что эти металлы сами *становятся* магнитами в присутствии другого магнита. Обычно намагниченность исчезает, когда убирают магнит. Но в случае с железными гвоздями она может длиться долго (гвозди остаются прилипшими друг к другу).

Мы видели, что Земля сама является гигантским магнитом, — это она намагнитила магнетит в далеком прошлом, чтобы сделать из него природный магнит (так же, как магнит намагничивает гвозди). В дальнейшем мы к этому вернемся.

Два неразделимых полюса

Помимо внешнего сходства, все же необходимо отметить большую разницу между «электрическими» и «магнитными» аспектами: можно создать положительно или отрицательно заряженный объект, но невозможно создать объект с «северным» или «южным полюсом». Намагниченный предмет всегда обладает сразу и северным и южным полюсом.

Возьмите магнит и разделите его, чтобы сохранить только северный полюс: обрезанный конец станет южным полюсом (→ **рис. 14.3**). Ваш магнит просто станет меньше и слабее, но противоположные полюса сохранятся.

В экспериментальном плане изучение магнетизма оказалось сложнее, чем изучение электростатической силы. По-настоящему оно началось только в XIX в.

Мы также дали понять, что магнетизм связан с движением зарядов, однако нет ничего более неподвижного, чем магнит... Следующий параграф позволит понять, в чем состоит эта связь.

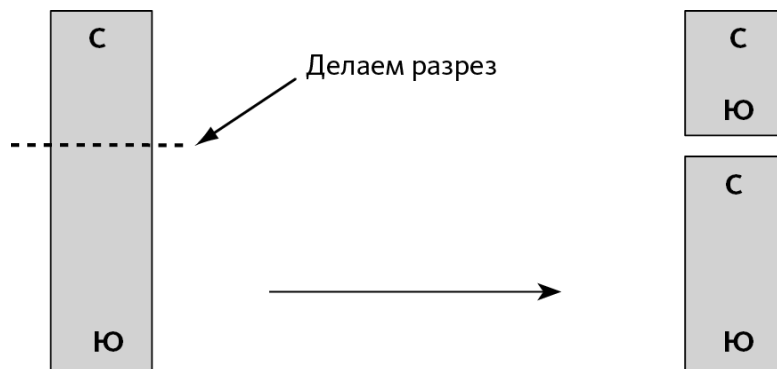


Рис. 14.3 – Намагниченный предмет всегда имеет два полюса

Заряды в движении

Заряды, создающие силу

Положим два заряженных шара друг против друга и рядом поместим компас. Поскольку шары не соединены друг с другом, компас попросту указывает на север. Это значит, что присутствие заряда не создает никакой магнитной силы: магнетизм, по всей видимости, совершенно не связан с электростатикой.

А теперь соединим шары с помощью металла: в момент прохождения электрического тока стрелка компаса резко отклоняется. Более того, если мы поменяем направление тока (поменяв

местами положительный и отрицательный шар), стрелка отклонится в противоположную сторону.

Таким образом, движение зарядов (ток) создает магнитную силу, чье направление зависит от направления перемещения зарядов. Связь между электричеством и магнетизмом становится очевидной.

Благодаря этому опыту магнитная сила выглядит результатом движения зарядов. То есть магнит, обладающий магнитной силой, должен содержать движущиеся заряды. Так ли это? Да, это так!

На самом деле внутри атомов электроны всегда находятся в движении, можно сказать, что они вращаются вокруг ядра, что они вращаются вокруг собственной оси (истина, установленная благодаря квантовой физике, немного сложнее: мы убедимся в этом в главе 24). Именно это движение электронов объясняет действие магнита. В дальнейшем мы рассмотрим эту связь подробнее.

Заряды, на которые действует сила

Проделаем новый опыт: положим подвижный металлический стержень перпендикулярно на два неподвижных металлических стержня таким образом, чтобы подвижный стержень мог по ним свободно перемещаться ($\rightarrow$ рис. 14.4.а). Поместим сильный магнит U-образной формы в свободное пространство, так чтобы подвижный стержень оказался внутри U: ничего не произойдет.

Сильно зарядим металлическую конструкцию: по-прежнему ничего не происходит. Это значит, что магнитная сила не действует на неподвижный заряженный предмет.

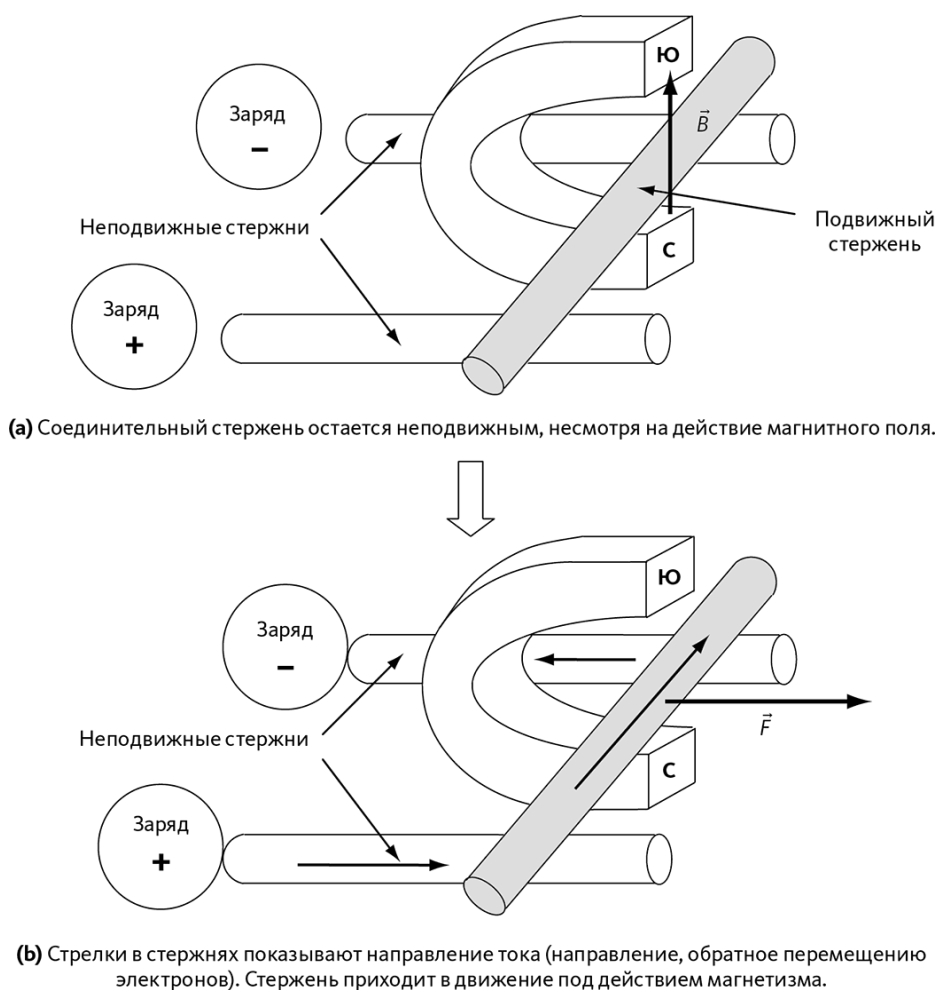


Рис. 14.4 – Сила магнита, действующая на подвижные заряды

Теперь пропустим через конструкцию электрический ток (по ней движутся электроны): это можно сделать с помощью двух заряженных шаров, соединенных с конструкцией (→ **рис. 14.4.b**). Внезапно мы видим, как стержень покатился из центра магнита. Если мы изменим направление тока, стержень, наоборот, покатится к центру магнита. Иными словами, магнитная сила действует на движущиеся заряды (здесь это свободные электроны стержня), но не на неподвижные.

Обобщение

Вывод из этих опытов следующий:

«Магнитная сила – это сила, действующая *с помощью* подвижных зарядов *на* подвижные заряды».

Неподвижный заряд не может воздействовать с помощью магнитной силы и не способен ощутить ее действие.

В конечном итоге мы понимаем, почему два магнита взаимодействуют между собой: один магнит содержит подвижные электроны в своих атомах, что позволяет магниту не только *приводить в действие* магнитную силу, но и *ощущать ее воздействие* на себе.

Однако выводы, которые мы можем из этого сделать, остаются очень абстрактными: от чего именно зависит сила магнетизма, какова ее мощность, в чем ее смысл? На эти вопросы мы постараемся ответить дальше в этой главе.

2. Магнитное поле

Природа и направление магнитного поля

Магнитное поле магнита

Рассмотрим действие неподвижного магнита. Если мы положим рядом с ним компас, его стрелка (которая сама является магнитом) отклонится. Таким образом, в любой точке пространства вокруг неподвижного магнита существует невидимое «нечто», способное заставить стрелку компаса отклониться. Это «нечто» называется магнитным полем.

То есть любой магнит создает вокруг себя магнитное поле, заполняющее все пространство: как только мы помещаем в эту область другой магнит, магнитное поле проявляет себя, заставляя магнит вращаться.

Магнитное поле представлено вектором магнитной индукции $\vec{B}$. Направление поля $\vec{B}$; условно обозначено стрелкой компаса (в данный момент неподвижной): стрелка $\vec{B}$; направлена от южного полюса к северному.

Поскольку север компаса направлен к югу магнита, отсюда следует, что поле $\vec{B}$; расходится от северного полюса магнита и сходится к южному полюсу магнита (→ **рис. 14.5**).

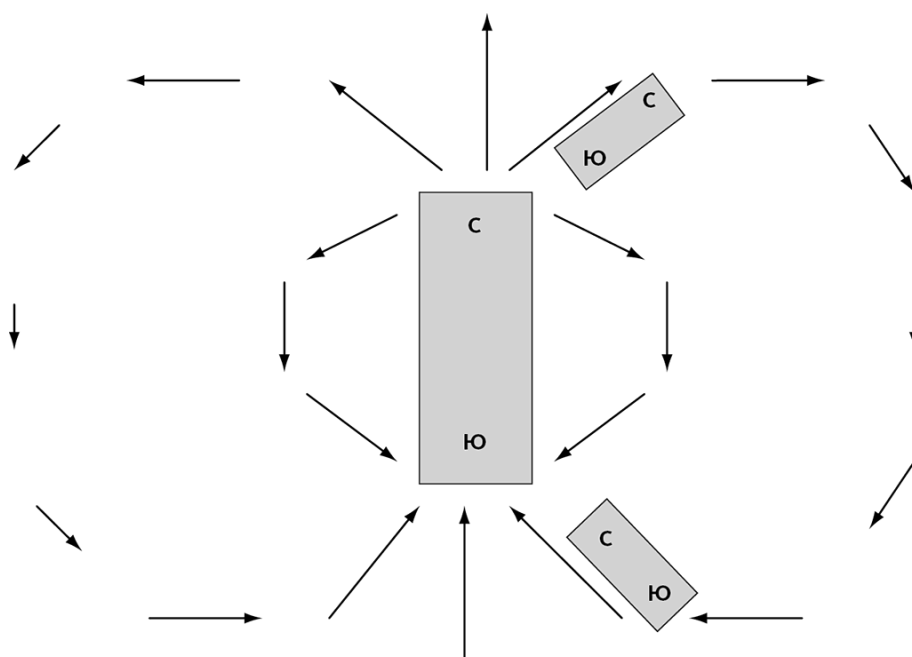


Рис. 14.5 – Магнитное поле, созданное магнитом

Стрелки на компасе ориентированы с юга на север, как мы изобразили в примере на схеме.

С одной стороны, силовые линии магнитного поля идут от северного полюса к южному. С другой стороны, его мощность уменьшается с увеличением расстояния.

Что касается силы магнитного поля, она связана с силой, которую ощутил бы подвижный заряд в этой точке (в магните подвижными зарядами являются электроны атомов). Мы поговорим об этом подробнее в параграфе 3 «Проявление магнитной силы», с..

В дальнейшем мы ограничимся воздействием неподвижных магнитов – так называемой магнитостатикой. В случае с подвижными магнитами появляются новые феномены, о которых мы поговорим в главе 17.

Магнитное поле, вызванное электрическим током

Мы видели, что только подвижные заряды способны проявлять магнитную силу: чтобы уточнить, от чего зависит магнитное поле, рассмотрим действие электрического провода, по которому проходит мощный электроток. В нем содержится множество подвижных зарядов (свободные электроны проводника).

Начнем с простого прямолинейного провода и поместим рядом магнит: стрелка компаса расположена перпендикулярно проводу (то есть перпендикулярно направлению перемещения электронов). Направление компаса также перпендикулярно прямой, соединяющей подвижный заряд и компас (→ **рис. 14.6**).

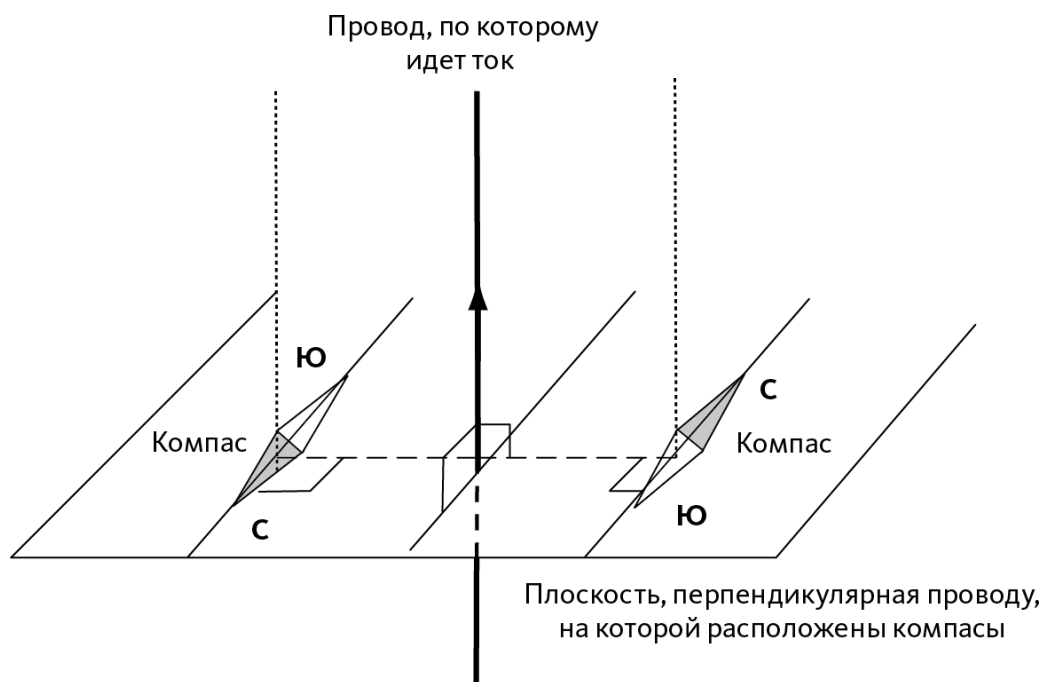


Рис. 14.6 – Магнитное поле, созданное прямолинейным током

Направление магнитного поля одновременно перпендикулярно проводу и прямой (пунктир), соединяющей компас и провод.

Кроме того, если мы изменим направление тока, направление стрелки компаса тоже изменится. Наконец, если мы поместим компас с другой стороны провода, стрелка будет указывать в противоположном направлении.

Направление магнитного поля довольно трудно определить. Чтобы это сделать, можно воспользоваться так называемым правилом трех пальцев, которое задействует три пальца вашей *правой* руки (только не левой, результат будет обратный!):

- положите правую руку на провод. Вытяните большой палец в направлении движения тока (противоположное движению электронов).
- Одновременно вытяните указательный палец в сторону компаса.
- Вытяните средний палец перпендикулярно указательному: он показывает направление магнитного поля на уровне компаса, вызванное электротоком, над которым находится ваша рука.

Вы можете использовать этот прием, чтобы определить направление магнитного поля на **рис. 14.6...**

Связь между магнитом и подвижными зарядами

Вращение электронов

А теперь скрутим наш провод так, чтобы получился почти круг: у нас получился один виток спирали (→ **рис. 14.7.а**). Используйте правило трех пальцев – так вы сможете определить, что магнитное поле в центре витка направлено по его оси. Если мы поместим компас перед кольцом, его южный полюс укажет на кольцо. Если мы положим его позади кольца, на него укажет северный полюс компаса. В итоге мы видим, что кольцо ведет себя точно так же, как магнит, у которого сзади южный полюс, а спереди северный (→ **рис. 14.7.б**).

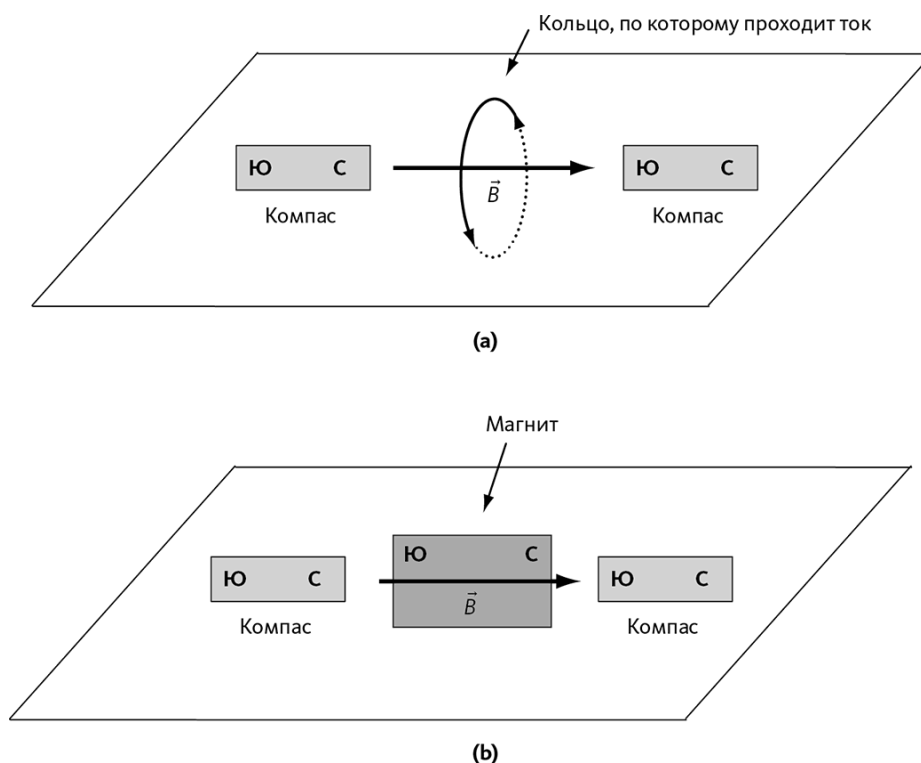


Рис. 14.7 – Магнитное поле, созданное кольцевым проводом и магнитом

Есть ли внутри магнита кольца? Да, есть! Вращаясь вокруг ядра атомов, электроны магнита описывают круг. То же самое происходит, когда электроны вращаются вокруг своей оси. То есть каждый атом магнита ведет себя как кольцо.

Почему же в таком случае не все вещества являются магнитами? На это есть две причины: мы объясним это, сделав обзор трех основных типов веществ.

Диамагнитные вещества

Первая причина состоит в том, что атомы содержат множество «вращающихся» электронов. Между тем в некоторых атомах есть электроны, вращающиеся как в одну, так и в другую сторону (это явление позволяет понять квантовая физика). Магнитное воздействие электронов в этом случае попарно нейтрализуется: магнитное поле возникнуть не может. То есть вещество, состоящее из таких атомов, не может намагнититься. Такое вещество называют диамагнитным.

Парамагнитные вещества

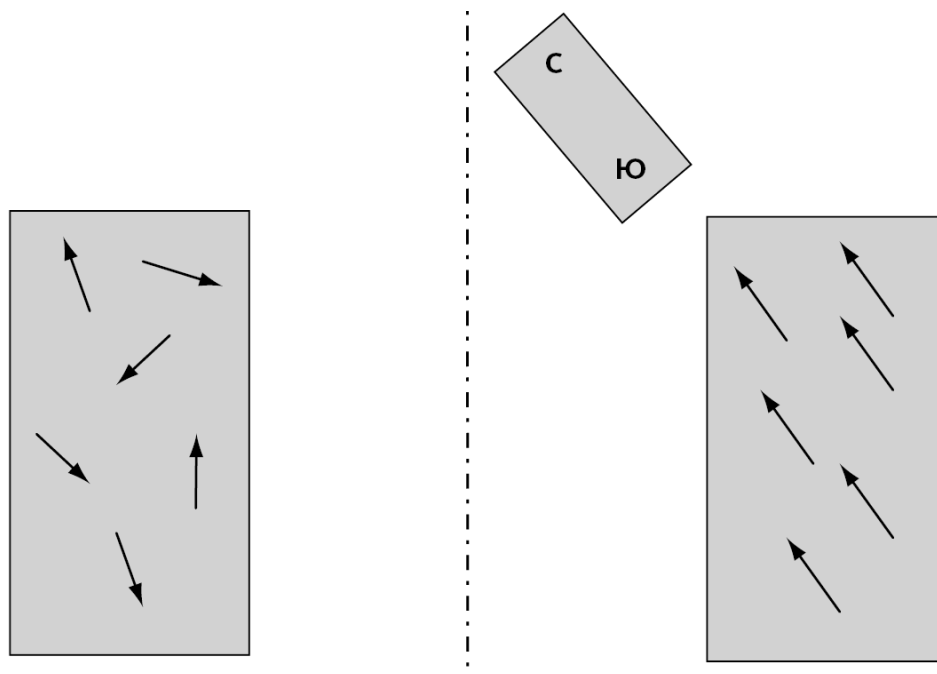
Большинство веществ, не являющихся диамагнетиками, являются парамагнетиками: они обладают атомами, которые создают магнитное поле благодаря вращению электронов. Но электроны вращаются вокруг ядра хаотично... В итоге некоторые атомы создают магнитное поле, направленное в одну сторону, другие создают поле, направленное в противоположную сторону. В целом магнитные свойства всех атомов уравниваются, и общее магнитное поле равно нулю (→ рис. 14.8.а).

Таким образом, в крупном масштабе мы имеем тот же вывод, что и с диамагнитным веществом.

Но поместим теперь парамагнитное вещество рядом с южным полюсом магнита: каждый атом вещества ведет себя как маленький магнит, который будет вращаться, чтобы повернуться своим северным полюсом к южному полюсу магнита. В итоге все «кольца», сформированные

атомами, окажутся повернутыми в одну сторону (→ **рис. 14.8.b**). На этот раз магнитные поля, созданные каждым атомом, складываются, вместо того чтобы уравниваться: общее магнитное поле оказывается довольно сильным. Рядом с магнитом вещество тоже превратилось в магнит. Об этом мы уже говорили, когда речь шла о некоторых металлах.

Такое свойство намагничиваться, разумеется, невозможно для диамагнитного вещества.



(a) Каждый атом создает магнитное поле разного направления.

(b) Магнитное поле всех атомов направлено в сторону южного полюса магнита.

Рис. 14.8 – Намагничивание парамагнитного вещества

Каждая стрелка представляет магнитное поле, созданное атомом вещества, которое ведет себя как маленькое кольцо.

Ферромагнитные вещества

Что происходит, когда мы снова убираем магнит? Бесперывные столкновения атомов быстро перенаправляют кольца во все стороны (особенно при повышенной температуре): вещество быстро теряет намагниченность, приобретенную в присутствии магнита. Однако в некоторых веществах (таких как магнетит!) направление колец очень сложно изменить, и намагниченность сохраняется: мы создали «постоянный магнит».

Вещества, способные удерживать намагниченность, называются ферромагнитными. Эти вещества также имеют свойство намагничивать друг друга сильнее, чем парамагнетики, особенно это касается железа.

Различия парамагнетиков и ферромагнетиков на микроуровне довольно сложны, и мы не будем подробно их здесь рассматривать.

3. Проявление магнитной силы

Мощность и направление силы

Опыт

Чтобы понаблюдать действие магнитной силы, необходимо использовать подвижные заряды. Такие заряды должны обладать чрезвычайно слабой инерцией (=массой), чтобы их траектория значительно изменилась под действием магнитной силы. Лучше всего использовать электроны,

которые оторвутся от металла при сильном нагреве. Затем следует направить их в вакуумный колокол, чтобы воздух не мешал их движению.

Остается визуализировать траекторию электронов. Это можно сделать, оставив в вакуумном колоколе немного газа со слабым давлением. При прохождении электронов атомы газа приобретают немного их энергии и возвращают ее в виде света (это будет объяснено в части, посвященной излучениям). Таким образом, свет будет возникать по всей траектории движения электронов и позволит сразу ее визуализировать.

При отсутствии магнита траектория прямолинейна: действие тяжести слишком мало, чтобы заставить электроны «упасть», учитывая быстроту их прохождения в вакуумном колоколе.

Теперь приблизим магнит, как показано на **рис. 14.9**. Далее можно наблюдать следующее:

- Если мы направим магнитное поле в сторону траектории электронов, она не будет изменена (никакого отклонения или ускорения) (**→ рис. 14.9.а**).

- Если мы направим магнитное поле перпендикулярно траектории, она изменится и перестанет быть прямолинейной. Сила, действующая на электроны, одновременно перпендикулярна траектории (скорость остается постоянной) и перпендикулярна магнитному полю (**→ рис. 14.9.б**). Более того, если мы повернем магнит так, чтобы изменить направление магнитного поля, сила будет направлена в другую сторону.

- Сила оказывается пропорциональна скорости электронов.

- Если заменить электроны другими частицами, окажется, что сила пропорциональна их заряду. Более того, положительный заряд отклоняется в противоположную сторону относительно отрицательного.

- Наконец, если магнит более мощный, сила, действующая на электроны, также более мощная. Если точнее, магнитная сила пропорциональна магнитному полю, созданному магнитом (по природе самого поля).

Вывод

Обозначим v скорость заряженных частиц, q – их заряд, индукцию магнитного поля B и α – угол между траекторией и магнитным полем. В этом случае сила будет выражена следующим образом:

$$F = qvB \sin \beta \text{ (это называется силой Лоренца)}$$

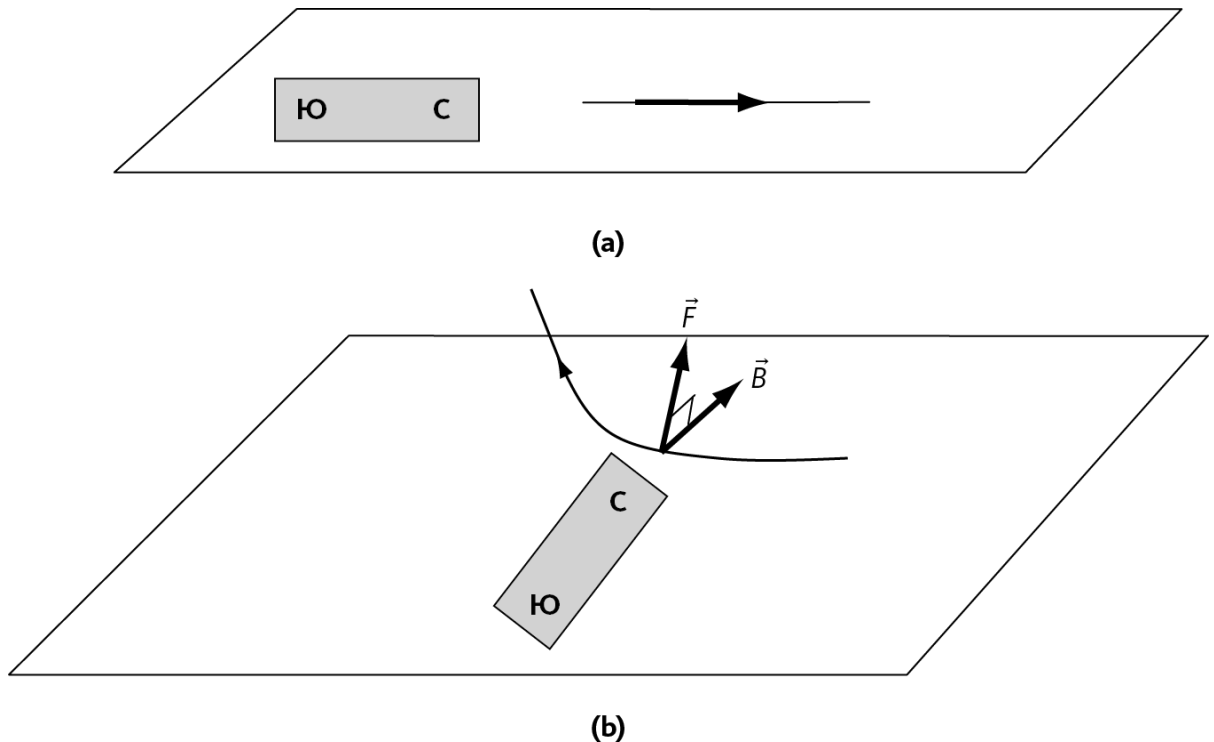


Рис. 14.9 – Магнитная сила, действующая на электрон

(а) поле, возникающее от близости магнита, направлено по траектории: никакая сила не воздействует.

(b) поле перпендикулярно траектории, сила при этом максимальна. Она одновременно перпендикулярна траектории и магнитному полю.

Итак, мы имеем нулевую силу при нулевом угле α (поле и траектория параллельны) и максимальную силу при угле $\alpha = 90^\circ$ (поле и траектория перпендикулярны).

Кроме того, мы видели, что магнитная сила действует перпендикулярно на траекторию и магнитное поле. Это оставляет силе два возможных направления, которые зависят от знака заряда. Чтобы определить это направление, вы можете снова использовать правило трех пальцев (пользуясь только правой рукой!):

- вытяните большой палец над проводом по направлению траектории;
- одновременно вытяните указательный палец по направлению магнитного поля;
- и наконец, поставьте средний палец перпендикулярно указательному: он показывает направление силы, если заряд положительный, и противоположное направление, если заряд отрицательный (в случае с электронами).

Пользуясь этим правилом, вы также можете определить направление силы на **рис. 14.9**.

Таким образом, мы имеем дело с довольно «мудреной» силой... Гравитация и электростатическая сила были притягивающими или отталкивающими: масса или заряд притягивали или отталкивали другие частицы. В то время как сила магнита, воздействующая на движущийся заряд, не является ни отталкивающей, ни притягивающей, ее направление выглядит не связанным с присутствием магнита, потому что она перпендикулярна направлению магнита.

Почему же в таком случае два магнита притягиваются? На этот вопрос мы постараемся ответить в следующей главе.

С точки зрения энергии мы можем констатировать одну интересную вещь: будучи перпендикулярной траектории, магнитная сила *никогда* не меняет скорость частиц. Иными словами, она ни в коем случае не может изменить кинетическую энергию: магнитная сила «не работает», она не оказывает никакого влияния на окружающую среду в плане энергии.

Напряженность магнитного поля

Опыты

При том проявлении силы, которого мы добились, возникает магнитное поле B . Мы говорили, что оно зависит от «мощности магнита», но это понятие остается расплывчатым: от чего именно зависит магнитное поле? Чтобы ответить на этот вопрос, обратим теперь наше внимание на заряды, которые *создают* силу, а не на те, на которые она воздействует.

Заменим магнит неподвижным кольцом. Мы убедились, что с точки зрения магнетизма это абсолютно одно и то же. Можно сделать два очень простых вывода:

- магнитное поле пропорционально силе тока I , проходящего по кольцу;
- магнитное поле обратно пропорционально квадрату расстояния R .

Существует третий параметр, влияющий на магнитное поле. Чтобы его выявить, нам понадобится электрический ток, проходящий по небольшому участку прямого провода. Мы можем получить его, соединив прямым проводом два заряженных шара.

Мы видим, что на оси провода магнитная сила равна нулю (стрелка компаса не отклонилась бы). Чем больше мы увеличиваем угол с осью провода, тем больше магнитная сила. Она становится максимальной в точке, расположенной на прямой, перпендикулярной оси провода (→ **рис. 14.10**).

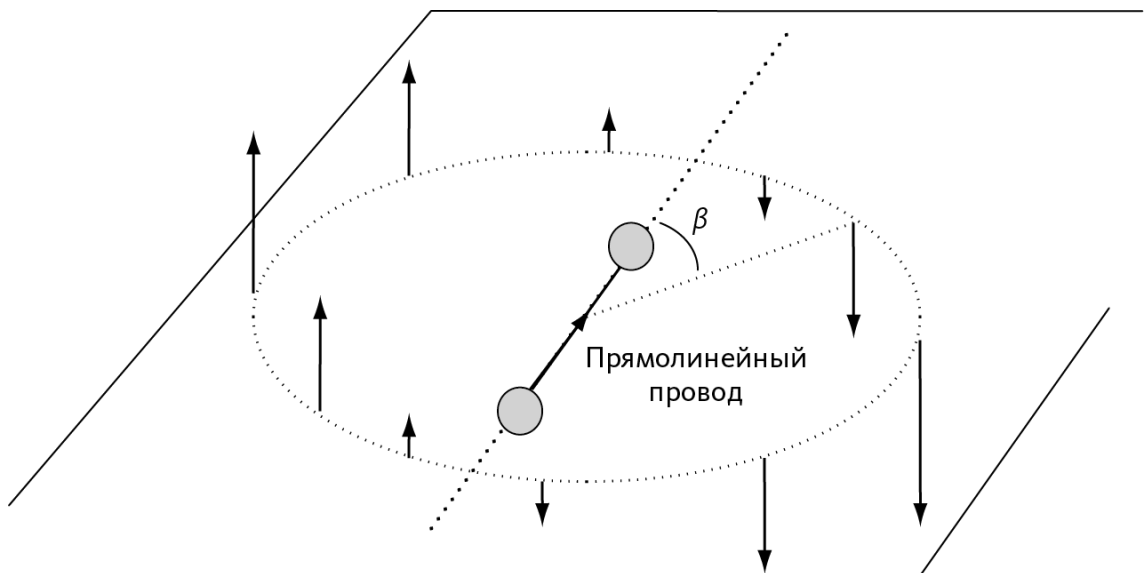


Рис. 14.10 – Магнитное поле, созданное прямолинейным током

Стрелки представляют магнитное поле, созданное прямолинейным током в разных точках пространства. Видно, что чем ближе мы к оси провода, тем слабее сила (на том же расстоянии от провода).

Если точнее, магнитное поле пропорционально $\sin \beta$ угла между осью провода и прямой, проходящей через заданную точку.

Вывод

Таким образом, магнитное поле выражается:

$$B = k \frac{I \sin \alpha}{R^2}$$

k здесь простой коэффициент пропорциональности. По причинам, которые мы здесь опустим, его обычно записывают в виде $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$, μ_0 называется магнитной проницаемостью вакуума, или магнитной

постоянной (такая же, как G и ε_0 , по отношению к гравитации и электростатической силе соответственно).



КАТУШКИ И СОЛЕНОИДЫ

Провод, свернутый кольцом, позволяет воспроизвести магнитное поле, созданное магнитом. Между тем магнитное поле пропорционально силе тока, который его создает: проблема в том, что ток должен быть сильным, чтобы создать мощное магнитное поле...

Хитрость состоит в том, чтобы скрутить провод по кругу несколько раз, чтобы кольца наложились друг на друга. Таким образом, если мы создадим катушку в 10 скрученных колец, получится единое кольцо, по которому проходит десятикратно усиленный ток.

Такое скопление колец называется катушкой: это простейшее средство создать относительно мощное магнитное поле.

Вместо того чтобы наматывать кольца друг на друга, можно повторять их на расстоянии вдоль цилиндра, такая конструкция называется «соленоид». Можно продемонстрировать, что

магнитное поле в центре соленоида одинаково во всех точках. Создание однородного магнитного поля – один из главных принципов соленоида.

4. Выводы: действие магнитной силы

Свойства магнитной силы могут показаться довольно сложными и совсем нелогичными. Это абсолютно идет вразрез с замечательной простотой гравитации и электростатической силы. Кроме того, похоже, между гравитацией и электростатикой больше сходства, чем между электростатикой и магнетизмом...

Пусть читатель не волнуется: теория относительности (которую мы рассмотрим в главе 26) дает чрезвычайно простое и единое представление об электромагнитной силе. Магнитные свойства, которые сейчас кажутся такими сложными, предстанут логичным проявлением электростатической силы.

Таким образом, в привычном для нас масштабе электростатической силы и гравитации будет достаточно, чтобы все объяснить. А пока свойства магнетизма по-прежнему остаются очень важными для понимания некоторых явлений в масштабе планеты Земля (глава 16), в электричестве (главы 17 и 18) и для всего, что касается света (см. часть, посвященную оптике).

Выше мы говорили, что подвижные заряды создают магнитное поле в каждой точке пространства, магнитная сила которого воздействует на другие подвижные заряды. Представление о магнитном поле, в частности, помогло понять действие магнитов. Но использование этого посредника немного мешает разобраться в прямом взаимодействии между подвижными зарядами под действием магнитной силы.

Итак, подведем итоги, не используя больше понятие магнитного поля: магнитная сила тем мощнее, когда сильный ток (большой заряд и большая скорость) находится близко к другому сильному току. Аналогично электростатическая сила тем мощнее, чем одни сильные заряды ближе к другим сильным зарядам. Кроме того, магнитная сила зависит от направления взаимодействующих токов. **Рис. 14.11** и **14.12** позволяют синтезировать множество различных геометрических конфигураций.

Мы видим некоторое природное притяжение токов, движущихся в одном направлении... Помимо сложности магнитной силы, которая явно прослеживается на схемах, это любопытное систематическое свойство заставляет задуматься: теория относительности поможет понять глубокое единство, которое здесь ощущается...

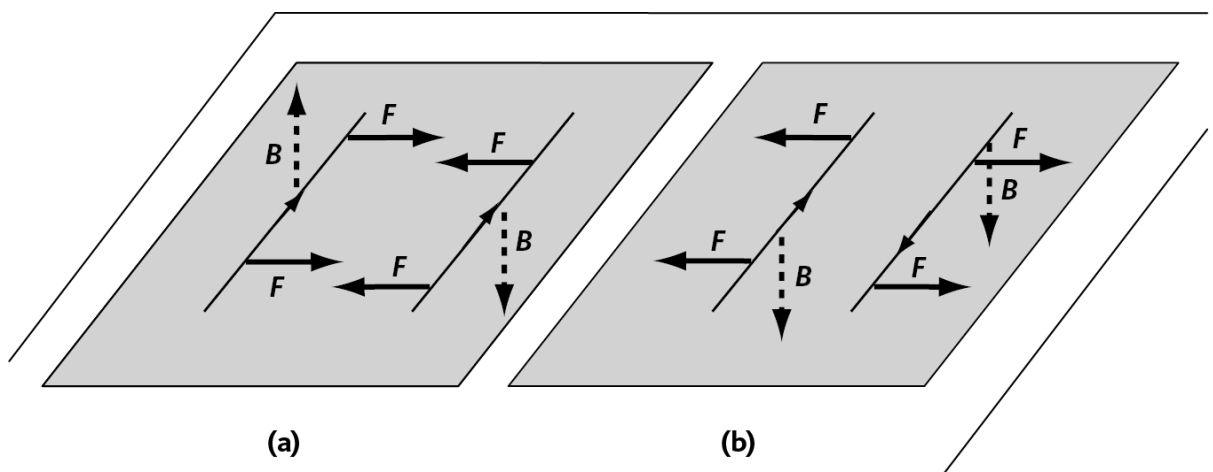


Рис. 14.11 – Взаимодействие двух параллельных проводов под электрическим током

Направление тока обозначено на проводах. Широкие стрелки означают действующую магнитную силу. Пунктирные стрелки представляют магнитное поле. Читатель может определить все эти направления с помощью правила трех пальцев. (a) – параллельные провода, по которым ток идет в одну сторону, притягиваются. (b) – параллельные провода, по которым ток идет в разных направлениях, отталкиваются.

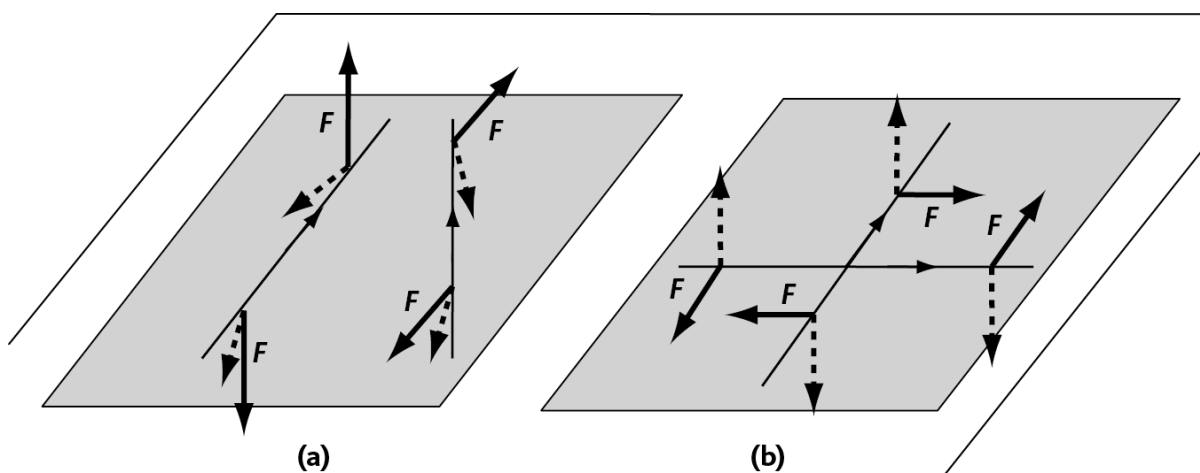


Рис. 14.12 – Взаимодействие перпендикулярных проводов, по которым движется ток (a) и (b) – магнитная сила стремится заставить провода вращаться, чтобы они были направлены в одну сторону.

Кроме того, на рис. 14.11 мы видели, что два тока, направленные в одну сторону, притягиваются, тогда как два тока, идущие в противоположные стороны, отталкиваются.

В конечном итоге мы констатируем, что во всех приведенных случаях ток «хочет» перемещаться в одном направлении.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Магнитная сила возникает под действием подвижных зарядов на подвижные заряды. Она пропорциональна скорости этих зарядов.
- Максимальная магнитная сила направлена перпендикулярно току, который ее создает. Она перпендикулярна траектории частиц, на которые воздействует, то есть в любом случае меняет их траекторию.
- Ток создает магнитное поле в любой точке пространства, которое может проявить себя в виде магнитной силы в присутствии движущегося заряда.
- Земля создает магнитное поле, которое заставляет вращаться магниты всегда в одном направлении. Таким образом, можно различить северный и южный полюса магнита: так, в частности, устроен компас (простой вращающийся магнит).
- Согласно определению, магнитное поле ориентировано от южного к северному полюсу компаса, помещенного в определенную точку.
- Некоторые атомы создают магнитное поле из-за вращения электронов вокруг ядра и вокруг своей оси. Такие вещества называют парамагнетиками. В присутствии внешнего магнитного поля магнитные поля этих атомов поворачиваются в том же направлении, и вещество становится намагниченным.
- Чаще всего столкновения атомов гасят намагниченность вещества, когда исчезает внешнее магнитное поле. Намагниченность сохраняется лишь у некоторых веществ, называемых ферромагнетиками: так создаются постоянные магниты.

15. Способы применения магнитостатики

В продолжение предыдущей главы мы рассмотрим некоторое применение магнитной силы. В частности, мы более детально остановимся на магнитном поле земли и его последствиях: намагничивании пород, радиационных поясах, северном сиянии, роли в развитии жизни... Мы также опишем отдельные технические устройства: электромотор и магнитный тормоз.

1. Взаимодействие двух магнитов

Магнитная сила ни в коем случае не может изменить скорость частицы, то есть ее энергию. Она всегда перпендикулярна направлению движения, то есть не является ни притягивающей, ни отталкивающей. Однако два магнита отталкиваются друг от друга (если повернуты разными полюсами). Создается впечатление, что магниты приобретают кинетическую энергию. Как такое возможно?

Чтобы ответить на это, для начала вспомним, что происходит внутри магнита: магнитное поле, вызванное движением электронов в их атомах, которые создают как бы маленькие кольца. Направление этих колец обозначено на **рис. 15.1**: направление тока таково, чтобы магнитное поле было ориентировано от южного полюса магнита к северному (как внутри катушки). Правило трех пальцев позволяет понять направление тока, указанное на **рис. 15.1**.

В свою очередь, на **рис. 15.2.а** изображено *внешнее* магнитное поле, созданное магнитом (светлый прямоугольник) в различных точках пространства. Мы снова видим, что магнитное поле расходится к северному полюсу (и сходится к южному).

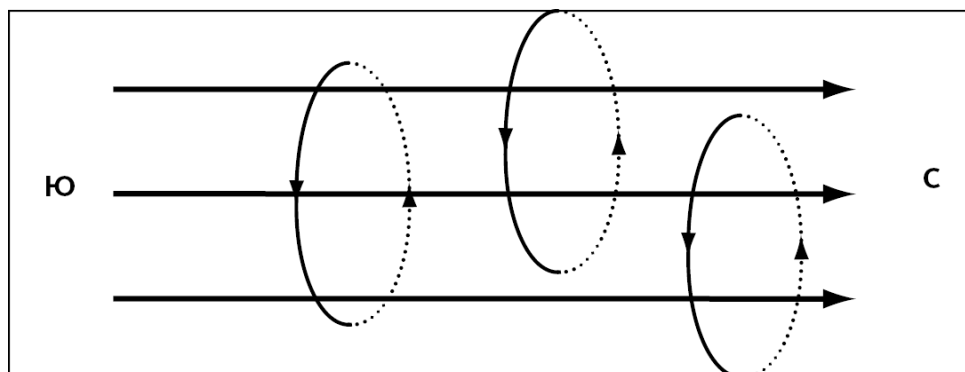


Рис. 15.1 – Направление колец в магните

Кольца соответствуют движению «вращения» электронов в атомах. На схеме показано направление тока: то есть электроны вращаются в обратном направлении.

Магнитное поле внутри магнита, вызванное этими кольцами, представлено на схеме прямыми стрелками: оно однородно в любой точке магнита, как внутри соленоида.

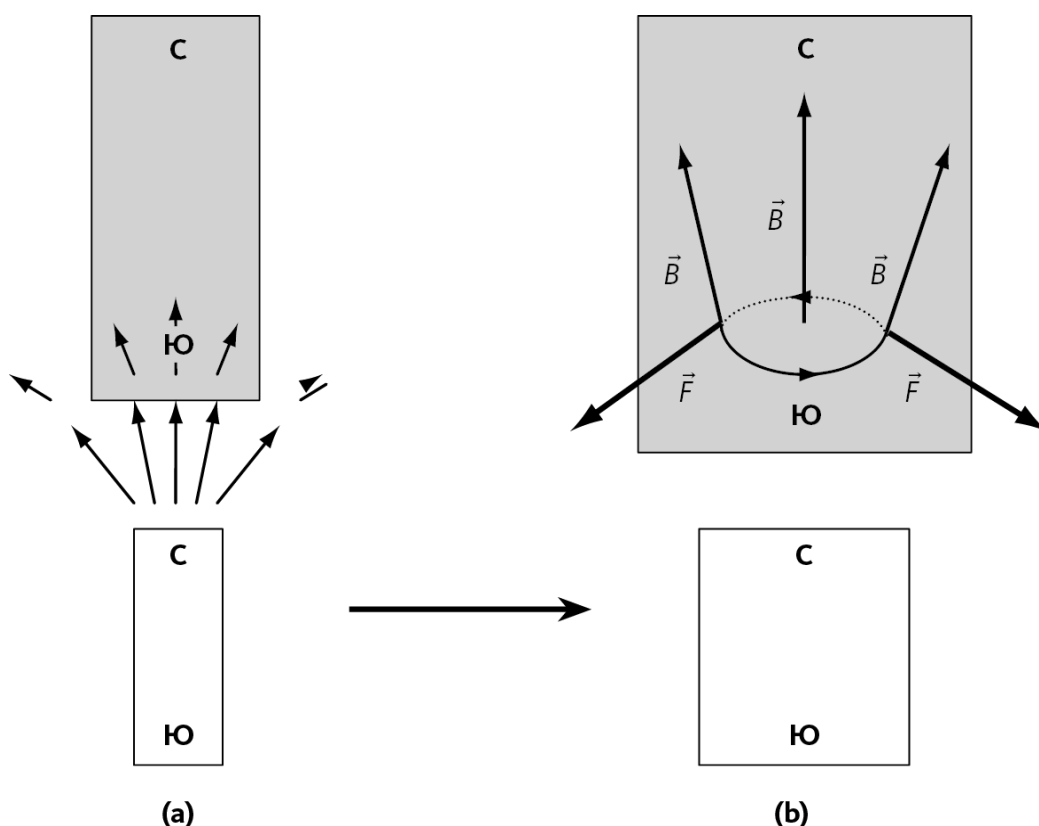


Рис. 15.2 – Сила взаимодействия между двумя магнитами

(а) – стрелки изображают магнитное поле, созданное светлым магнитом.

(b) – мы увеличили масштаб, чтобы видеть, что происходит в темном магните. Магнитное поле светлого магнита порождает магнитную силу на каждом кольце темного магнита. Эта сила стремится не только разбить кольцо, но и притянуть его к светлomu магниту.

Подчеркнем, что, как и на **рис. 15.1**, направление кольца соответствует направлению тока, а не электронов.

Мы также поместили там другой магнит (темный прямоугольник), расположенный южным полюсом в сторону северного полюса светлого магнита (→ **рис. 15.2.a**). Мы видим, что магнитное поле, созданное светлым магнитом, не везде направлено в одну сторону внутри темного магнита: оно стремится удалиться от центральной оси и приблизиться к боковым граням.

Чтобы лучше понять, что за этим следует, мы увеличили масштаб внутренности темного магнита (→ **рис. 15.2.b**). На нем мы изобразили «кольцо» в соответствии с направлением, указанным на **рис. 15.1**.

Магнитная сила, действующая на электрон атома темного магнита, одновременно перпендикулярна его движению и магнитному полю. Правило трех пальцев, примененное на **рис. 15.2**, позволяет сделать вывод, что она в основном стремится разбить кольцо; но это действие магнитной силы остается без последствий, потому что электрон надежно «прикреплен» к ядру с помощью электростатической силы.

Гораздо интереснее то, что, как мы видим, магнитная сила также слегка отклоняется в сторону светлого магнита. Таким образом, кольцо притягивается светлым магнитом. Рассуждения аналогичны для всех колец темного магнита, то есть для всех атомов темного магнита: светлый магнит притягивает темный.

Мы видим, что это результат отклонения магнитного поля, созданного светлым магнитом. Однородное магнитное поле не создало бы притягивающей силы: фактом является то, что его направление в пространстве меняется, что влечет появление притягивающей силы.

Также, если мы приблизим северный полюс темного магнита к северному полюсу светлого магнита, будет легко убедиться в том, что они отталкиваются. На **рис. 15.2.b** ток в кольцах будет направлен в другую сторону, потому что темный магнит был «перевернут», то есть магнитная сила той же мощности была бы направлена в противоположную сторону. В этой ситуации магнитная сила стремится «сузить» кольцо (вместо того чтобы его «разорвать»), отдаляя его от светлого магнита (вместо того чтобы притягивать).

Таким образом, мы видим, что все наблюдения за взаимодействием магнитов могут быть объяснены благодаря микроскопическому движению электронов в их атомах.

Но вопрос, который мы задали в начале этого параграфа, так и остается без ответа: каким образом сила, которая «не работает», может придавать кинетическую энергию темному магниту (притягивая его к светлomu)?

На **рис. 15.2** мы видим, что магнитная сила только стремится отклонить электроны атомов, не меняя их скорости. Но тут вмешивается другая сила: электростатическая сила, которая не дает электронам удалиться от ядра. Между тем сама электростатическая сила способна придать кинетической энергии зарядам. Таким образом, магнитная сила действует на электроны и атомы, которые затем с помощью электростатической силы действуют на атомные ядра, ускоряя их в сторону светлого магнита. В конечном итоге во время взаимодействия магнитов мы видим, что электростатическая сила играет такую же большую роль, как и магнитная сила.

2. Магнитное поле земли

Динамо-эффект

Самым большим магнитом, который нас окружает, является сама Земля. Ее воздействие может показаться очень слабым, потому что самый мелкий магнит может отклонить стрелку компаса от направления на север. Но не будем забывать, что магнитное поле уменьшается

пропорционально квадрату расстояния: магнит, отклоняющий стрелку компаса на расстоянии 10 см, не такой уж мощный, учитывая, что источник магнитного поля Земли находится гораздо дальше, за тысячи километров под нашими ногами...

Явления, лежащие в основе магнитного поля Земли, были поняты совсем недавно и пока еще не до конца. Эти процессы по-настоящему сложны, и здесь мы ограничимся лишь ключевыми идеями.

Принцип

Первая великая идея состоит в том, что это поле наверняка является результатом движения заряженных частиц. Между тем в изолированном веществе электроны остаются привязанными к ядру, и передвигаются атомы целиком. Поскольку атомы являются нейтральными, магнитное поле возникнуть не может.

Таким образом, только вещество-проводник, в котором движение отрицательных зарядов отдельно от движения положительных зарядов, может стоять у истоков магнитного поля Земли. На практике речь идет о сплавах железа и никеля, присутствующих в ядре.

Вторая великая идея состоит в том, что движение зарядов вызывает появление магнитного поля, которое, в свою очередь, усиливает движение этих зарядов, усиливая магнитное поле, и так далее... В каком-то смысле магнитное поле и возникающий электроток подпитывают друг друга – это называется динамо-эффектом.

Рис. 15.3 позволяет составить общее представление о принципе динамо-эффекта. Раскрутим диск проводника в рождающемся магнитном поле, направленном по оси этого диска. Свободные электроны, будучи в движении под действием вращения диска, ощущают воздействие магнитной силы, которая толкает их к центру диска. Таким образом, мы создали ток, направленный к внешней части диска (→ **рис. 15.3.а**).

Теперь хитрость в том, чтобы заставить ток двигаться по проводу, намотанному под вращающимся диском. Мы таким образом создали кольцо, которое создает магнитное поле. Оно ориентировано точно в сторону первоначального магнитного поля, что усиливает его (→ **рис. 15.3.б**). С увеличением магнитного поля усиливается созданный ток, который усиливает новое магнитное поле. На практике достаточно первоначального маленького магнитного поля (результат простого возмущения среды), чтобы оно подпитало само себя и стало больше.

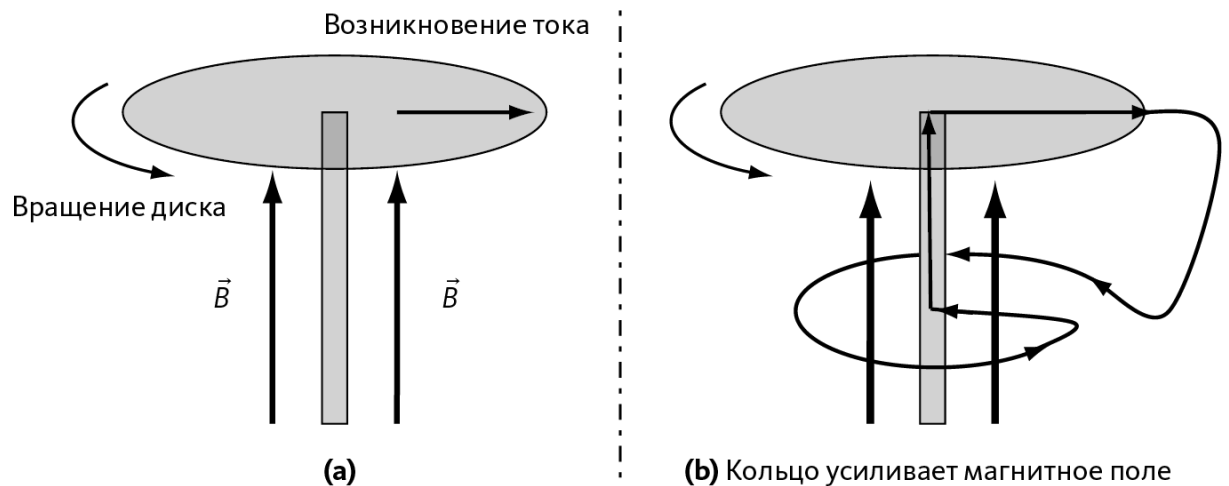


Рис. 15.3 – Динамо-эффект

(а) – вращение диска проводника, погруженного в магнитное поле, приводит к возникновению тока.

(б) – ток проходит по затейливому пути, созданному электропроводом, формируя кольцо, окружающее ось вращения. Магнитное поле, созданное этим кольцом, усиливает первоначальное поле, что усиливает ток, и так далее...

Конечно, в случае с Землей еще нужно, чтобы ток пошел по сложному пути, изображенному на **рис. 15.3**. Внутри Земли это возможно, только если там происходят сложные конвекционные процессы, то есть вещество должно быть жидким, каким и является внешнее ядро Земли. На практике конвекция порождается разницей температур ядра, сложность этому процессу придают сила Кориолиса и сила трения.

В итоге движение зарядов внутри вещества-проводника, которое само перемещается довольно сложным образом, образует магнитное поле и способно к самоподпитке. Как мы видели, Земля ведет себя как магнит, чей южный магнитный полюс находится на географическом севере.

Попутно заметим, что магнитные полюса не соответствуют полюсам географическим: например, южный магнитный полюс находится в Канаде, а не в Северном Ледовитом океане. Более того, из истории Земли мы знаем, что магнитное поле часто менялось случайным образом (северный магнитный полюс оказывался на географическом северном полюсе).

Такое непостоянство связано с нестабильностью динамо-эффекта: в этом механизме одно простое возмущение может создать магнитное поле, направленное в ту или в другую сторону. Учитывая сложность данных явлений, мы пока не способны предвидеть, сколько времени пройдет до следующей перемены.

Выводы

Подведем итоги. Чтобы у планеты было магнитное поле, необходимы три условия:

- Ее ядро должно содержать вещества-проводники. Это условие неизменно подтверждается практикой, потому что металлы-проводники – тяжелые элементы, которые во время формирования планеты стремятся погрузиться в ее центр под действием гравитации.
- Планета должна достаточно быстро вращаться вокруг своей оси подобно диску на **рис. 15.3**. Именно по этой причине Венера (которая почти не вращается вокруг своей оси) магнитным полем не обладает.
- У планеты должно быть жидкое ядро. На практике это жидкое состояние обусловлено распадом радиоактивных элементов (мы поговорим об этом в главе 27).

Чем крупнее планета, тем сильнее связь между ее объемом и поверхностью: меньшие пропорции ее внутренней энергии в этом случае рассеяны в космосе. По этой причине Марс, который меньше Земли, больше не обладает общим магнитным полем: у него больше нет достаточной внутренней энергии, чтобы поддерживать ядро в жидком состоянии.

Кроме того, радиоактивность с течением времени уменьшается: на заре существования Солнечной системы радиоактивность была достаточной, чтобы создать жидкую сердцевину даже у Марса. То есть в свои юные годы эта планета тоже обладала магнитным полем.

Намагниченность руд

Роль температуры

Мы видели, что в присутствии магнитного поля некоторые вещества могут намагничиваться, то есть некоторые руды приобретают магнитные свойства в присутствии магнитного поля Земли. На практике их северный полюс обращен в сторону южного магнитного полюса Земли, то есть к географическому северу.

И все-таки этого недостаточно для создания постоянного магнита: необходимо, чтобы намагниченность «зафиксировалась». На самом деле в магните «северный полюс» не обязательно обращен к географическому северу. Он «заморожен» в веществе, куда бы ни был направлен магнит. Это обусловлено тем, что в данном типе вещества «кольца» не могут легко поменять направление.

В связи с этим возникает вопрос: каким образом такая руда, как магнетит, может приобретать магнитные свойства, если ее кольца так трудно расшевелить? Слабое магнитное поле Земли было бы не способно повернуть их все в одном направлении, чтобы сделать из них магнит.

Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что направление колец меняется от столкновения атомов вещества. Между тем чем выше температура, тем больше у столкновений энергии, необходимой для переориентации колец.

Если точнее, некоторые вещества (в частности, с содержанием железа) претерпевают настоящую «смену состояния» при определенной температуре, называемой «температурой Кюри»: если температура выше этой точки, кольца сами меняются направление от интенсивных столкновений атомов, и вещество становится парамагнитным. Тогда вещество намагничивается в присутствии магнита, но теряет магнитные свойства, если магнит удаляется (глава 15).

Зато при температуре ниже температуры Кюри кольца сохраняют свое новое направление: вещество становится ферромагнитным.

Руды, рассказывающие историю Землю

Итак, вот что произошло: в истории Земли вулканы извергли очень горячую лаву, содержащую железо. В присутствии магнитного поля Земли и благодаря высокой температуре эти лавы приобрели магнитные свойства. Затем они остыли, и их намагниченность «зафиксировалась»: они стали постоянными магнитами. Таково происхождение магнетита, очень давно открытого греками. Этот процесс продолжается и сейчас благодаря вулканической деятельности.

Эти руды интересны тем, что они сохранили память о магнитном поле, проходившем по Земле. Если с тех пор они не подверглись деформации, то они указывают на то, как было расположено магнитное поле в течение формирования Земли.

На практике дно океана дает нам ценнейшую информацию: оно сформировано на горных краях посреди океана и понемногу перемещается в сторону зон субдукции (погружения одних литосферных плит под другие). Так чем дальше от горных краев, тем старше Земля, тем дальше мы уходим в прошлое. Таким образом, можно составить подробную карту истории магнитного поля Земли: именно благодаря ей мы смогли узнать о многочисленных изменениях магнитного поля, происходивших в прошлом.

И благодаря магнитным рудам было открыто бывшее магнитное поле Марса, исчезнувшее давным-давно, в каком-то смысле оно осталось погребенным в его рудах.

Магнитосфера

Визуализация

Магнитное поле Земли прекрасно ощущается на поверхности (в частности, оно ориентирует компасы). Но этот магнит огромен и создает магнитное поле даже в космическом вакууме повсюду вокруг Земли. Это обширное магнитное пространство, окружающее Землю, называется магнитосферой.

Чтобы изобразить ее, можно было бы нарисовать вектор магнитного поля в каждой точке пространства, но сделать это будет трудно. Поэтому мы прибегнем к помощи так называемых силовых линий: в каждой точке силовой линии магнитное поле ориентировано в направлении этой линии. Несколько карандашных штрихов – и мы получаем карту магнитного поля вокруг Земли (→ **рис. 15.4**).

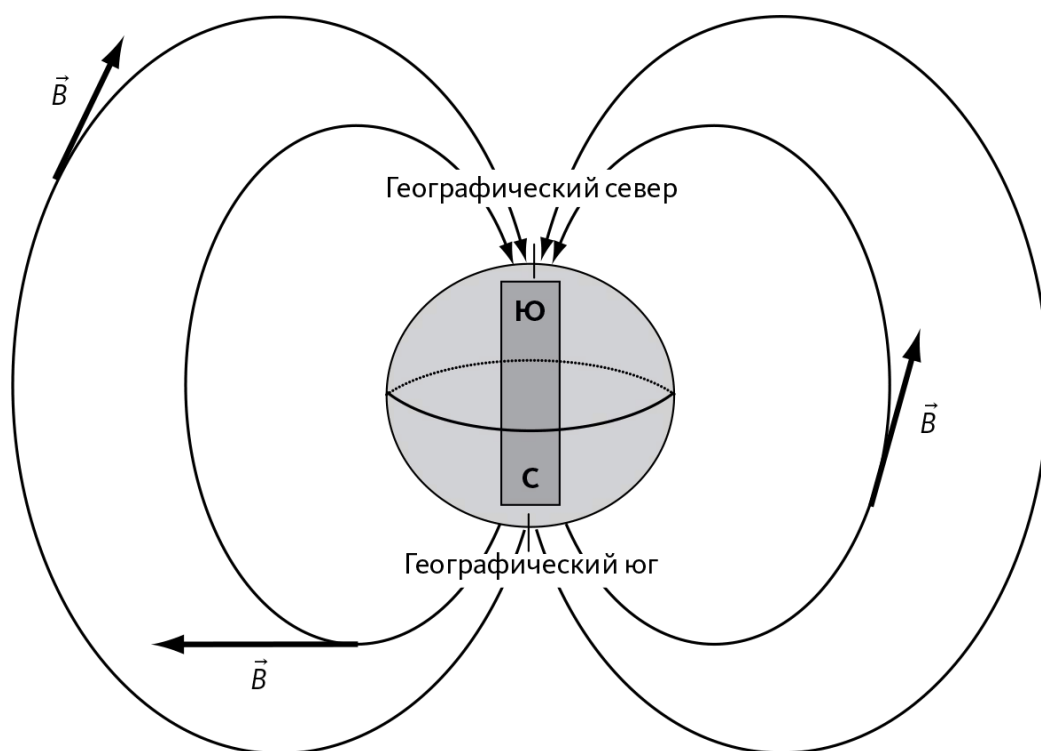


Рис. 15.4 – Силовые линии, созданные магнитом

Силовые линии указывают направление магнитного поля в любой точке пространства (мы изобразили несколько примеров на схеме).

Заметим, что в случае Земли силовые линии искажены присутствием заряженных частиц, исходящих от Солнца, что значительно деформирует линии в сравнении с вышеприведенной схемой.

Солнечный ветер

Магнитосфера играет огромную роль для жизни на Земле. В ближних к Солнцу слоях пространства, называемых солнечной короной, температура достигает миллиона градусов. Такая колоссальная температура придает необходимую кинетическую энергию электронам для освобождения от ядра. Атомы водорода, потерявшие свой единственный электрон, становятся простыми протонами.

Эти протоны и электроны обладают достаточной энергией, чтобы преодолеть солнечное притяжение и удалиться к пределам Солнечной системы. Таким образом, на Землю постоянно изливается поток частиц с Солнца, этот поток называется солнечным ветром.

Заряженные частицы солнечного ветра обладают мощной энергией, приобретенной в солнечной короне, – другими словами, они перемещаются с большой скоростью. Сталкиваясь с живым существом, они могут нанести непоправимый вред, передав ему эту энергию.

Радиационный пояс

К счастью, магнитосфера нас защищает. Когда заряженная частица приближается к Земле, на нее действует магнитная сила, перпендикулярная магнитному полю и траектории движения частицы, – иначе говоря, частица отклоняется, не достигнув Земли. А точнее, она начинает описывать круговые движения и «обвиваться» вокруг силовых линий магнитного поля (согласно правилу трех пальцев, → рис. 15.5).

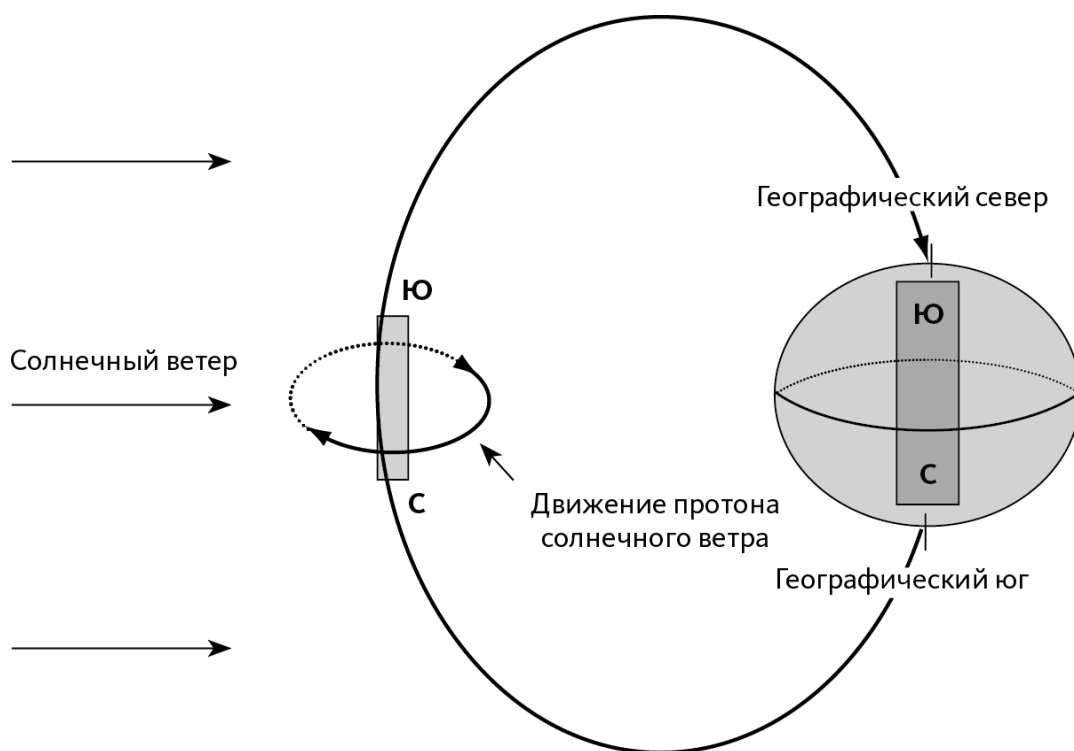


Рис. 15.5 – Взаимодействие с солнечным ветром

Заряженные частицы солнечного ветра подвергаются воздействию магнитной силы, которая заставляет их вращаться вокруг силовых линий. Сформированное таким образом кольцо ведет себя как магнит, который мы изобразили на схеме (магнитное поле, направленное вниз). Этот «магнит» не может приблизиться к полюсам Земли, перемещаясь вдоль силовых линий, потому что земной магнит его отталкивает.

То же можно сказать и об электроны: направление вращения вокруг силовой линии будет противоположным, но магнит, порожденный кольцом, будет идентичным (магнитное поле направлено вниз).

Это круговое движение заряженных частиц в каком-то смысле формирует кольца: то есть они ведут себя как маленькие магниты. **Рис. 15.5** позволяет убедиться, что эти магниты создают магнитное поле, направленное противоположно магнитному полю Земли. Иначе говоря, их северный полюс направлен к северному магнитному полюсу Земли.

Учитывая их направление, эти кольца отталкиваются земными магнитными полюсами (потому что два северных полюса отталкиваются, и два южных тоже).

В итоге:

- заряженные частицы не могут двигаться прямо к экватору, потому что они отклоняются силовыми линиями;
- они не могут подняться к полюсам, потому что их вращение придает им свойства магнита, который отталкивается полюсами Земли.

Таким образом, заряженным частицам приходится оставаться высоко над экватором, то есть на уровне узкого пояса, нависающего над экватором, — этот пояс подпитывается за счет заряженных частиц, прилетевших с Солнца, которые остаются пленниками внутри его. Он называется радиационным поясом. Учитывая то, что эти заряженные частицы обладают мощной энергией, этот пояс очень опасен для электроники спутников, а также для космонавтов.

Северное сияние

Если заряженные частицы ни в коем случае не могут пересечь силовые линии Земли и неизбежно становятся их частью, случается, что они все-таки достигают полюсов Земли,

несмотря на магнитное отталкивание. Заряженные частицы касаются Земли в том месте, где силовые линии уходят в нее, то есть на полярных полюсах. Сталкиваясь с земной атмосферой, заряженные частицы высокой мощности «раздражают» молекулы атмосферы, то есть придают энергии электронам этих молекул. А молекулы рассеивают эту энергию, излучая свет (причину этого мы разберем в части, посвященной оптике). Возникают «полярные сияния» с их розовыми и зелеными разводами, которые иногда можно наблюдать вблизи полярного круга.

Иногда Солнце извергает целые сгустки заряженных частиц («солнечные вспышки»), именно в такие периоды высокой солнечной активности возникают самые большие и яркие полярные сияния.

Магнитное поле и жизнь

В конечном итоге магнитосфера служит нам щитом от этих опасных частиц, остатки которых останавливает атмосфера.

Между тем в истории Земли магнитное поле часто менялось (северный магнитный полюс переходил от северного географического полюса к южному). В такие транзитные периоды Земля обладала гораздо более слабым магнитным полем и не была защищена от солнечного ветра.

Несмотря ни на что, жизнь на Земле смогла сохраниться, вероятно, потому, что эти смены направлений магнитного поля длились короткое время. Кроме того, эти периоды перемен, возможно, способствовали более интенсивным мутациям, благотворным для эволюции видов.

С другой стороны, в более долгосрочном периоде, возможно, жизнь на Земле не могла бы возникнуть и развиваться при отсутствии сильного магнитного поля.



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА

Вращение внешнего ядра Земли, которое является жидким проводником, создает магнитное поле Земли. Аналогичным образом, внутренние движения частиц Солнца создают магнитное поле нашей звезды.

Подобно магнитному полю Земли, солнечное магнитное поле время от времени меняет направление, но это происходит немного регулярнее: инверсия происходит в среднем раз в 11 лет. В такие периоды инверсий магнитное поле Солнца становится слабее и солнечная активность также слабеет: частиц солнечного ветра становится меньше, и на Земле реже случаются полярные сияния.

Однако, как и на Земле, изменение магнитного поля Солнца остается нерегулярным и в высшей степени непредсказуемым. Так, во второй половине XVII в. (при Людовике XIV) солнечная активность словно бы вовсе исчезла необъяснимым образом, этот период получил название «минимум Маундера». Однако этот период совпал с так называемым малым ледниковым периодом в Европе, отмеченным особенно суровыми зимами. Связь между двумя явлениями пока не доказана, но влияние солнечной активности на климат Земли со счетов не сбросишь.

3. Применение в моторах и тормозах

Электромотор

Создание электрического мотора базируется на простом феномене – на том, что два магнита поворачиваются относительно друг друга, чтобы сойтись разными полюсами. А где поворот, там и вращение...

Разберем устройство мотора на постоянном токе: два магнита, закрепленные друг напротив друга разными полюсами. Между ними пространство, в котором расположен ротор, представляющий собой катушку, по которой проходит ток. Эта катушка, следовательно, ведет себя как магнит (→ рис. 15.6).

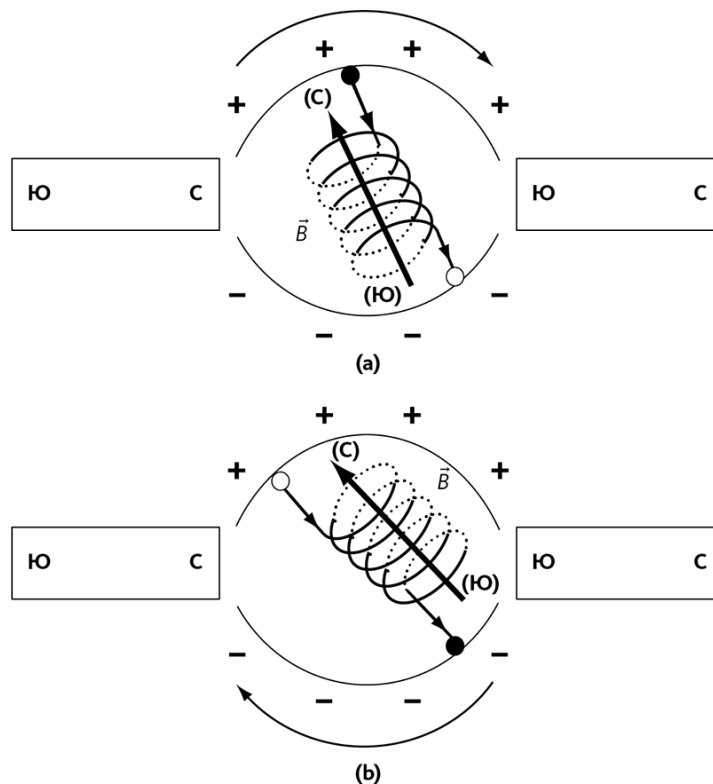


Рис. 15.6 – Принцип работы мотора на постоянном токе

(а) – через катушку проходит ток, который идет от «плюса» к «минусу»: это создает магнитное поле. Северный полюс катушки (вверху) отталкивается северным полюсом магнита слева и притягивается южным полюсом магнита справа: катушка поворачивается.

Мы обозначили два конца катушки черной и белой точкой. **(b)** – черная точка прошла мимо правого магнита, то есть черная точка больше не касается положительно заряженной зоны, зато касается отрицательной. Таким образом, ток начинает двигаться от белой точки к черной, а не от черной к белой: направление тока было изменено.

Магнитное поле теперь направлено от черной точки к белой, противоположно **(а)**: белая точка на этот раз соответствует северному полюсу, а черная – южному. На схеме видно, что это позволяет поддерживать вращение с помощью постоянного магнитного отталкивания.

Северный полюс ротора отталкивается северным полюсом одного из магнитов и притягивается южным полюсом другого магнита: ротор начинает вращаться. Проблема в том, что, когда ротор повернулся один раз, вращение прекращается. Чтобы его продлить, необходимо переделать северный полюс ротора в южный, чего можно достичь, изменив направление тока: там, где было притяжение, создается отталкивание, и ротор снова делает полуоборот, чтобы найти стабильное положение. В этот момент ток в роторе снова меняется, и ротор вновь поворачивается...

Таким образом, с каждым полуоборотом ротор приобретает ускорение: он достигнет номинальной скорости вращения, когда трение компенсирует действие магнитной силы.

Торможение с помощью магнитного поля

Мы видели, что вращение диска проводника, «погруженного» в магнитное поле, вызывало появление электрического тока, направленного к внешнему краю диска (→ **рис. 15.3.а**, который мы перенесли на **рис. 15.7**). Но этот ток, направленный к внешнему краю, также подвергается действию магнитной силы, направленной к задней части диска (согласно правилу трех пальцев). Таким образом, ток описывает дугу, направленную к внешней и к задней части диска.

Во время перемещения свободные электроны оказывают трение на окружающее пространство. Эта сила трения направлена к задней части диска (свободные электроны в своем

движении к задней части диска стремятся унести с собой атомы диска). Иначе говоря, сила препятствует вращению диска: речь идет о силе торможения, которая замедляет вращение диска.

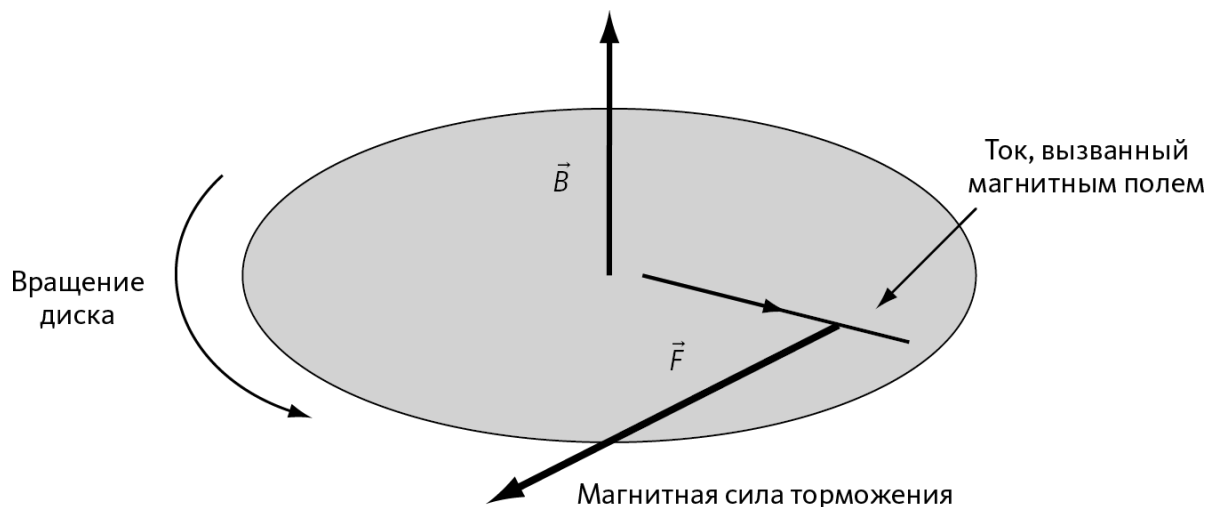


Рис. 15.7 – Магнитное торможение металлического диска

Такое «магнитное торможение» позволяет избежать изнашивания материала, который участвует в традиционном тормозе. В частности, оно используется в грузовиках в дополнение к обычным тормозам.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Взаимодействие двух магнитов (притягивающее и отталкивающее) связано со схождением магнитного поля к южному полюсу магнита и расхождением от его северного полюса.
- Магнитное поле Земли возникает из-за вращения внутреннего ядра, жидкого проводника, который создает динамо-эффект.
- Природные магниты образованы намагничиванием лав под действием магнитного поля Земли, которое затем сохранилось после их остывания.
- Земля создает магнитное поле везде вокруг себя, даже в космосе, образуя таким образом магнитосферу. Она защищает нас от заряженных частиц солнечного ветра, заставляя их отклоняться. Магнитосфера также создает радиационный пояс и полярное сияние.
- Электромотор использует поворот катушки, по которой проходит ток, помещенной напротив магнита. Вращение поддерживается с помощью периодической инверсии направления тока.
- Металл, вращающийся в магнитном поле, тормозится с помощью магнитной силы.

16. Электромагнитная индукция

До сих пор мы сосредотачивали свое внимание на статических электромагнитных полях. Настало время еще больше обобщить информацию, обратившись к ситуации, когда поля меняются, что приведет нас к новому явлению – индукции. Ее применение имеет первостепенное значение в повседневной жизни: именно благодаря ей генераторы переменного тока электростанций вырабатывают электричество, которым мы пользуемся дома. Нам представится случай окунуться в богатый мир переменного тока и напряжения, которые заставляют работать наши электроприборы, подключенные к сети. Мы более подробно рассмотрим новый компонент, работающий на индукции, – катушку.

1. Индукционный ток

Индукция и магнитостатика

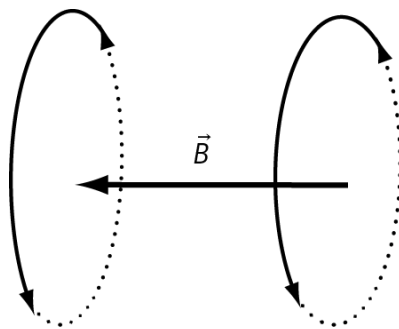
Действие магнитного поля и реакция зарядов

Для начала кратко напомним о выводах из предыдущих глав. Мы видели, что движущиеся заряды создают магнитное поле в любой точке пространства. Это поле вызывает появление магнитной силы у каждой заряженной движущейся частицы, проходящей через него.

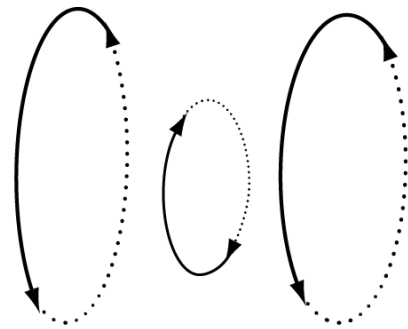
Возьмем две катушки, через которые проходит одинаковый ток в одном направлении, и расположим их друг напротив друга: между двумя катушками появится магнитное поле (→ **рис. 16.1.а**). Правило трех пальцев подсказывает нам, что две катушки создают поле, направленное в одну сторону: таким образом, общее поле будет больше.

Теперь заставим электроны перемещаться между двумя катушками перпендикулярно оси катушек (→ **рис. 16.1.б**): магнитная сила, которая на них воздействует, меняет их траекторию и заставляет описывать круг (правило трех пальцев). Иначе говоря, электроны проходят по аналогии кольца: это значит, что они сами создают магнитное поле (кольцо ведет себя как магнит)... Правило трех пальцев (опять оно!) показывает нам, что поле направлено в противоположную сторону относительно первоначального магнитного поля, которое заставило электроны отклониться.

Иначе говоря, первоначальное магнитное поле вызывает движение зарядов, которое стремится *уменьшить* это магнитное поле. В каком-то смысле это противоположно динамо-эффекту: магнитное поле создает токи, которые *нарушают* это поле.



(а) Магнитное поле, созданное между катушками



(б) Электроны, посланные в середину, начинают вращаться в сторону, противоположную вращению электронов двух катушек

Рис. 16.1 – Влияние катушек на движение электрона

На схемах сверху представлено направление перемещения электронов (противоположное движению тока).

Две катушки создают магнитное поле, направление которого можно найти с помощью правила трех пальцев **(а)**. Это поле действует с помощью магнитной силы на электроны, посланные в середину **(б)**, которая меняет их траекторию и заставляет описывать круг (и снова правило трех пальцев). По созданному таким образом новому кольцу электроток движется в направлении противоположном току катушек: кольцо создает магнитное поле, которое противодействует полю катушек.

Мы отмечали это, когда говорили о взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой земли: электроны и протоны закручиваются вокруг силовых линий магнитного поля, создавая нечто вроде колец, которые ведут себя как магниты. Эти маленькие магниты создают магнитное поле, направленное противоположно магнитному полю Земли. И здесь тоже магнитное поле Земли вызывает ток, который стремится ему противодействовать.

В динамо-эффекте нам удалось усилить магнитное поле, заставив ток идти по определенному пути. Но если мы позволим току свободно двигаться, куда он хочет, он всегда будет стремиться противодействовать магнитному полю, в которое он погружен.

Индукционный ток

В предыдущих примерах магнитная сила лишь *отклоняет* уже существующий ток. Но мы видели, что она также может *создавать* ток: так происходит, когда мы заставляем вращаться диск проводника в магнитном поле. На **рис. 16.2** мы видим, что появляется ток, направленный к внешнему краю диска и к его задней части (это мы объяснили в предыдущей главе). В таком случае говорят, что ток индуцирован магнитным полем.

На самом деле об «индукции» говорят, когда возникает ток в результате действия магнитного поля. На **рис. 16.2** мы видим, что, предоставленный самому себе, такой ток «запускает кольцо», направление которого стремится противодействовать первоначальному магнитному полю, — перед нами тот же результат, который описан выше.

Запомним, что индукционный ток стремится противодействовать тому, что его породило.

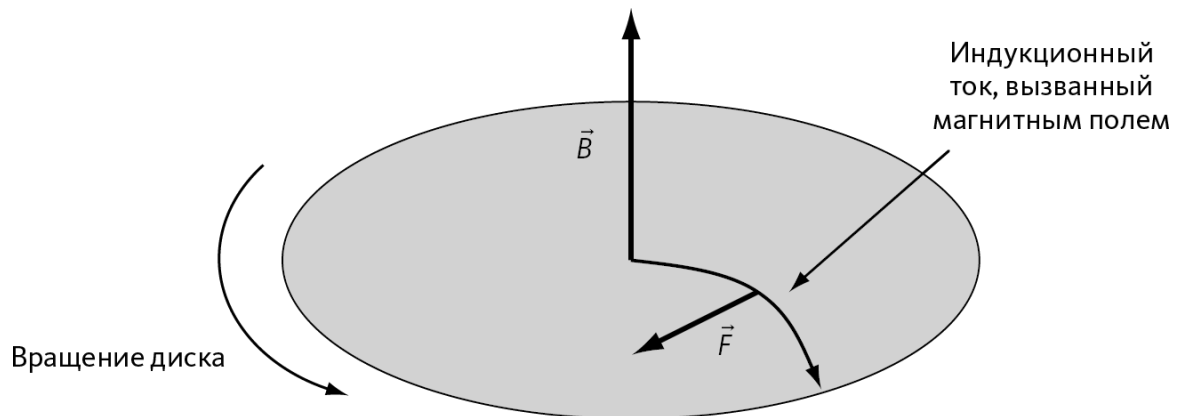


Рис. 16.2 – Индукционный ток, вызванный вращающимся металлическим диском

Магнитная сила создает ток, направленный к внешнему краю диска и отклоняющийся к задней части диска. Мы видим, что дуга, созданная этим током, образует нечто вроде обрывка кольца, которое создает магнитное поле, направленное противоположно первоначальному магнитному полю.

Индукция в изменяемом поле

Сила индукции

Соединим напрямую катушку и амперметр: это создает цепь, в которой электроны могут перемещаться, и амперметр позволяет измерять силу тока в цепи. Разумеется, при отсутствии батарейки ток не возникает.

То же самое происходит, если магнит помещен перед катушкой (→ **рис. 16.3.а**): действительно, магнитная сила может воздействовать только на движущиеся заряды, а в цепи ничего не движется.

Теперь резко приблизим магнит к катушке: внезапно мы видим появление в цепи тока, который исчезает, как только магнит перестает двигаться. Точно так же, если мы резко удалим магнит, снова возникнет ток, направленный в другую сторону. Таким образом, появилась сила, которая заставляет свободные электроны двигаться по цепи.

Проблема в том, что магнитная сила действует только на подвижные заряды, тогда как здесь электроны изначально неподвижны: то есть мы имеем дело с другой силой. Это также и не электростатическая сила, потому что магнит не заряжен.

Таким образом, мы вынуждены обозначить третью, совершенно новую силу, которая действует на заряды. Это называется электродвижущей силой индукции (ЭДС), потому что в присутствии магнитного поля возникает индукционный ток. На первый взгляд эта «сила

индукции» связана с *изменением* магнитного поля, поскольку она возникает, когда мы *приближаем* или *удаляем* магнит.

Уточним кое-что:

- Если мы приближаем северный полюс магнита ($\rightarrow$ **рис. 16.3**), магнитное поле, направленное вправо, увеличивается: *изменение* поля направлено *вправо*.

- Опытным путем мы установили, что в этом случае индукционный ток создает магнитное поле, направленное *влево* ($\rightarrow$ **рис. 16.3.b1**).

- Если мы удаляем северный полюс магнита, магнитное поле, направленное вправо, уменьшается: *изменение* поля направлено *влево*. Мы видим, что в этом случае индукционный ток создает магнитное поле, направленное *вправо* ($\rightarrow$ **рис. 16.3.b2**).

- Если мы приближаем южный полюс магнита, магнитное поле, направленное влево, увеличивается: *изменение* поля направлено *влево*. Мы видим, что индукционный ток создает магнитное поле, направленное *вправо* ($\rightarrow$ **рис. 16.3.b3**).

- Если мы удаляем южный полюс магнита, магнитное поле, направленное влево, уменьшается: *изменение* поля направлено *вправо*. Мы замечаем, что в этом случае индукционный ток создает магнитное поле, направленное *влево* ($\rightarrow$ **рис. 16.3.b4**).

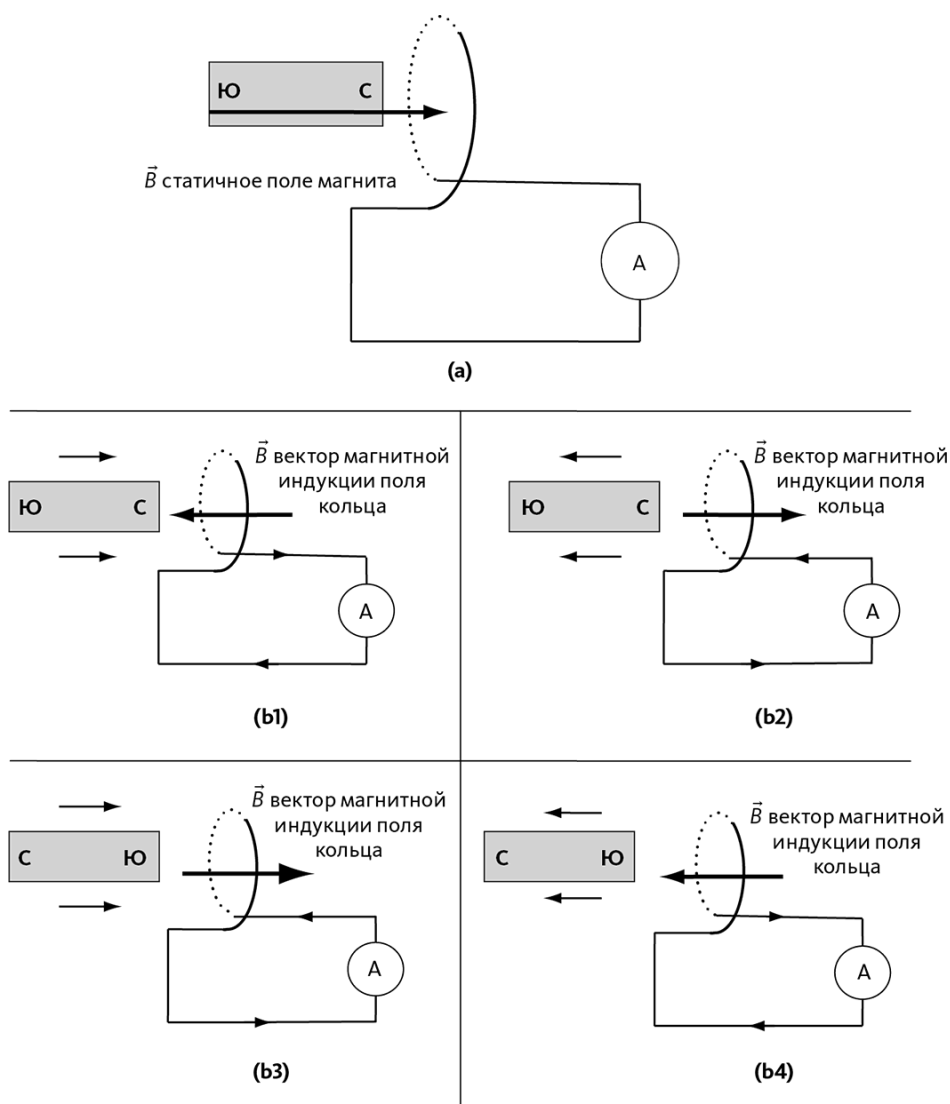


Рис. 16.3

(а) Неподвижный магнит перед катушкой не создает никакого тока в цепи.

(б) Подвижный магнит перед катушкой создает в цепи индукционный ток. Направление этого тока таково, что магнитное поле, созданное катушкой, противодействует изменению магнитного поля, созданного магнитом.

Таким образом, в любом случае *сила индукции (ЭДС) создает индукционный ток, который противодействует изменению магнитного поля, которое его породило.*

Мы получаем вывод, сходный с выводом из предыдущего параграфа, но на этот раз это *изменение* магнитного поля, а не само поле создает индукционный ток. Более того, в данном случае заряду необязательно двигаться, чтобы подвергнуться силе индукции (ЭДС).

Разделение электричества и магнетизма

Сила индукции (ЭДС) обнаруживает связь между магнитными (присутствие магнита) и электрическими (ускорение свободных электронов в цепи) аспектами. Вместо того чтобы учитывать большое количество сил, действующих на заряды, физики предпочли разделить их на две категории:

- *Магнитная* сила действует на подвижные заряды и зависит от их скорости v . Она записывается $F = qvB \sin \alpha$ (где α – угол между траекторией и полем, а B – величина магнитной индукции, характеризующей магнитное поле). Таким образом, новая сила, которую мы только что обнаружили, не входит в эту категорию, поскольку она воздействует даже на неподвижные заряды.

- *Электрическая* сила не зависит от движения зарядов, на которые воздействует. Она всегда записывается $F = qE$ (где E – напряженность электрического поля).

Таким образом, наша новая «сила индукции» относится к «электрическому» типу, поскольку воздействует и на подвижные, и на неподвижные заряды. Это значит, что изменение магнитного поля создает электрическое поле E , которое воздействует электрической силой $F = qE$ на электроны цепи. Это электрическое поле, порожденное магнитным полем, не имеет очевидной связи с электростатическим полем, образованным неподвижными зарядами, которым мы интересовались до сих пор.

В итоге такое различие между электрической и магнитной силой может показаться совершенно произвольным: в конце концов, в опыте, который мы ставим, именно магнит создает ток в цепи, и, следовательно, нам хочется причислить его к магнитной силе, а не к электрической...

На самом деле в дальнейшем мы увидим, что магнитные и электрические составляющие связаны еще теснее, чем показывает данный опыт: они лишь демонстрируют два разных способа увидеть *одну и ту же силу*. Все зависит от точки зрения, как и в случае с силами инерции. Мы вернемся к этому, когда будем говорить о теории относительности, потому что она позволяет понять, почему магнетизм и электричество являются единым целым.

2. Электростанции

Генераторы переменного тока

Создание переменного тока

Изменение магнитного поля внутри катушки позволяет создать индукционный ток. На самом деле, вместо того чтобы использовать батареи, лучше генерировать ток в электрической цепи.

На практике, для того чтобы поддерживать ток, необходимо постоянно менять магнитное поле в катушке. Вместо того чтобы приближать и удалять магнит, двигая его, лучше на расстоянии заставить его вращаться вокруг своей оси, так магнит будет поворачиваться к катушке то северным, то южным полюсом.

На **рис. 16.4.а**, когда северный полюс приближается, южный полюс удаляется, это способствует *расширению* магнитного поля *вправо*: индукционный ток направлен таким образом, чтобы создать магнитное поле, ориентированное влево.

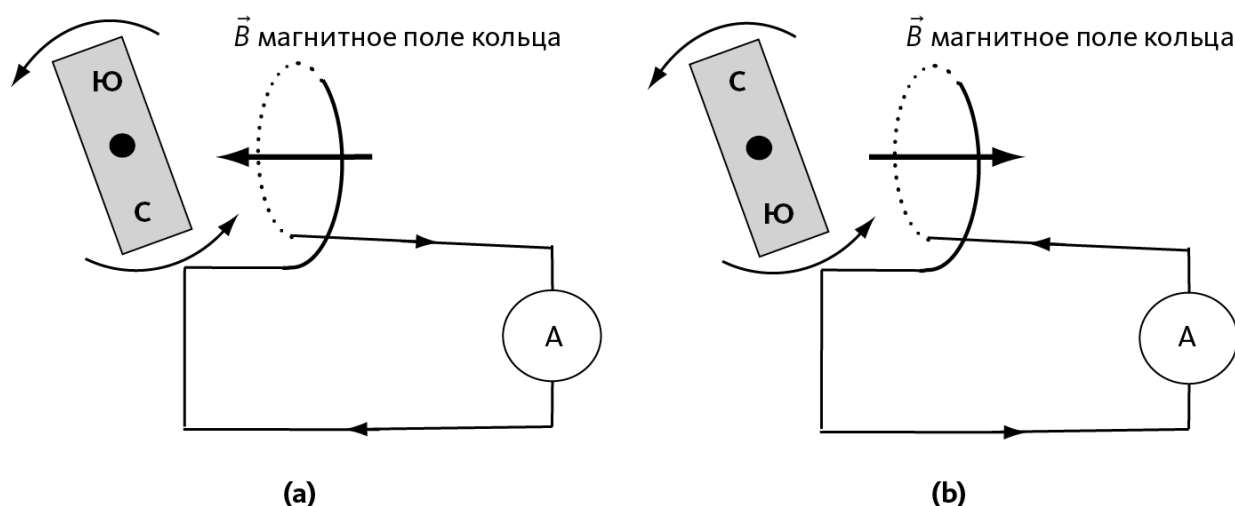


Рис. 16.4 – Переменный ток, созданный вращающимся магнитом

(a) – северный полюс приближается, а южный удаляется: магнитное поле, направленное вправо, увеличивается, появляется индукционный ток и создает поле, направленное влево.

(b) – после полуоборота ситуация изменилась: магнитное поле, направленное влево, увеличивается, а ток поменял направление, чтобы создать поле, направленное вправо.

В конце полуоборота южный полюс, в свою очередь, приближается, а северный полюс удаляется ($\rightarrow$ рис. 16.4.b): индукционный ток направлен в противоположную сторону.

Мы отмечаем отрицательные или положительные значения силы тока в катушке в зависимости от направления тока. Сила тока меняется с положительной на отрицательную во время вращения магнита, нейтрализуясь между ними двумя.

Точнее сказать, если магнитное поле равномерно вращается в катушке, можно продемонстрировать, что сила тока меняется по синусоиде ($\rightarrow$ рис. 16.5). Таким образом, с помощью этого метода мы создали «переменный ток», тогда как с помощью батареи мы получали постоянный ток. Устройство, которое мы только что описали, называется генератором переменного тока.



Рис. 16.5 – Сила тока, вырабатываемого генератором переменного тока

Мы взяли пример индукционного тока, вызванного полем магнита, который вращается перед катушкой со скоростью 50 оборотов в секунду: сила тока приобретает ту же величину в конце

оборота магнита, то есть через 20 миллисекунд. Ток, питающий все наши электрические приборы, колеблется именно с такой частотой.

Создание переменного напряжения

Изменение магнитного поля в катушке вызывает появление силы электрического типа (ЭДС индукции): это значит, что в катушке появляется электрическое поле, и именно оно приводит электроны в движение.

Когда мы подсоединяем к катушке провод (или амперметр, как в предыдущих опытах), это электрическое поле создает ток, который проходит по цепи (→ **рис. 16.6.a**)

Но предположим, что мы не подсоединили катушку ни к какому другому компоненту (→ **рис. 16.6.b**). Электроны накапливаются на зажимах катушки, не имея выхода, и создают на этих зажимах положительный и отрицательный заряды. Эти заряды создают электростатическое поле, направленное в противоположную сторону относительно индукционного электрического поля (→ **рис. 16.6.c**). Почти мгновенно оба поля нейтрализуют друг друга, и движение электронов в катушке прекращается (ток исчезает).

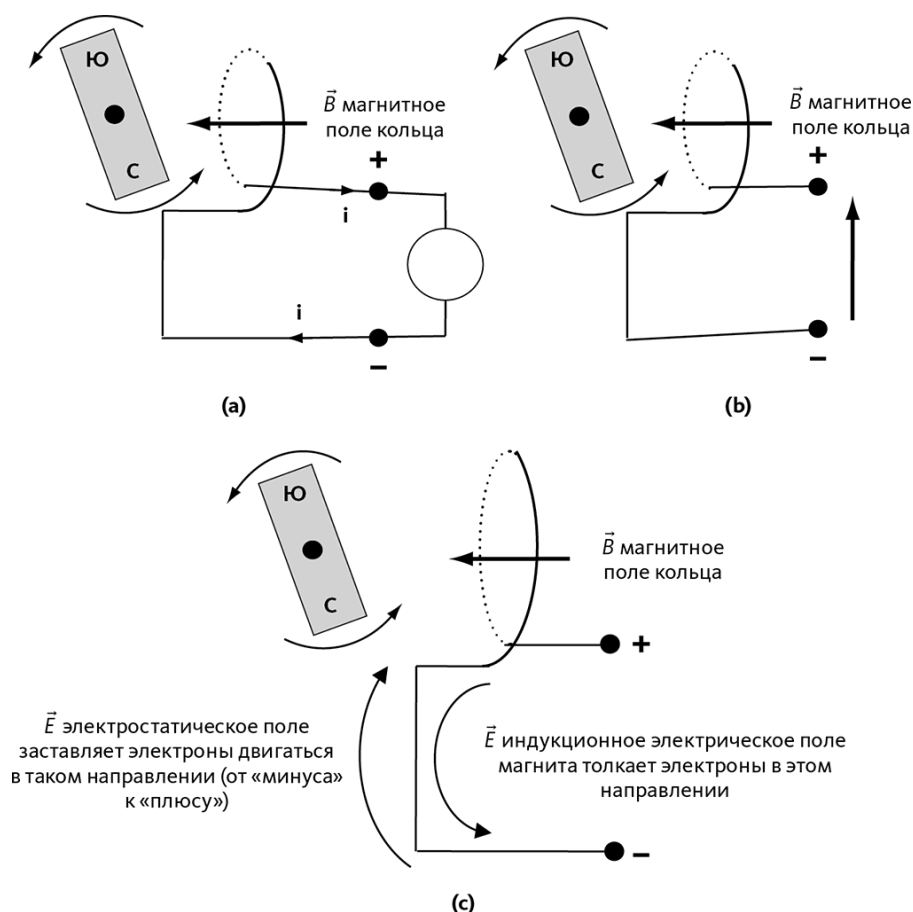


Рис. 16.6 – Напряжение генератора

Вращение магнита создает ток в катушке (a). Если зажимы катушки не подключены, значит, заряды накапливаются (b), пока электростатическое отталкивание не станет достаточно сильным, чтобы противодействовать силе индукции (c). То есть в неподключенном генераторе существует напряжение.

Это напряжение присутствует, даже когда мы включаем генератор, как в части (a), потому что катушки подпитываются по мере поступления тока.

Наконец, мы видим, что ток движется внутри от «минуса» к «плюсу» (вынужденное направление), в то время как в остальной части цепи он идет от «плюса» к «минусу» (естественное направление).

Возникшие положительные и отрицательные заряды соответствуют положительному и отрицательному потенциалам соответственно: таким образом, мы создали разницу потенциалов на зажимах катушки, то есть напряжение. По мере того как магнит вращается вокруг своей оси, это напряжение направлено в ту или другую сторону: мы создали чередующееся напряжение, очень близкое к переменному.

Таким образом, у вас дома переменное напряжение присутствует на концах электрических розеток, даже когда к ним ничего не подключено. Но чтобы появился переменный ток, необходимо в построенную таким образом цепь подключить электроприбор.

Мимоходом заметим, что внутри генератора ток движется от отрицательного полюса к положительному (→ **рис. 16.6.а**): противоположно естественному направлению тока, который всегда движется в цепи от «плюса» к «минусу». Мы уже отмечали это свойство у батареи: вообще, это свойство любого электрогенератора. Это позволяет «подзаряжать» зажимы по мере того, как движется ток.

Получается, что почти все электричество, которое питает наши дома, сгенерировано таким способом. В самом деле, вращение магнитного поля в катушках лежит в основе работы большинства электростанций – гидроэлектростанций, работающих на нефти, газе или угле, а также атомных и ветряных. Это объясняет, почему напряжение 220 V, поставляемое *Electricité de France*, переменное: переменное напряжение распространено гораздо больше, чем постоянное, потому что его легче вырабатывать. Более того, его передача на большие расстояния дешевле, чем в случае с постоянным током, благодаря использованию трансформаторов (см. следующую главу).

Энергия электростанций

Принцип работы

В основном необходимое магнитное поле создается на электростанциях с помощью электромагнитов, а не просто магнитов. Электромагнит представляет собой катушку, по которой проходит постоянный ток. Мы видели, что при этом образуется магнитное поле, как и у магнита.

Мощность электрической энергии, необходимой для питания электромагнита, гораздо ниже той, которую вырабатывает генератор переменного тока, – таким образом, вырабатывается электричество без использования магнита.

Электрическая энергия не может быть создана из ничего, откуда-то она обязательно должна браться: на практике она вырабатывается при вращении электромагнита (ротора), который обладает кинетической энергией. То есть целью электростанции является заставить ротор вращаться.

Обычно применяется газ под давлением, который нажимает на лопасти турбины, чтобы заставить ее вращаться. Лучший способ получить газ под давлением – вскипятить воду в устройстве, напоминающем скороварку: давление водяного пара поднимается до тех пор, пока жидкая вода не переходит в газ.

То есть сначала нужно нагреть воду... Это можно сделать, сжигая уголь или нефть или используя атомное топливо (теплоцентрали). Что касается ветровых и гидроэлектростанций, они напрямую используют ветер и воду под давлением в плотинах, чтобы заставить турбины вращаться.

Перечислим этапы передачи энергии в электростанции, работающей на угле:

- Уголь содержит химическую энергию (= потенциальную микроскопическую энергию).
- Реакция горения преобразует эту энергию в тепловую (= кинетическую микроскопическую).

Именно эта энергия поднимает давление водяного пара.

- Толкая лопасти турбины, водяной пар преобразует эту энергию в кинетическую (макроскопическую), связанную с вращением ротора.

- Наконец, с помощью магнитного поля в генераторе эта энергия превращается в электрическую.

Отметим, что первые три этапа в точности повторяют работу парового двигателя: электростанция – это всего лишь «машина на паровом двигателе», а уголь только греет воду,

чтобы создать пар под давлением, который будет вращать колеса. Таким образом, мы видим, что человечество и сегодня использует старые, проверенные технологии.

Сохранение энергии

В генераторе переменного тока кинетическая энергия (вращение магнита) превращается в энергию электрическую. Это значит, что кинетическая энергия ротора должна уменьшаться по мере того, как создается электрическая энергия. Проверим это.

Индукционный ток катушки создает магнитное поле, противодействующее увеличению магнитного поля магнита, то есть когда северный полюс магнита приближается к катушке во время вращения ротора, катушка, в свою очередь, становится магнитом, чей северный полюс направлен к ротору (→ **рис. 16.7**). Между тем два северных полюса отталкиваются: индукционный ток препятствует вращению магнита и тормозит его. Кинетическая энергия уменьшается, а электрическая энергия создается: общая энергия сохраняется.

Это объясняет, почему так трудно жать на педали с включенными фарами: дело не в трении, а в магнитном отталкивании внутри динамо-машины (которая работает как генератор переменного тока). Таким образом, вы прекрасно «чувствуете» энергию, необходимую для включения фар, потому что вы ее и вырабатываете.

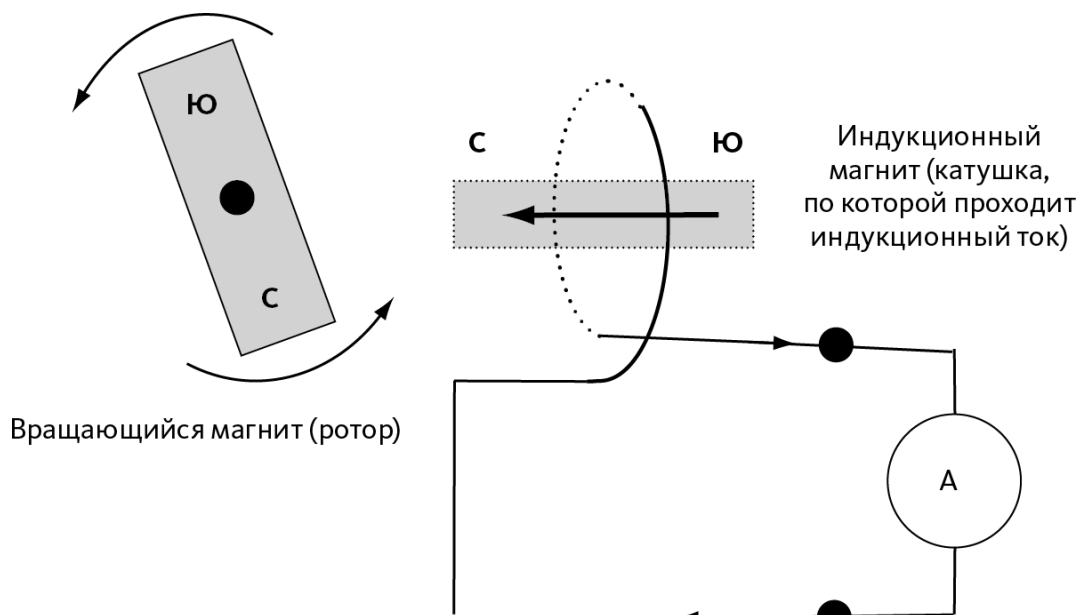


Рис. 16.7 – Энергетические аспекты генератора переменного тока

Вращающийся магнит создает индукционный ток в катушке. Этот ток создает магнитное поле, которое препятствует увеличению поля магнита: катушка сама становится магнитом, чей северный полюс повернут в сторону ротора. Магнитное отталкивание тормозит вращение ротора: кинетическая энергия ротора уменьшается и полностью переходит в электрическую энергию цепи.

Предположим, наконец, что к генератору ничего не подключено: что же происходит с энергией? Ток не может идти, значит, электрическая мощность равна нулю (не будем забывать, что она выражается $P = UI$: мощность требует присутствия напряжения и тока). Это должно означать, что ротор не теряет никакой кинетической энергии. Так ли это?

Ответ «да», потому что в этот раз, поскольку тока нет, катушка не создает магнитное поле и не ведет себя как магнит: ничто не тормозит вращение ротора. Конечно, остается трение, но оно поглощает энергию в тепловом виде, а не в электрическом.

В конечном итоге, пока вы не подключаете никаких приборов к вашим розеткам, электрическая энергия не расходуется, хотя переменное напряжение присутствует постоянно. Генераторы электростанций продолжают вращаться, но вхолостую. Единственная энергия, затраченная на электростанции, та, что позволяет компенсировать трение ротора.

3. Дополнения к переменным сигналам

Частота, амплитуда, сдвиг фазы

В электричестве переменные напряжение и ток очень часты, поскольку их создает генератор переменного тока, который вырабатывает наше электричество. Уточним некоторые важные характеристики, касающиеся этих сигналов. Существуют три характеризующих их параметра:

- Частота соответствует числу колебаний в секунду. Она выражается в герцах (Гц). Напряжение наших электрических розеток колеблется 50 раз в секунду (50 Гц).

- Также мы определяем период сигнала как длительность колебания. Например, если частота составляет 2 Гц, это значит, что в секунду совершается два колебания, то есть одно колебание длится $\frac{1}{2}$ секунды. Мы видим, что период – это величина обратная частоте.

- Амплитуда соответствует максимальному значению силы тока или напряжения (если они колеблются в пределах одной постоянной величины). Например, напряжение, которое колеблется от -10 В до $+10\text{ В}$, имеет амплитуду 10 В .

- Сдвиг фазы представляет собой временное смещение по отношению к другому переменному сигналу. Например, в сопротивлении сила тока и напряжение не всегда колеблются «в фазе»: максимум напряжения не всегда достигается одновременно с максимумом силы тока (→ **рис. 16.8**). Такой сдвиг фазы выражается углом в пределах от -180° до $+180^\circ$: отрицательный сдвиг соответствует *опозданию* сигнала относительно опорного сигнала, положительный сдвиг соответствует *опережению*. 180° представляет смещение полупериода, 90° смещение четверти периода и т. д.

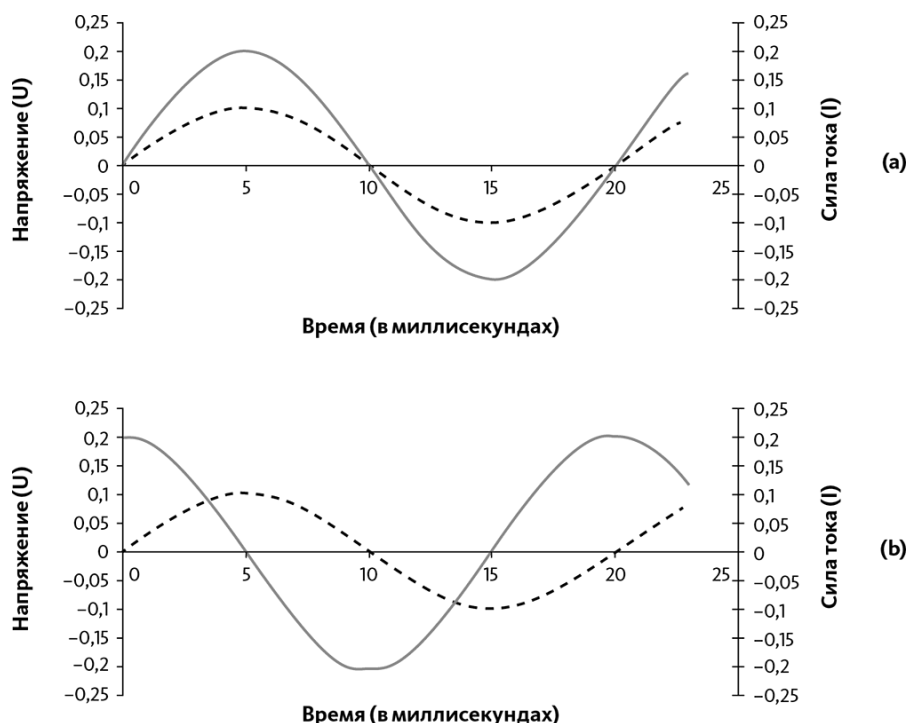


Рис. 16.8 – Примеры переменных сигналов

(а) – два сигнала «в фазе» (максимум и минимум одновременны). (б) – сигнал сплошной чертой опережает сигнал пунктиром (положительный сдвиг фазы 90°). Также отмечен период: 20 мс. Из этого следует, что частота равна 50 Гц (обратная периоду).

Наконец, амплитуда равна $0,2\text{ В}$ для напряжения (сплошная черта) и $0,1\text{ А}$ для силы тока (пунктир).

Эффективное напряжение и сила тока

Рассмотрим теперь энергетические последствия переменного сигнала. Для этого сравним два типа сигнала на зажимах сопротивления $R = 100 \text{ Ом}$.

- переменное напряжение u колеблется от -10 В до $+10 \text{ В}$;
- постоянное напряжение U равно 10 В .

Если $U = 10 \text{ В}$, мощность, рассеянная в сопротивлении, равна 1 Вт ($P = U/R$). В переменном случае рассеянная мощность колеблется от 0 до 1 Вт при условии, что напряжение колеблется от 0 до $\pm 10 \text{ В}$: в среднем она меньше 1 Вт .

Таким образом, в среднем рассеянная мощность в переменном сигнале ниже мощности, рассеянной в постоянном сигнале из предыдущего примера. Если сопротивление – это нагревающаяся пластина, оно гораздо меньше нагреется с переменным напряжением амплитудой 10 В , чем с постоянным напряжением в 10 В .

Значит, чтобы рассеять ту же энергию, что и в постоянном сигнале, нужно увеличить амплитуду переменного сигнала, но до какой величины? Мы показываем, что амплитуда переменного напряжения должна быть в $\sqrt{2}$ больше значения постоянного напряжения, чтобы рассеять ту же среднюю мощность в сопротивлении.

Таким образом, в предыдущем примере следовало бы применить переменное напряжение амплитудой 14 В , чтобы нагрев был как при постоянном напряжении в 10 В . Говорят, что сигнал амплитуды 14 В имеет «эффективное напряжение» в 10 В : он рассеивает такую же среднюю мощность в сопротивлении, что и постоянное напряжение в 10 В .

Для переменного сигнала эффективное напряжение в $\sqrt{2}$ раз слабее, чем амплитуда (амплитуда 14 В соответствует эффективному напряжению 10 В).

На практике, когда мы задаем величину напряжения для переменного сигнала, речь почти всегда идет об эффективном напряжении, которое имеет наиболее полезный физический смысл. Таким образом, напряжение 220 В в наших электрических розетках является эффективным напряжением: на самом деле это напряжение колеблется между -311 В и $+311 \text{ В}$, но поставляет ту же мощность в наши электроплиты, что и постоянное напряжение в 220 В .

То, что мы сказали о напряжении, применимо и к силе тока: переменная сила тока с амплитудой $0,14 \text{ А}$ соответствует «эффективной силе тока» в $0,1 \text{ А}$: она рассеивает ту же мощность в сопротивлении, что и постоянная сила тока в $0,1 \text{ А}$.

Далее мы будем обозначать U и I эффективные напряжение и силу тока, связанные с сигналами u и i , колеблющимися переменным образом.

4. Самоиндукция

Отношение «сила тока – напряжение» в катушке

Изменение магнитного поля в катушке приводит к появлению индукционного тока, который создает магнитное поле, противодействующее этому изменению.

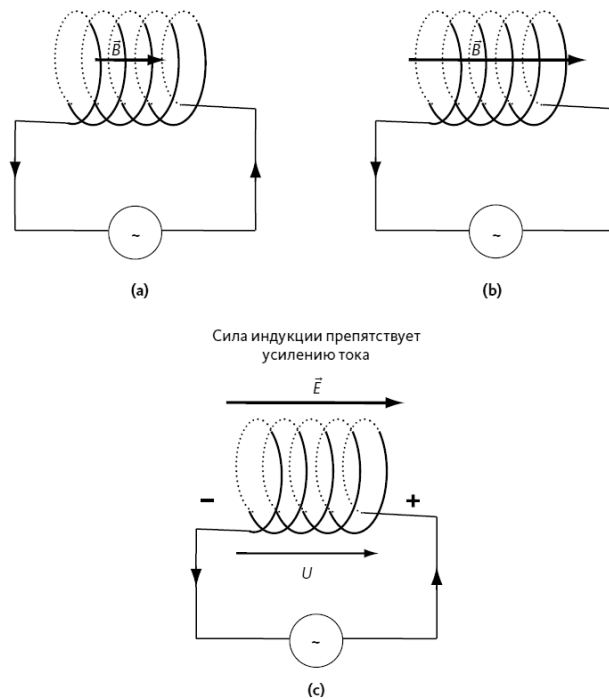


Рис. 16.9 – Самоиндукция в катушке

Между (а) и (б) сила тока в катушке увеличивается (переменный ток), то есть магнитное поле увеличивается. Это изменение $B \rightarrow$; приводит к появлению индукционного электрического поля, которое препятствует изменению тока (с). Накопление зарядов на концах катушки, которое за этим следует, образует напряжение, пропорциональное изменению силы тока за единицу времени.

Подключим теперь к катушке переменный ток (достаточно соединить ее, например, с генератором). Сила тока в катушке имеет поочередно положительные и отрицательные значения: таким образом, магнитное поле, созданное этим током, тоже переменное.

Когда сила тока увеличивается в сторону положительных значений, магнитное поле увеличивается вправо ($\rightarrow$ рис. 16.9). То есть это равносильно тому, как если бы мы приблизили северный полюс магнита слева. Катушка реагирует на увеличение магнитного поля, которое она сама создала. Там возникает сила индукции, препятствующая увеличению магнитного поля, то есть препятствующая усилению тока.

Речь идет о явлении самоиндукции: запомним, что катушка препятствует любому изменению тока, проходящего через нее, с помощью индукции.

Если точнее: сила индукции относится к «электрическому» типу, то есть изменение магнитного поля вызывает появление электрического поля в катушке. Это электрическое поле стремится накапливать положительные заряды на одном конце катушки и отрицательные – на другом. Таким образом, создается потенциал, то есть напряжение на концах катушки.

Напряжение пропорционально электрическому полю, которое, в свою очередь, пропорционально изменению магнитного поля за единицу времени (явление электромагнитной индукции), которое, в свою очередь, пропорционально изменению силы тока за единицу времени.

Таким образом, напряжение пропорционально изменению силы тока в катушке за единицу времени. Коэффициент пропорциональности называется индуктивностью и обозначается L .

Индуктивность катушки

Чем больше в центре катушки создается магнитное поле, тем мощнее сила индукции и, следовательно, тем сильнее она стремится помешать любому изменению тока: индуктивность катушки становится сильнее.

Чтобы увеличить индуктивность катушки, необходимо, во-первых, увеличить число колец: они имитируют единое кольцо, по которому проходит очень мощный ток, то есть это усиливает магнитное поле катушки.

Другая хитрость для повышения индуктивности состоит в том, чтобы поместить внутрь катушки какой-нибудь парамагнетик. Напомним, что такое вещество намагничивается в присутствии внешнего магнитного поля, потому что все электроны начинают вращаться в одном направлении. Таким образом, вещество становится магнитом и создает магнитное поле, направленное точно в сторону внешнего магнитного поля (→ **рис. 16.10**). Таким образом, общее магнитное поле становится больше. Это позволяет увеличить магнитное поле, созданное катушкой, а следовательно, увеличить ее индуктивность.

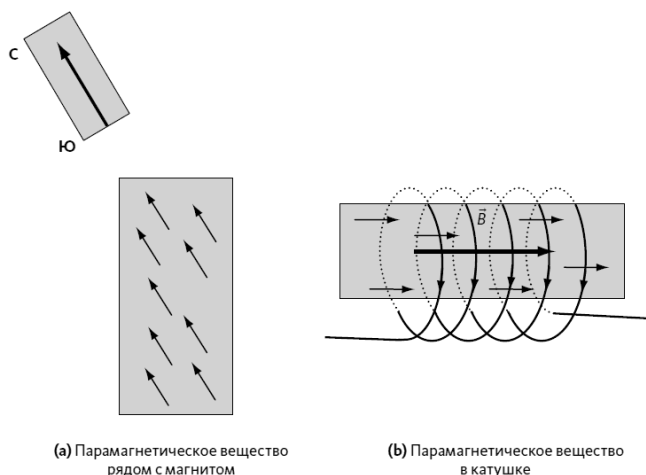


Рис. 16.10 – Расширение магнитного поля с помощью парамагнетика

(а) – все маленькие магниты, которыми являются атомы вещества, направлены в одну сторону под влиянием внешнего магнита. Это создает дополнительное магнитное поле, направленное в ту же сторону, что и поле внешнего магнита.

(б) – аналогично магнитное поле, созданное катушкой, намагничивает парамагнитное вещество. Это создает дополнительное магнитное поле, направленное в ту же сторону, что и поле, созданное катушкой. В итоге общее магнитное поле усиливается.



ЭНЕРГИЯ КАТУШКИ

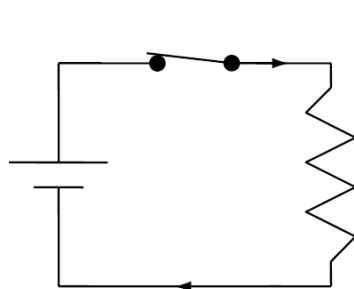
Когда катушка соединена с батареей, внутри нее создается постоянный ток. Если мы остановим движение тока, открыв ключ, мы увидим искру, возникшую в ключе (→ **рис. ниже**).

Эта искра возникает из-за того, что катушка препятствует любому внезапному уменьшению силы тока: она заставляет свободные электроны продолжать двигаться по цепи, хотя она была прервана. Теперь электроны могут только накапливаться на ключе. За долю секунды заряд становится таким большим, что возникает молния (см. главу 13): воздух ионизируется и становится проводником, способствуя резкому прохождению тока.

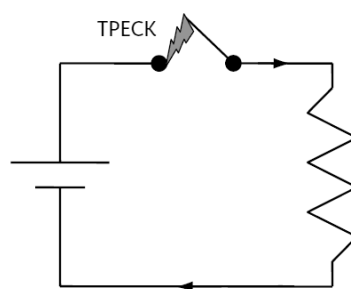
Эту молнию создает катушка, то есть она обладает энергией, которая затем рассеивается в молнии. Энергия, накопленная в катушке, выражается:

$$E = \frac{1}{2}Li^2 \text{ (где } L \text{ – индуктивность, а } i \text{ – сила тока).}$$

Действительно, мощность, полученная катушкой, равна $P = ui$. Между тем напряжение пропорционально изменению силы тока i за единицу времени: $u = L(di/dt)$ (явление самоиндукции). Полученная мощность записывается как $P = Li(di/dt)$, объединив обе формулы, получаем $= \frac{1}{2}Li^2$.



(а) По катушке проходит ток, энергия накапливается



(б) Катушка заставляет ток циркулировать, создавая молнию в ключе: энергия высвобождена



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Индукционный ток – это ток, созданный магнитным полем. Различают, с одной стороны, индукцию, созданную движением зарядов в статическом поле, с другой стороны, индукцию, созданную изменяемым магнитным полем.
- Любое изменение магнитного поля вызывает «силу индукции», которая приводит в движение заряды. Эта сила относится к «электрическому типу», потому что она не зависит от движения зарядов, на которые воздействует.
- Индукционный ток в катушке создает магнитное поле, которое препятствует изменению магнитного поля, его породившего.
- Электромагнитная индукция лежит в основе работы генераторов переменного тока, сердца электростанций. Генератор создает переменное напряжение, которое образует переменный ток, как только его подключают к цепи.
- Эффективное напряжение соответствует амплитуде, поделенной на $\sqrt{2}$, для переменного сигнала: по определению, постоянное напряжение такого значения рассеяло бы такую же среднюю мощность в сопротивлении. Такое же определение имеет и эффективная сила тока.
- Переменный ток в катушке создает переменное магнитное поле: сила индукции появляется, чтобы помешать изменению этого поля. Таким образом, создается переменное напряжение на концах катушки, которая стремится помешать изменению тока. Это явление называется самоиндукцией.
- Напряжение катушки пропорционально изменению силы тока за единицу времени. Коэффициент пропорциональности называется индуктивностью.
- Чтобы увеличить индуктивность катушки, можно увеличить число ее колец или поместить парамагнетик в ее центр.

17. Применение электромагнитной индукции

В продолжение предыдущей главы данный раздел представляет некоторые виды применения электромагнитной индукции: мы начинаем с принципа работы микрофонов и громкоговорителей, затем поговорим о роли трансформаторов в изоляции или усилении. Нам представится случай объяснить целесообразность передачи электрической энергии с помощью линий высокого напряжения. Наконец, мы опишем явление резонанса и объясним, как сделать природные электрические осцилляторы. Мы расскажем о различных видах применения этих осцилляторов, таких как аудиопроцессоры или радиоприемники.

1. Микрофоны и громкоговорители

Цель микрофона – уловить звуки и преобразовать их в электрические сигналы. Однако мы уже знаем, что звук связан с вибрацией воздуха. В ухе барабанная перепонка вибрирует от чередования высокого и низкого давления. Тот же принцип действия и в микрофоне, мембрана играет роль барабанной перепонки.

Как превратить колебания мембраны в электрический сигнал? С помощью электромагнитной индукции, конечно! Достаточно, например, объединить мембрану с магнитом, один из полюсов которого будет направлен к катушке. Когда магнит колеблется под действием звука, магнитное поле колеблется внутри катушки, что создает индукционный ток (→ рис. 17.1).

В звуке высокие частоты соответствуют быстрой вибрации воздуха (до 20 000 в секунду), а низкие «медленной» (около 20 в секунду). Таким образом, любой звук можно рассматривать как сумму переменных вибраций очень разных частот. С помощью микрофона мы получаем электрическое напряжение, которое колеблется так же, как сумма синусоид весьма разнообразных частот. В конечном итоге микрофон является не чем иным, как несколько необычным электрогенератором.

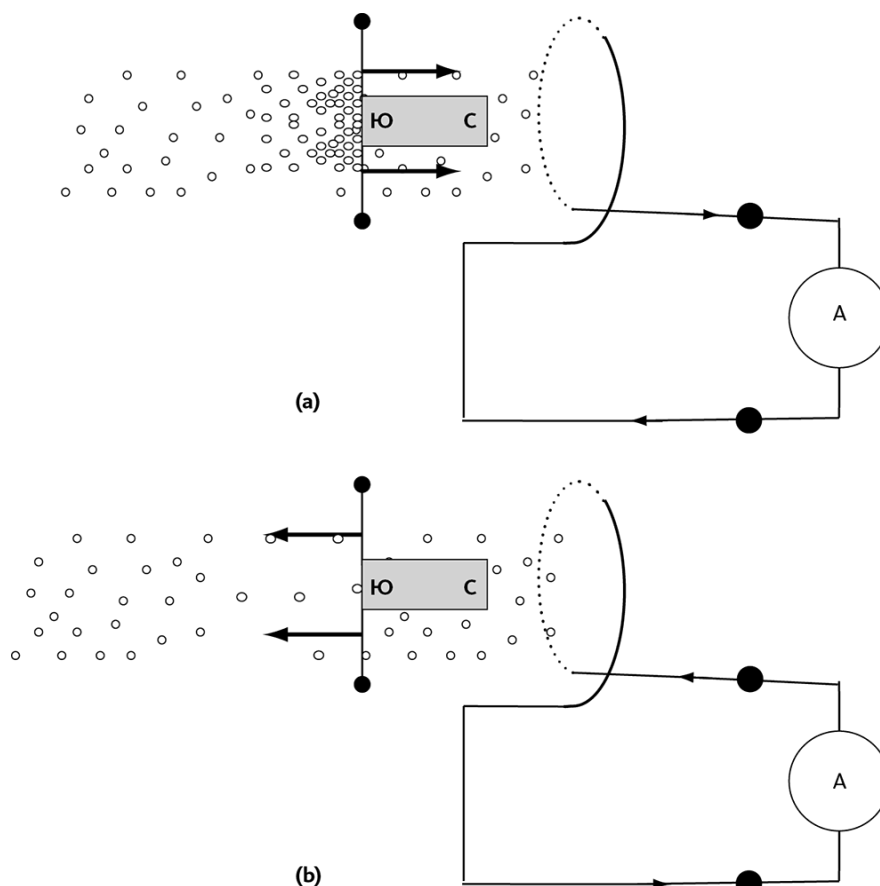


Рис. 17.1 – Принцип действия микрофона

(а) – зона высокого давления находится перед мембраной микрофона, что направляет действие силы вправо. Эта сила ускоряет действие магнита вправо: с помощью электромагнитной индукции ток усиливается по мере того, как увеличивается скорость магнита.

(б) – зона низкого давления, следующая за высоким давлением, достигает мембраны, создавая противоположно направленную силу: ток будет уменьшаться, пока не сменит направление в цепи. В конечном счете переменные вибрации воздуха создают переменный ток в цепи. Отметим, что на практике в настоящем микрофоне магнит скорее неподвижен, а двигается катушка вместе с мембраной.

Когда звук преобразован в электрический сигнал, можно приступить к его трансформации (часть III, «Осцилляторы»), можно передавать его на большие расстояния или записывать.

Как же в конце восстановить звук? Точно таким же способом: воспользоваться методом, представленным на **рис. 17.1**, только «наоборот»: колеблющийся электрический сигнал проходит по катушке, что создает колеблюмое магнитное поле. Под действием магнитной силы оно заставит колебаться магнит, соединенный с мембраной: колебание мембраны заставит колебаться окружающий воздух, создавая высокое и низкое давление подобно нашим голосовым связкам. Таким образом, мы преобразовали электрический сигнал в звуковой – таков принцип действия громкоговорителя (как и в микрофоне, магнит скорее неподвижен, а двигается катушка, но принцип остается тем же).

Из предыдущего описания мы можем убедиться, что громкоговоритель является микрофоном: между ними нет никакой разницы. В одном случае прибор служит рецептором, а в другом – передатчиком. Такой аппарат, имеющий возможность работать и как микрофон, и как громкоговоритель, называется «трансдуктор», или магнитный усилитель.

Конечно, на практике микрофоны больше предназначены для приема звуков, а громкоговорители для их передачи, то есть, если мы хотим, чтобы система хорошо работала, не стоит переделывать микрофон в громкоговоритель.

2. Трансформаторы

Принцип действия

Магнитная структура трансформатора

Если мы расположим четыре вращающихся магнита в форме квадрата, они естественным образом повернутся так, как показано на **рис. 17.2**: магниты повернуты друг к другу противоположными полюсами. Заменим три магнита справа на три бруска парамагнетика: внутренние «кольца» (электроны, вращающиеся в атомах), будучи маленькими магнитами, вращаются в том же направлении под действием магнита слева. Таким образом, три бруска намагничиваются так, что их противоположные полюса смотрят друг на друга. Мы получаем ту же конфигурацию, что и на **рис. 17.2**.

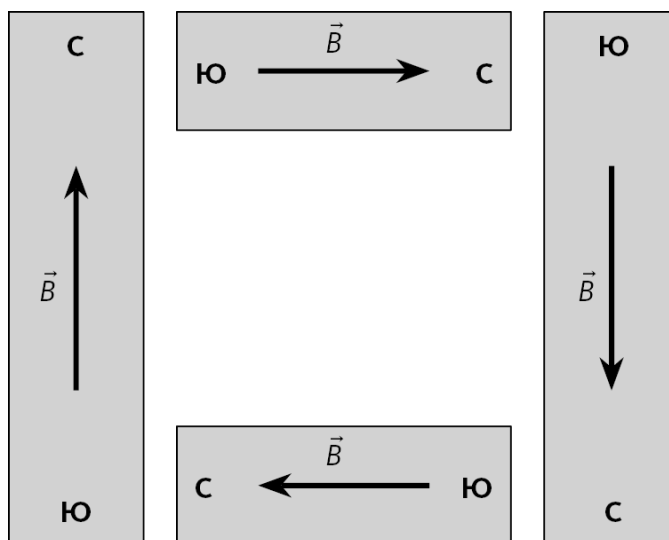


Рис. 17.2 – Вращающиеся магниты, расположенные в форме квадрата

Магниты вращаются естественным образом, чтобы повернуться друг к другу противоположными полюсами. Из-за этого кажется, что магнитное поле проходит по периметру квадрата. Если заменить три магнита справа парамагнетиками, они будут намагничиваться друг за другом от присутствия магнита слева, пока не станут магнитами, расположенными точно таким же образом.

Теперь заменим брусок слева парамагнетиком, обернутым проводом, по которому проходит электрический ток ($\rightarrow$ **рис. 17.3**): брусок слева становится магнитом. Ситуация вновь такая же, как на **рис. 17.2**.

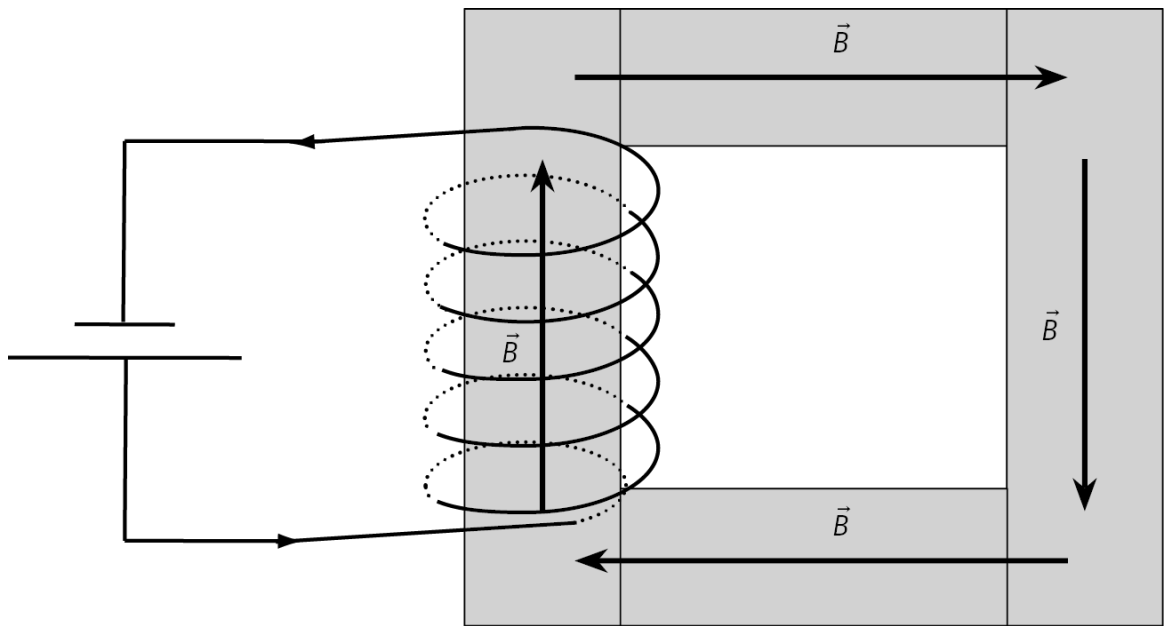


Рис. 17.3 – Намагничивание парамагнитных брусков, расположенных в форме квадрата

Брусек слева ведет себя как магнит, потому что в его центре катушка, по которой проходит ток. Все бруски намагничиваются по очереди под его воздействием, пока не расположатся так, как показано на рис. 17.2.

На рис. 17.3 брусок справа намагничен: намагничивание происходит от одного бруска к другому от того, внутри которого катушка. Мы видим, что катушка сама представляет собой мощный магнит, чья сила распространяется далеко за пределы катушки, образуя широкий квадрат.

Взаимное влияние электрических цепей

Обернем другой электропровод вокруг бруска справа, чтобы получилась новая катушка (→ рис. 17.4). Таким образом, магнитное поле находится внутри этой катушки, но, поскольку это поле не изменяется, в катушке не возникает ток.

Пустим в катушку справа переменный ток: это создаст изменяемое магнитное поле внутри ее. Это поле будет переходить от одного бруска к другому, пока не достигнет правого – это создаст в правой катушке индукционный ток. Уровень силы тока зависит от изменения магнитного поля, которое колеблется переменным образом. Можно с легкостью продемонстрировать, что созданный ток тоже переменный.

В конечном итоге мы видим, что переменный ток в цепи слева вызывает появление переменного тока в цепи справа, в то время как между цепями нет никакого контакта. Две цепи взаимодействуют только с помощью магнитного поля в парамагнетике.

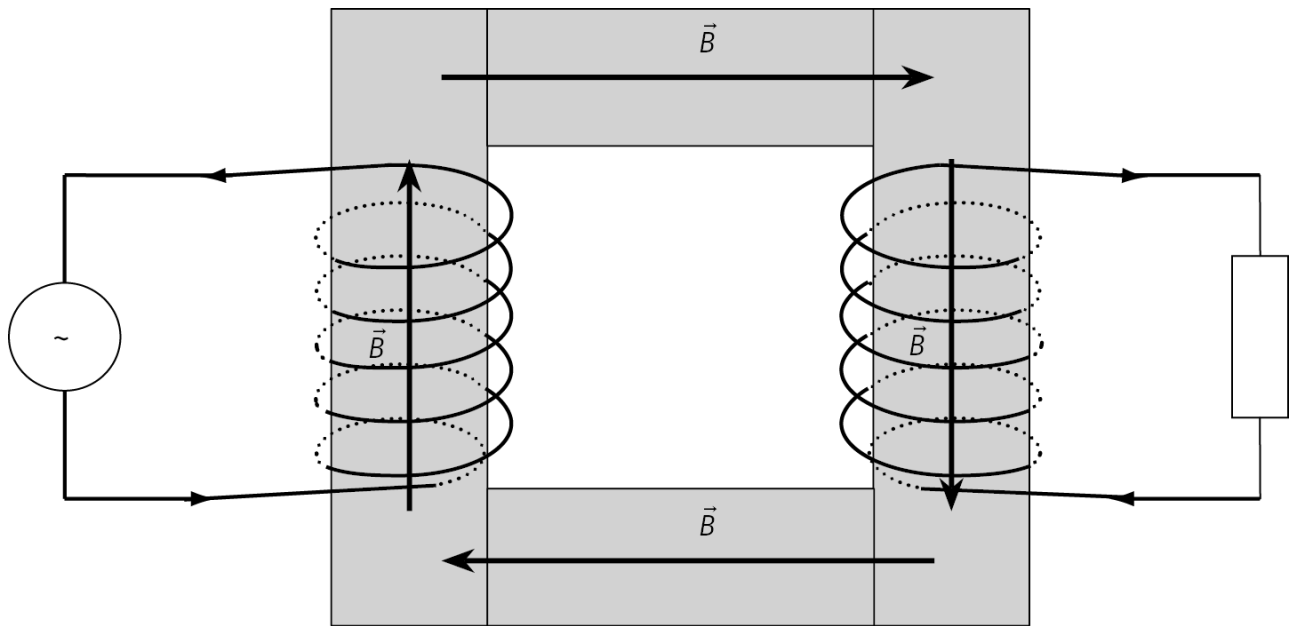


Рис. 17.4 – Принцип работы трансформатора

Ток первичной цепи (слева) создает магнитное поле в парамагнетике. Это влечет намагничивание всего квадрата парамагнетиков, как на рис. 17.3. Ток возникает во вторичной цепи (справа) при малейшем изменении магнитного поля (электромагнитная индукция).

На самом деле токи в первичной и вторичной цепях тесно связаны, поскольку они оба влияют на магнитное поле в парамагнитном квадрате.

Мы создали трансформатор. Цепь слева называют первичной, а цепь справа – вторичной: ток во вторичной цепи создан током в первичной.

Заметим, что ток во вторичной цепи тоже создает магнитное поле в правом бруске, которое сказывается на бруске слева и нарушает ток в первичной цепи. Таким образом, токи в первичной и вторичной цепях воздействуют друг на друга под влиянием электромагнитной индукции. Магнитное поле в парамагнетике является результатом влияния вторичной цепи, так же как и первичной.

Отношение напряжения и силы тока

Выражение силы тока

Предположим, что мы закрутим одно-единственное кольцо на первичной и на вторичной цепи. Магнитное поле одинаково колеблется в обоих кольцах (магнитное поле одинаково во всех парамагнетиках). То есть ток в обоих кольцах колеблется одинаково благодаря явлению электромагнитной индукции. Это значит, что в любой момент сила тока в первичной цепи равна силе тока во вторичной.

Предположим теперь, что мы закрутили в первичной цепи одно поверх другого 10 колец, по которым проходит ток силой 0,1 А: это равносильно одному кольцу, сила тока которого 1 А (10 колец по 0,1 А). Как мы только что видели, такова сила тока 1 А в кольце вторичной цепи. Поскольку во вторичной цепи всего одно кольцо, сила тока в 1 А содержится в одном проводе и во второй электрической цепи.

В конечном итоге, увеличив число колец в десять раз в первичной цепи по сравнению со вторичной, мы в десять раз увеличили силу тока благодаря трансформатору. Можно обобщить этот результат: отношение силы тока между первичной и вторичной цепями обратно отношению числа колец. Это записывается как $i_2 i_1 = N_2 / N_1$ (где N_1 и N_2 – число колец в первичной и вторичной цепи, а i_1 и i_2 – соответственно переменная сила тока).

Отношение напряжений

В первичной цепи энергия, переданная генератором трансформатору, подразделяется на две части:

- одна часть поглощается двумя катушками трансформатора;
- одна часть переходит в трансформатор вторичной цепи.

На практике во время работы трансформатора поглощенная энергия очень мала по сравнению с «потребленной» энергией вторичной цепи. Таким образом, вся энергия, отданная первичной цепи, оказывается во вторичной. В любой момент мощность $p = ui$, полученная катушкой первичной цепи, равна мощности, отданной катушке вторичной цепи, то есть $u_1 i_1 = u_2 i_2$.

Отношение напряжений в трансформаторе, таким образом, обратно отношению силы тока $u_2/u_1 = i_1/i_2$ или $u_2/u_1 = N_2/N_1$.

Увеличив число колец во вторичной цепи в десять раз, мы получаем напряжение в десять раз больше, чем в первичной цепи, но силу тока в десять раз меньше. Таким образом, никакая энергия не была ни создана, ни уничтожена.

Отметим, что вышеупомянутое отношение силы тока и напряжения действительно в любой момент, то есть мы можем сделать такие же выводы относительно *эффективного* напряжения и силы тока.

Силовые линии высокого напряжения

Трансформатор прежде всего служит для повышения или понижения напряжения. Для чего нужно повышать напряжение, если не увеличивается энергия?

Это необходимо, в частности, когда мы хотим передать электричество на очень большое расстояние (линии высокого напряжения). Чем длиннее провод, тем больше сопротивление (сопротивление пропорционально длине проводника), тем выше энергетические потери в проводах, и важно уменьшить их любыми возможными средствами.

Уточним: допустим, что жители города потребляют определенное количество электрической мощности с помощью приборов, совместимых с сопротивлением. Это соответствует $P = UI$ (где U – напряжение в электророзетке, а I – сила тока). Если мы решаем увеличить напряжение U , это позволяет на столько же уменьшить силу тока I в цепи.

Между тем мощность, рассеянная в тепловом виде в линии электропередачи, равна $P_l = RI^2$ (где R – сопротивление линии, а I – сила тока этой линии). Таким образом, уменьшение I при увеличении U позволяет значительно снизить энергетические потери. Например, при умножении напряжения на десять сила тока делится на десять, а рассеянная мощность линии делится на сто.

На практике выбор высокого напряжения необходим, когда речь идет об очень больших расстояниях (сильное напряжение) и когда требуемая мощность $P = UI$ очень высока (большое число потребителей). Трансформаторы позволяют увеличить напряжение на сотни тысяч вольт на выходе электроцентралей: чем чаще линия электропередачи подразделяется на многочисленные местные линии, питающие города, тем больше мы можем позволить себе уменьшить напряжение (расстояния меньше, и число домов меньше). Это тоже делается с помощью трансформаторов, пока напряжение в наших розетках не достигнет величины 220 В.

3. Осцилляторы

Естественное колебание в цепи

Взаимодополняемость катушки и конденсатора

Проясним ситуацию насчет двух электрических составляющих, о которых мы заговорили: конденсаторе и катушке.

- Заряд конденсатора пропорционален напряжению на его зажимах ($Q = CU$). Если ток поступает на обкладку конденсатора, это значит, что заряды накапливаются, то есть напряжение увеличивается: изменение напряжения за единицу времени пропорционально силе тока.

- С другой стороны, мы видели, что напряжение на концах катушки было пропорционально изменению силы тока за единицу времени, благодаря явлению самоиндукции.



КАТУШКА И КОНДЕНСАТОР

Математическое отношение между силой тока и напряжением записывается:

$i = C(du/dt)$ в конденсаторе

$u = L(di/dt)$ в катушке.

Из этих двух формул мы прекрасно видим, что катушка и конденсатор являются двумя взаимодополняемыми электрическими составляющими.

Естественные колебания установки «конденсатор + катушка»

Теперь подключим заряженный конденсатор напрямую к катушке в электрической цепи (→ **рис. 17.5**). При наличии зарядов в конденсаторе для движения тока нет никаких препятствий: свободные электроны спешат покинуть обкладку «минус», чтобы достичь обкладки «плюс» конденсатора, пройдя *через* катушку.

Трудность в том, что катушка стремится помешать такому усилению тока: сила тока не может повышаться скачками. Будучи изначально нулевой, она повышается *постепенно*, а не мгновенно.

Усиление тока прекращается, как только заряды в конденсаторе уравниваются, то есть как только напряжение конденсатора становится нулевым (→ **рис. 17.5.b**). Но на этот раз сила тока не может мгновенно стать нулевой, потому что катушка препятствует ее снижению. Таким образом, ток уменьшается *постепенно*, а не мгновенно.

Это означает, что катушка заставляет заряды продолжать движение, когда конденсатор уже разряжен, то есть заряды вновь будут скапливаться на обкладках конденсатора, но в противоположном направлении.

В каком-то смысле электроны изначально перемещались от «минуса» к «плюсу», чтобы компенсировать заряды, но, «захваченные собственным порывом» (из-за катушки), они создают избыток отрицательных зарядов на обкладке, которая изначально была положительной. Обкладки конденсатора вновь заряжаются, но с противоположным знаком.

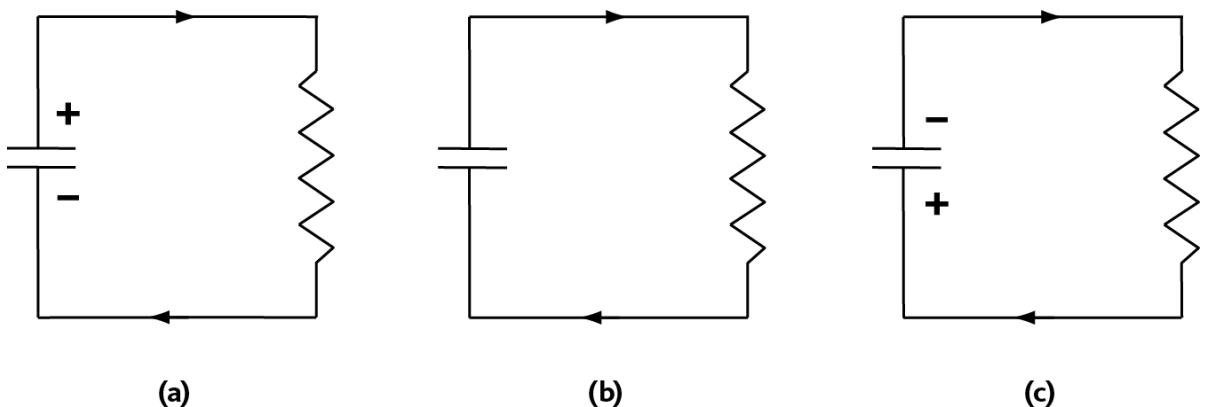


Рис. 17.5 – Катушка на концах заряженного конденсатора

(a) – конденсатор вызывает появление тока, идущего от «плюса» к «минусу». Благодаря этому току заряды в конце концов уравниваются – (b): в этот момент ток не может исчезнуть мгновенно, потому что катушка препятствует этому благодаря самоиндукции. Таким образом, ток продолжает переносить заряды от одной обкладки к другой: он приносит слишком много положительных зарядов на отрицательную обкладку, и наоборот (c). Когда ток

наконец угасает, конденсатор оказывается заряженным вновь, но «наоборот»: цикл может возобновиться.

В конечном итоге электроны скапливаются на обкладке, чей отрицательный заряд становится все сильнее: отталкивание отрицательных зарядов, которое за этим следует, тормозит свободные электроны и снижает силу тока в цепи. Когда сила тока наконец становится нулевой, то конденсатор оказывается полностью перезаряженным, но заряды поменялись местами (→ **рис. 17.5.с**). Ситуация аналогична первоначальной, и можно переходить к новому циклу.

Мы видим, что напряжение конденсатора, изначально положительное, становится отрицательным (противоположные заряды), пройдя через промежуточное нулевое значение. Так оно и будет продолжать колебаться между положительными и отрицательными значениями: это можно более точно изобразить на графике синусоиды (→ **рис. 17.6**).

Аналогично начальная нулевая сила тока повысилась до положительного значения, потом снова стала нулевой. В следующем цикле она, наоборот, приобретет отрицательное значение, поскольку заряды конденсатора поменялись на противоположные. Можно продемонстрировать, что сила тока также колеблется синусоидально, как и напряжение.

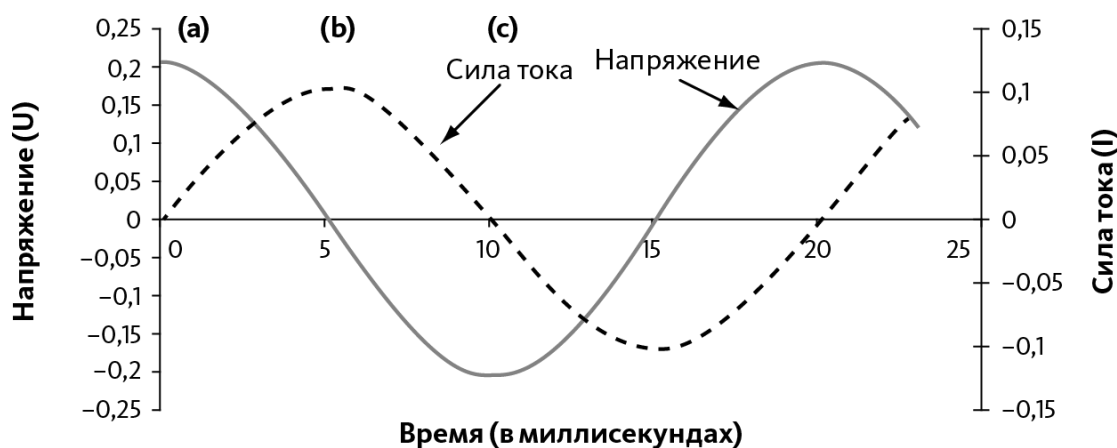


Рис. 17.6 – Напряжение и сила тока в цепи «конденсатор + катушка»

Вначале (**а**) напряжение высокое (конденсатор заряжен) и сила тока нулевая (катушка препятствует любому резкому изменению силы тока). Сила тока увеличивается постепенно, что позволяет конденсатору мало-помалу разрядиться. На рис. (**б**) конденсатор разряжен (напряжение нулевое), но катушка заставляет ток продолжать движение (сила тока остается высокой). По мере того как заряды накапливаются на обкладках конденсатора (напряжение все больше и больше отрицательное), сила тока уменьшается, пока не станет нулевой (**с**). Таким образом, цикл бесконечно повторяется. Можно сравнить этапы (**а**), (**б**) и (**с**) с **рис. 17.5**.

Иначе говоря, простая установка конденсатора и катушки друг против друга вызывает синусоидальные изменения напряжения и силы тока в цепи. Во время этих колебаний энергия конденсатора временно передается катушке, которая затем вновь отдает ее конденсатору.

Отметим, что в реальности в проводах существует сильное сопротивление: по мере этих колебаний энергия рассеивается по проводам в виде тепла. Мало-помалу энергия в цепи уменьшается, и конденсатор не перезаряжается полностью на каждом цикле: напряжение и сила затухают во время колебаний, пока не исчезнут полностью.

Аналогия с колебаниями маятника

Проведем аналогию с более привычными колебаниями. Если вы подвесите шарик на веревку, привязанную к потолку, и отпустите его, предварительно отклонив в сторону, вы увидите, как шарик колеблется. Вес придает шарiku ускорение, направленное вниз, то есть до тех пор, пока «маятник» не станет вертикальным. Однако когда вертикальное положение достигнуто, шарик уже обладает большой скоростью, и инерция заставляет его снова подняться вверх с другой стороны, невзирая на вес, который этому препятствует. В конечном итоге шарик достигнет высоты близкой к первоначальной, но с другой стороны, и снова будет готов повторить тот же цикл...

Здесь также речь идет о синусоидальном колебании (если амплитуда колебаний остается слабой). Если вмешивается трение воздуха, энергия будет мало-помалу рассеиваться в виде тепла: шарик не достигнет точно такой же высоты, и колебания постепенно сойдут на нет, пока шарик не остановится.

Как мы убедились, это прекрасная аналогия с процессами в электрической цепи. В электричестве сопротивление заменяет трение, чтобы погасить колебания. Катушка (индуктивность) заменяет инерцию (массу), препятствуя всякому ускорению или резкому торможению. А конденсатор (емкость) заменяет тяжесть, приводящую в движение.

Резонанс и его применение

Колебания фонаря

Продолжим аналогию, взяв как пример фонарный столб: если вы толкнете его, фонарь начнет циклично качаться, пока движение не прекратится. Это еще один пример осциллятора. Если не обращать внимания на затухание, естественная частота, с которой происходят колебания, называется собственной частотой.

Но предположим, что вы хотите, чтобы он качался с амплитудой все большей и большей, пока (если возможно) не ляжет на землю. Как это сделать?

Лучший способ – повторять движение: во время колебания, когда столб качнется в одну сторону, нужно применить силу, направленную туда же, чтобы усилить движение. В то время как фонарь качается, необходимо применять силу то в одну, то в другую сторону. Приложенная сила будет в этом случае «в фазе» с естественным колебанием столба.

Мы видим, что приложенная сила должна обязательно колебаться *с той же частотой*, что и столб. В этом случае говорят, что возник резонанс.

Явление резонанса зачастую является неудобством, потому что нечаянно может привести к поломке системы. Поэтому военным запрещается идти в ногу по мосту: как только частота шагов совпадет с естественной частотой колебаний моста, он начнет вибрировать все сильнее, пока не упадет.

Та же проблема существует у любого объекта, подверженного сильной вибрации (как, например, у ракеты во время взлета).

Резонанс и электричество

Это небольшое отступление позволит понять некоторые важные способы применения электричества. Мы видели, что в цепи, где есть катушка и конденсатор, наблюдаются естественные колебания напряжения и силы тока с конкретной собственной частотой. Но подключим теперь эти два компонента к генератору переменного напряжения (**→ рис. 17.7**), то есть сейчас мы делаем с цепью то же самое, что и с фонарным столбом, чтобы заставить его колебаться.

Здесь мы *навязываем* частоту колебаний цепи, тогда как она хочет колебаться с собственной частотой (своей естественной частотой). Лучшее средство для усиления колебаний цепи – сделать так, чтобы частота генератора соответствовала собственной частоте цепи: в этом случае генератор «вторит» естественным колебаниям цепи, как мы только что «вторили» колебаниям фонаря. Перед нами резонанс: при этом амплитуда колебаний в цепи значительно увеличивается.

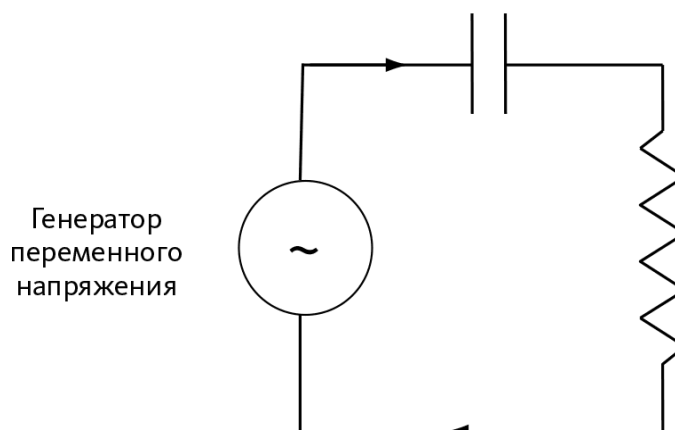


Рис. 17.7 – Принудительные колебания в электричестве

Максимальная амплитуда, которой можно достичь, ограничена сопротивлением проводов: чем сильнее колебание, тем больше энергии рассеивается в виде тепла. При определенной величине амплитуды энергия, принесенная генератором, перестает усиливать колебания, а только нагревает провода.

Применение резонанса

Как можно применить явление резонанса в электричестве? Предположим, что вы записывали музыкальный отрывок с помощью микрофона и захотели стереть фальшивую ноту. Каждая нота производит звук, то есть «колебание воздуха», который вибрирует с определенной частотой. Чем выше нота, тем больше частота колебаний. Микрофон лишь берет на себя задачу превратить это колебание в переменный электрический сигнал.

При записи музыки общий электрический сигнал является совокупностью большого числа переменных сигналов, соответствующих всем этим нотам, перекрывающим друг друга.

Как удалить фальшивую ноту? Можно поместить сигнал в начале электрической цепи, содержащей катушку и конденсатор. Можно показать, что собственная частота такой цепи зависит от величины индуктивности катушки и емкости конденсатора. То есть их можно отрегулировать так, чтобы естественные колебания цепи совпали с частотой фальшивой ноты.

Тогда цепь усилит сигнал с такой частотой (резонанс) настолько, что амплитуды других частот станут незначительными: мы «выявили» фальшивую ноту. Появилась возможность удалить ее из сигнала в самом начале.

Разумеется, этот упрощенный пример скрывает более сложную реальность, но он иллюстрирует большую пользу катушек и конденсаторов в электричестве. В целом конденсаторы и катушки позволяют воздействовать на частоты колебаний, усиливая или ослабляя некоторые из них, что называется электрофильтрами.

Уточним, что с появлением информационных технологий способ работы со звуком и изображением сильно изменился (глава 19). Главным местом применения фильтров сейчас остается прием и передача радиоволн.

В части, посвященной оптике и излучениям, мы увидим, что «радиоволны» можно преобразовать в электрический сигнал с помощью простой антенны. Однако мы постоянно погружены в «океан» радиоволн, исходящих от большого количества разных радиостанций. Каждая радиостанция использует волны определенной частоты (например, *France Info* использует частоту 105,5 МГц). Но волны всех станций одновременно достигают наших радиоприемников. Как же выбрать ту, которую хочется?

Простой фильтр типа «конденсатор+катушка» позволяет этого добиться: если индуктивность и емкость конденсатора отрегулированы так, что цепь «естественно» колеблется с частотой 105,5 МГц, радиоволна, работающая на этой частоте, естественным образом усилится, в то время

как другие частоты станут слабыми. Так радиоприемник «выбрал» частоту *France Info*, отвергнув другие, как мы выбрали фальшивую ноту в предыдущем примере.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Электромагнитная индукция лежит в основе работы микрофона, который преобразует вибрацию воздуха в электрические колебания. Микрофон может также служить громкоговорителем, если его использовать как передатчик. Аппарат, способный работать как приемник и как передатчик, называется трансдуктором.
- Трансформатор состоит из двух катушек, которые с одной и с другой стороны обвиты кольцом парамагнетика. Благодаря электромагнитной индукции переменный ток в цепи, соединенный с катушкой слева (первичной), вызывает переменный ток в цепи, соединенной с катушкой справа (вторичной). Оба тока оказывают друг на друга взаимное влияние.
- В трансформаторе отношение между двумя катушками равно отношению количества колец. Отношение силы тока обратно этому отношению.
- Соединение конденсатора и катушки в цепи естественным образом создает переменное колебание тока и напряжения с частотой, называемой «собственная частота» (если не брать в расчет затухание). Если добавить генератор переменного напряжения, амплитуда тока максимальна, когда частота генератора равна собственной частоте – это явление резонанса.
- Роль катушек и конденсаторов в выборе частоты может быть использована, например, в аудиопроцессорах или при передаче или приеме радиоволн. В широком смысле речь идет об электрических «фильтрах».

18. Транзисторная революция

В предыдущих главах основы электромагнетизма позволили нам понять многие аспекты одной из его дочерних дисциплин – электричества. До сих пор объектом нашего внимания была аналоговая электроника. Между тем в течение последних десятилетий цифровые технологии во многих областях заменили аналоговые: их изучение и будет целью данной главы. Ключевым компонентом, лежащим в основе этой революции, является транзистор, который, в частности, составляет основу компьютеров. Чтобы понять, как он работает, нам нужно будет описать материалы, обладающие чрезвычайной важностью, – полупроводники. Нам также представится случай рассказать о принципе работы и пользе другой составляющей электроники – диода. Наконец, мы объясним значение цифровых технологий в повышении качества сигналов и информатике.

1. Полупроводники

Пара электрон – дырка

Поведение полупроводников на микроскопическом уровне

До сих пор мы четко различали понятия диэлектрика и проводника. Проводники состоят из атомов, вокруг которых вращаются электроны. Некоторые из этих электронов способны естественным образом отделяться под действием соседних атомов: этот электрон может свободно перемещаться, переходя от одного атома к другому (подобно молекулам в жидкости). Перемещаясь, эти свободные электроны могут создавать в проводнике ток.

Существуют материалы промежуточные между диэлектриками и проводниками – полупроводники. В таких материалах электроны атомов остаются электростатически связанными со своими атомами, потому что близости соседних атомов недостаточно, чтобы полностью разорвать эту связь. В этом случае электроны могут покинуть свой атом, только если у них достаточно энергии, чтобы это сделать: на практике все зависит от температуры окружающей среды.

Если температура достаточно высока, столкновения между атомами могут дать необходимую энергию, чтобы некоторые электроны освободились от своих атомов. В этом случае говорят, что свободные электроны переходят из зоны валентности в зону проводимости: поскольку эти электроны могут перемещаться, в веществе может возникнуть ток.

Мы видим, что полупроводники являются проводниками в большей или меньшей степени в зависимости от температуры. Обычной температуры может хватить, чтобы освободить достаточно электронов, но сопротивление полупроводников остается таким же высоким, как и у проводников. Наиболее часто используемым элементом, из которого можно получить полупроводник, является кремний.

Различные носители заряда

В главе 22 мы увидим, что кремний обладает четырьмя «валентными электронами»: это самые внешние электроны атома, те, которым легче всего освободиться. Если температура достаточно высока, некоторые из этих электронов могут освободиться и перемещаться в веществе: там, где раньше был электрон, у атома образуется «дырка». В таких случаях говорят, что образовалась пара электрон – дырка (→ **рис. 18.1.а**).

Атом, в котором образовалась дырка, становится положительно заряженным. В отличие от свободного электрона, который заряжен отрицательно, этот атом не может перемещаться, сжатый своими соседями. С другой стороны, валентный электрон соседнего атома может заполнить собой дырку: у атома снова есть все валентные электроны, однако в соседнем атоме теперь образовалась дырка из-за ушедшего электрона. В конечном итоге это равносильно тому, как если бы переместилась сама дырка из одного атома в другой, а с ней и положительный заряд (→ **рис. 18.1.б**).

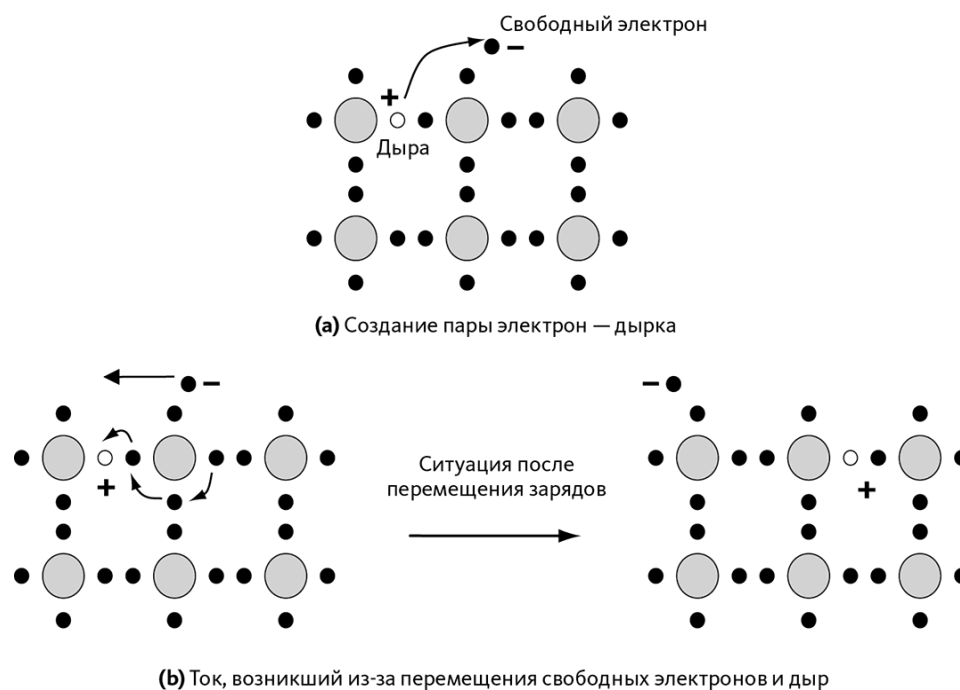


Рис. 18.1 – Схематичное изображение полупроводника на микроскопическом уровне

Большие круги представляют собой атомы, например кремния. Черные круги – электроны.

(а) – валентный электрон освобождается и становится свободным электроном: на его месте в атоме возникает дырка.

(б) – изображены два типа тока, которые могут возникнуть: первый – из-за перемещения свободных электронов, второй – из-за перемещения дырок

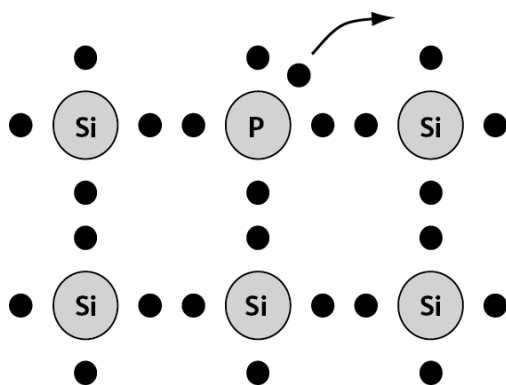
Таким образом, в полупроводнике ток может возникнуть по двум причинам:

- перемещение отрицательно заряженных свободных электронов;
- перемещение дыр из атома в атом, что приводит к перемещению положительных зарядов.

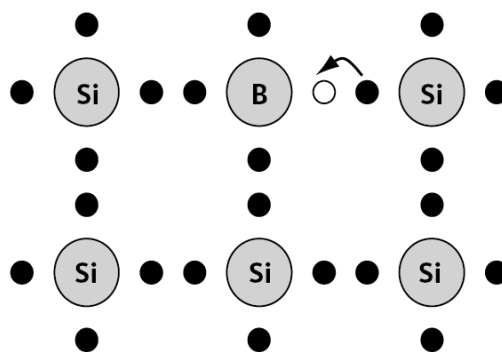
Легирование

Легирование n-типа

Предположим, что к четырехвалентному кремнию мы подцепили атом с пятью валентными электронами (например, фосфора, → **рис. 18.2.а**). По сравнению с соседними атомами кремния в этом атоме появился «лишний» электрон: можно продемонстрировать, что этот лишний электрон освобождается гораздо легче и может, таким образом, сразу присоединиться к потоку свободных электронов вещества. В итоге вещество получает большую проводимость благодаря большому числу свободных электронов.



(а) Легирование n-типа



(b) Легирование p-типа

Рис. 18.2 – Легирование полупроводников

(а) – атом фосфора был помещен в кремний: он принес дополнительный свободный электрон в придачу к уже существующим парам электрон – дырка в кремнии. Вещество приобретает большую проводимость.

(b) – атом бора был помещен в кремний: он принес дополнительную дырку уже существующим парам электрон – дырка в кремнии. Вещество приобретает большую проводимость.

В этом случае говорят, что полупроводник подвергся легированию n-типа: буква n означает, что повысилось количество отрицательно заряженных (negative) свободных электронов. В этом типе вещества во время прохождения тока заряд переносят свободные электроны, а не дырки.

Легирование p-типа

Таким же образом снова возьмем наш четырехвалентный кремний и подцепим к нему атом с тремя валентными электронами (например, бора, → **рис. 18.2.б**). Теперь у одного атома на один электрон меньше по сравнению с соседними атомами кремния, то есть в нем есть «дырка» относительно распределения валентных электронов вещества. Можно продемонстрировать, что электроны соседних атомов естественным образом стремятся заполнить дыру: таким образом, дырка может перемещаться из атома в атом внутри вещества. По мере ее перемещения движется и положительный заряд по атомам, в которых не хватает электрона.

В итоге вещество и здесь приобретает большую проводимость, поскольку обладает большим числом дырок: больше валентных электронов могут перемещаться от дырки к дырке, перенося по пути заряд. В этом случае говорят, что полупроводник подвергся легированию p-типа: буква p означает перемещение положительного (positive) заряда по атомам. В данном типе вещества во время прохождения тока заряд переносят не свободные электроны, а дырки.

2. Диод

Соединим полупроводник, легированный по типу р, с полупроводником, легированным по типу n: оба вещества являются проводниками, но каждое по-своему. В полупроводнике р-типа это связано с большим количеством дырок; в полупроводнике n-типа это связано с большим количеством свободных электронов. Такое соединение называют диодом, и теперь мы рассмотрим, как он работает в электрической цепи.

Прямое направление

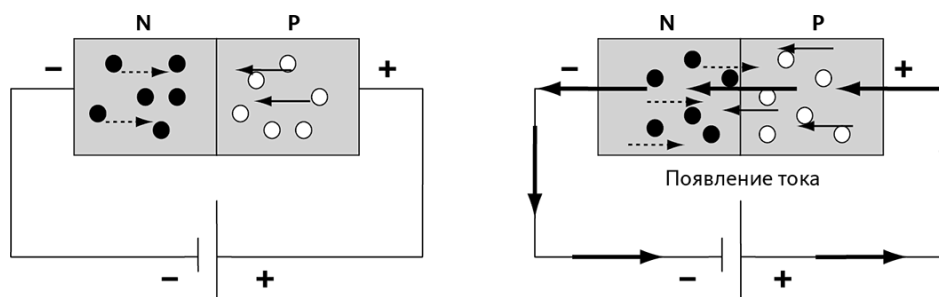
Подключим к концам нашей установки батарею: сначала соединим «плюс» батарейки с полупроводником р-типа, а «минус» с полупроводником n-типа (→ **рис. 18.3.а**).

Со стороны n-типа свободные электроны отталкиваются отрицательным полюсом батарейки и движутся в сторону р-типа. Там они заполняют дырки и снова становятся валентными электронами.

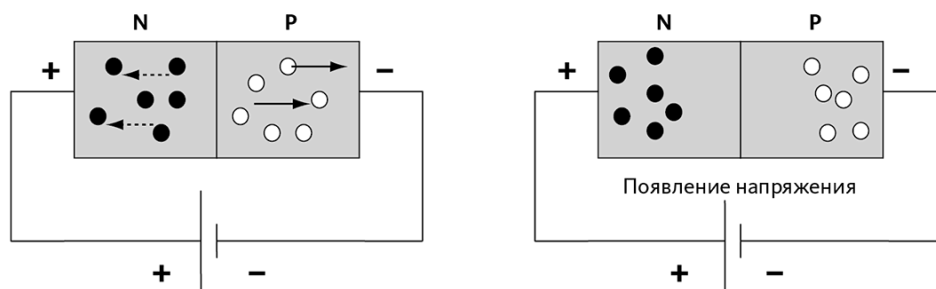
Со стороны р-типа валентные электроны могут переходить от дырки к дырке, притягиваемые положительным полюсом батарейки. В конце концов они выходят из проводника в электрический провод и движутся по нему до батареи.

Поскольку электроны уходят, на стороне р-типа образуются новые дырки: это компенсирует исчезновение дыр, занятых электронами, пришедшими со стороны n-типа. Аналогично со стороны n-типа отток свободных электронов к р-типу компенсирует приток свободных электронов от отрицательного полюса батарейки.

Мы видим, что диод позволяет беспрепятственное прохождение тока, когда батарея установлена в таком направлении. В этом случае говорят, что у диода прямое направление.



(а) Прямое направление диода



(б) Запирающее направление диода

Рис. 18.3 – Принцип действия диода

Мы изобразили свободные электроны черными кружками, а дырки белыми. Условно принято, что направлением тока считается перемещение положительных зарядов, то есть это перемещение дыр (сплошные стрелки), а свободные электроны перемещаются в противоположном направлении (стрелки пунктиром).

(а) – положительный полюс батарейки соединен с полупроводником, легированным по типу р, а отрицательный – по типу n. Электроны, как и дырки, отталкиваются к стыку р-n в центре, где они перестраиваются. Потеря свободных электронов со стороны n компенсируется притоком электронов по проводу. Потеря дырок со стороны р компенсируется оттоком электронов в провод. В итоге движение электронов и дырок может продолжаться: ток сохраняется. Диод в прямом направлении.

(b) – отрицательный полюс батарейки соединен с полупроводником, легированным по типу *p*, а положительный – с *n*. Электроны, как и дырки, притягиваются за пределы диода, но при этом на стыке создается положительный заряд со стороны *n* и отрицательный со стороны *p*. Этот заряд создает силу, которая останавливает движение дырок и электронов: ток прекращается. Диод в запирающем направлении.

Запирающее направление

Изменим теперь направление батареи: «плюс» будет повернут к стороне *n*, а «минус» к стороне *p* (→ **рис. 18.3.b**). Свободные со стороны *n* электроны на этот раз притягиваются положительным полюсом и движутся к внешней стороне диода. Таким образом, из-за оттока электронов ближе к центру образуется положительный заряд.

Между тем на стороне *p* очень мало свободных электронов: ни один свободный электрон не может прийти компенсировать созданный положительный заряд. Что касается валентных электронов, они могут перемещаться, только если рядом есть дырки, а поскольку со стороны *n* дырок очень мало, валентные электроны не могут туда прийти. Таким образом, на стыке *p-n* ток заблокирован.

Точно так же со стороны *p* валентные электроны перескакивают от дырки к дырке, пока не приблизятся к центру диода, оторгнутые отрицательным полюсом батареи: этот приток электронов создает в центре отрицательный заряд. Поскольку валентные электроны не могут уйти из этой зоны, покинув сторону *n* (как мы только что наблюдали), отрицательный заряд остается.

В итоге присутствие положительных и отрицательных зарядов в центре диода останавливает движение электронов, которое наметилось внутри диода.

Итак, если батарея расположена таким образом, на концах диода возникает напряжение («минус» со стороны *p* и «плюс» со стороны *n*), в то время как ток не может пройти по диоду (заряды заблокированы на стыке *p-n*). В этом случае говорят, что диод в запирающем направлении.

Диоды могут быть использованы для преобразования переменного тока в постоянный, благодаря тому что позволяют току двигаться только в одном направлении. Мы не будем останавливаться на этом: поскольку нашей целью является описание транзистора, мы не будем ничего усложнять.

3. Транзистор

Принцип усиления тока

Существуют разные виды транзисторов на базе полупроводников *n*- или *p*-типа. Мы сосредоточим внимание на биполярном транзисторе, который легче описать.

Такой транзистор состоит из трех полупроводников, расположенных друг за другом, разного типа легирования: первый *n*-типа, второй *p*-типа, третий *n*-типа (→ **рис. 18.4**). Такой прибор называют транзистором *n-p-n* типа. Существуют также транзисторы *p-n-p* типа, принцип работы которых идентичен.

Левая часть (*n*) называется эмиттером, центральная часть (*p*) называется базой, правая часть (*n*) называется коллектором. Вся установка очень похожа на два диода, положенные валетом: диод *n-p* эмиттер-база с одной стороны и диод *p-n* база-коллектор с другой стороны.

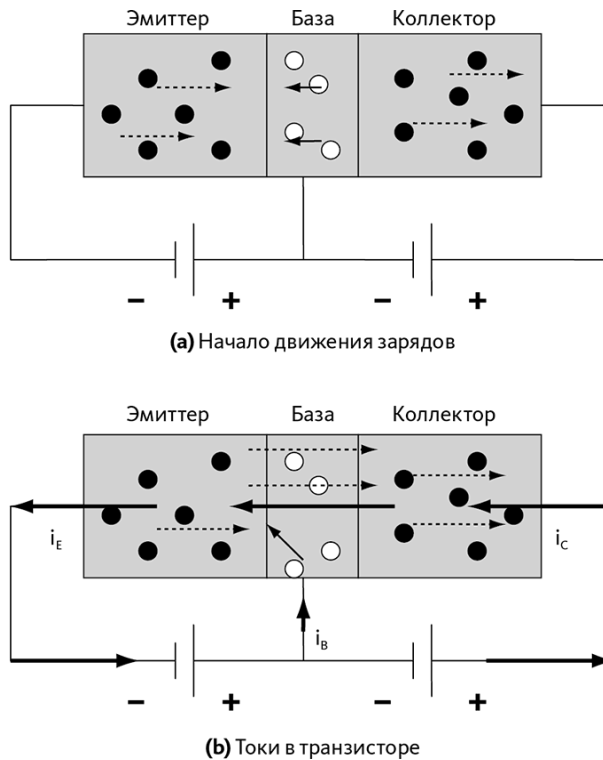


Рис. 18.4 – Принцип действия биполярного транзистора

Перемещение свободных электронов (черные точки) показано пунктиром. Перемещение дырок (белые точки) показано сплошными стрелками.

(a) – движение зарядов начинается от присутствия батареек. Удаляясь к внешней стороне транзистора, электроны коллектора должны были бы вызвать появление положительного заряда возле базы, тем самым блокировав движение.

Но здесь электроны, пришедшие от эмиттера, достигают коллектора, уравнивая положительный заряд: ток может идти, несмотря на то, что правая часть транзистора находится в запирающем направлении (b). Чем сильнее ток i_B , тем больше электронов покидают базу по проводу: это притягивает больше электронов от эмиттера. Для каждого электрона, покидающего базу, β электронов эмиттера двигаются к коллектору, пока один из них не остановится на базе, компенсировав ушедший электрон. Таким образом, ток коллектора i_C пропорционален току базы i_B и гораздо сильнее: $i_C = \beta i_B$. Ток i_B был усилен.

Теперь подключим две батарейки ($\rightarrow$ рис. 18.4.a) так, чтобы:

- диод эмиттер-база был в прямом направлении (плюс базы p и минус эмиттера n);
- диод база-коллектор был в запирающем направлении («плюс» коллектора n и «минус» базы p).

Со стороны прямого направления свободные электроны эмиттера стремятся достичь базы: ток проходит без проблем. С запирающей же стороны в коллекторе p появляется положительный заряд из-за утечки свободных электронов в сторону батареи. Если бы этот диод запирающего направления был один, положительный заряд со стороны n не мог бы быть переполнен, потому что ни один свободный электрон не мог бы прийти со стороны p.

Но здесь свободные электроны прибывают именно от эмиттера к базе: вместо того чтобы идти к проводу, соединенному с базой, они в основном продолжают путь к положительному заряду коллектора. Таким образом, внутри ток циркулирует от базы к коллектору благодаря свободным электронам, прибывшим от эмиттера.

В итоге очень малое число электронов, пришедших от эмиттера, выходят из транзистора через базу: большинство выходит через коллектор. Таким образом, ток в базе i_B очень слабый относительно тока в коллекторе i_C ($\rightarrow$ рис. 18.4.b).

Уточним: предположим, что мы пустим ток i_B . Каждый электрон базы, который проходит по проводу, создает положительный заряд внутри базы (нехватка электронов). Это притягивает электрон из эмиттера, но он вполне может пересечь базу и достичь коллектора, то есть не компенсируя положительный заряд базы. Понадобится, быть может, сто электронов, прежде чем один из них останется на базе и аннулирует положительный заряд. Таким образом, на каждый электрон, покидающий базу, приходится сто электронов, которые приходят в коллектор и выходят из транзистора таким способом: ток i_C в сто раз сильнее, чем вынужденный ток i_B .

Мы только что произвели усиление тока: ток коллектора прямо пропорционален вынужденному току базы. Отметим коэффициент пропорциональности β : $i_C = \beta i_B$.

β – ключевой параметр транзистора.

Усиление напряжения

Легко представить, что увеличение силы тока, вызванное транзистором, может превратиться в усиление напряжения с помощью сопротивления (напряжение пропорционально величине сопротивления).

В дальнейшем мы изобразим на схеме увеличение напряжения с помощью «коробки» (→ **рис. 18.5**): появляются только входное вынужденное напряжение и выходное усиленное. Между ними двумя внутри коробки существует целый набор транзисторов и напряжений, позволяющих произвести желаемое усиление.

Отметим, что усиление напряжения не проходит без энергозатрат: чтобы транзистор работал, необходимо его питание с помощью генератора постоянного напряжения, что видно на **рис. 18.4**. Как и положено, в ходе этой операции никакой энергии не создается. Усиление сигнала может быть целью само себе, но транзистор существует не только для этого. В частности, он является составной частью основы компьютера, именно с него началась новая эра цифровых информационных технологий. В дальнейшем мы рассмотрим основной принцип преобразования сигнала в цифровую форму и преимущества этого.

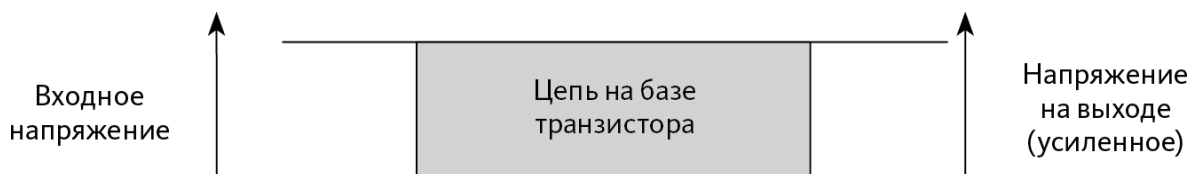


Рис. 18.5 – Схематичное изображение усиления напряжения

4. Эра цифровых технологий

Преимущество цифровых форм

Запишем музыкальный отрывок с помощью микрофона: мы видели, что он преобразует звук в электрический сигнал, который является совмещением синусоид различных частот. То есть теперь информация о мелодии заложена в напряжении: если мы пошлем это напряжение в громкоговоритель, он превратит его в звук. Напряжение может принимать самую различную величину в зависимости от силы звука: это называется аналоговым сигналом.

Теперь предположим, что мы хотим передать электрический сигнал на расстояние в тысячи километров, прежде чем превратить его в звук. Во время долгого пути между микрофоном и громкоговорителем сигнал рискует быть искажен окружающей средой и мало-помалу ослабеть.



ТРАНЗИСТОР И ТРАНСФОРМАТОР

Мы только что наблюдали, что транзистор является усилителем тока, что позволяет косвенным путем создать усилитель напряжения. Но трансформатор как будто играет ту же роль: в зависимости от числа колец в первичной и вторичной цепи мы можем на выходе получить усиленный ток или напряжение.

На самом деле, различие возникает в энергетическом аспекте: в трансформаторе, если напряжение увеличено в десять раз, то сила тока соответственно уменьшается в десять раз. В итоге мощность не меняется. Тогда как в транзисторе усиление тока происходит независимо от действующего напряжения: так, усиление мощности можно произвести средствами транзистора, в то время как в трансформаторе это сделать невозможно. Именно питание транзисторов (постоянное напряжение) дает необходимую энергию для усиления мощности.

В итоге на **рис. 18.5** напряжение и ток на выходе могут быть совершенно независимыми. Наша коробочка ведет себя здесь как настоящий идеальный генератор: ее напряжение – это усиленное входное напряжение, но полученная сила тока не имеет ничего общего с входной. Она будет зависеть только от аппаратов, подключенных на выходе.

В этом случае мы можем использовать транзистор, чтобы усилить сигнал и таким образом ослабить помехи. Но в конце мы получим такой же искаженный сигнал. Возьмем простой пример: предположим, что начальное напряжение, которое следует передать, составляет 3 В. Предположим, что по прибытии напряжение упало до 2,4 В из-за помех: сигнал уже не тот, какой нужен.

Чтобы этого избежать, необходимо превратить напряжение 3 В в совокупность напряжений, которые могут быть лишь двух значений: например, 0 и 15 В. Тогда последовательность этих напряжений образует бинарный код («0» для напряжения 0 В и «1» для напряжения 15 В), характеризующий изначальное напряжение 3 В. В качестве примера мы можем представить простейший код: 00000 для первичного напряжения 0 В, 11111 для финального напряжения 5 В и 11100 для напряжения 3 В. Такой сигнал, который может принимать лишь два значения, называется «цифровым сигналом».

Теперь напряжение 3 В стало последовательностью пяти напряжений величиной 15 В, 15 В, 15 В, 0 В и 0 В. Во время передачи сигнал может быть искажен, как случилось с напряжением в 3 В. Но предположим, что одно из напряжений 15 В стало напряжением в 14 В: поскольку речь идет о бинарном коде 0 или 1, в конце напряжение 14 В всегда будет расшифровано как «1».

В итоге полученный код будет всегда 11 100, даже если в пути будут значительные помехи: это будет расшифровано как напряжение 3 В, точно такое же, какое было получено микрофоном. В отличие от аналогового сигнала цифровой сигнал не был искажен.

Если в этом примере очевидно преимущество цифровой формы, напрашивается вопрос: как преобразовать аналоговый сигнал в цифровой? Транзистор может позволить произвести эту трансформацию: существует множество методов конверсии, но мы в дальнейшем опишем простой механизм, чтобы понять принцип.

Аналого-цифровое преобразование

Возьмем нашу коробочку с транзисторами и сопротивлениями, которая позволяет получить на выходе более высокое напряжение по сравнению с изначальным. Не будем забывать, что для работы транзисторам необходимо питание напряжением. Предположим, что это напряжение питания составляет 15 В. Это значит, что на выходе наша коробочка не сможет предложить напряжение выше 15 В или ниже –15 В из-за ограничения питания.

Кроме того, предположим, что необходимо очень сильно увеличить напряжение, например 10 000: такого усиления легко добиться с помощью всего двух транзисторов.

Рассмотрим **рис. 18.6**: к одному из входных концов подключили аналоговое напряжение 3 В, которое необходимо преобразовать. На другом конце подключен генератор переменного напряжения. Предположим, что напряжение этого генератора повышается на 1 В каждую секунду.

Предположим, что начальное напряжение генератора составляет 0,5 В. Таким образом, на верхнем конце потенциал равен 0,5 В, а на нижнем 3 В. Напряжение между двумя концами соответствует разнице потенциалов, то есть оно составляет $0,5 - 3 = -2,5$ В.

Коробка усиливает сигнал на 10 000, то есть на выходе мы должны получить $-25\,000\text{ В}$. Но коробка не может подавать напряжение ниже -15 В : таким образом, она будет «насыщать» напряжение до минимального уровня в -15 В , не имея возможности опустить его ниже.

Через секунду напряжение генератора составит $1,5\text{ В}$: входное напряжение, таким образом, составляет $1,5 - 3 = -1,5\text{ В}$. На выходе напряжение всегда насыщается до -15 В .

То же самое на третьей секунде: напряжение на входе $-0,5\text{ В}$, а на выходе -15 В .

Зато на четвертой секунде напряжение генератора составляет $3,5\text{ В}$: тогда напряжение на входе будет $3,5 - 3 = 0,5\text{ В}$. Учитывая коэффициент усиления, на выходе мы должны получить напряжение в 5000 В : на практике наша коробка поднимет напряжение до 15 В . Отметим, что напряжение на выходе изменилось с -15 В до $+15\text{ В}$...

То же самое с пятой секундой, напряжение на входе $1,5\text{ В}$, а на выходе остается $+15\text{ В}$.

В итоге, если мы рассмотрим пять истекших секунд, на выходе секунда за секундой получаем следующие значения напряжения: -15 В , -15 В , -15 В , $+15\text{ В}$, $+15\text{ В}$. Это образует бинарный код, который мы можем обозначить, например, 11 100. Получается код, соответствующий аналоговому напряжению 3 В , как мы установили выше. Наша коробка на базе транзисторов преобразовала аналоговый сигнал в цифровой.

Преимущество большого коэффициента усиления позволяет определить и закодировать самые низкие значения входного напряжения. Предположим, например, что входное напряжение, которое требуется преобразовать, меняется на $0,01\text{ В}$: на выходе значение будет 100 В , которого достаточно, чтобы переводить напряжение на выходе от -15 В до $+15\text{ В}$. Таким образом, выходной код различает входное напряжение $3,46\text{ В}$ и $3,47\text{ В}$.

Получение цифровых сигналов выгодно не только для сохранения высокого качества сигнала. Полученный бинарный код, реализованный физически с помощью напряжений, которые могут принимать только два значения, позволяет произвести логические операции. Эти логические операции также реализованы с помощью транзисторов, разумно соединенных с диодами, сопротивлениями и конденсаторами для получения желаемой операции. В этом типе операций если мы поставим на входе два разных бинарных кода, то получим на выходе новый бинарный код, который будет являться комбинацией этих двух: эта комбинация зависит от логической операции, которую мы хотим совершить.

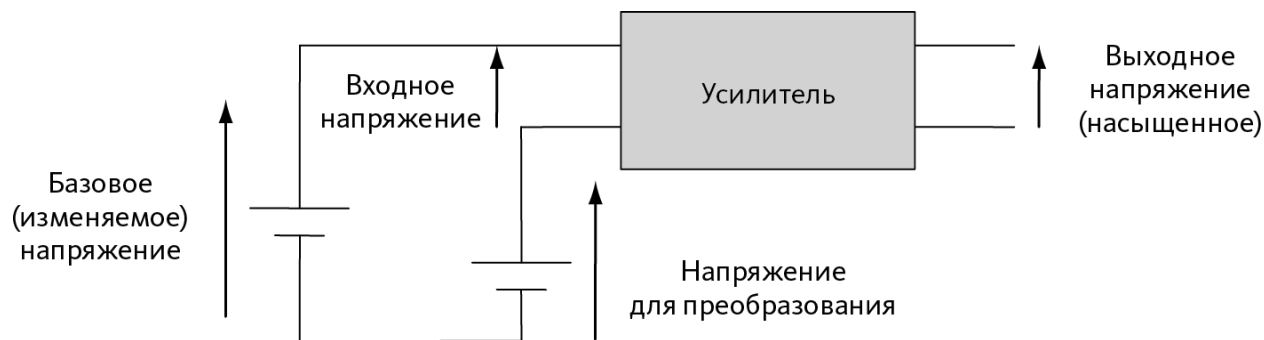


Рис. 18.6 – Принцип цифрового преобразования

Входное напряжение равно разнице между базовым напряжением $U_{\text{баз}}$ и напряжением для преобразования E . Усиление таково, что выходное напряжение всегда достигает максимальной ($+15\text{ В}$) или минимальной (-15 В) величины.

Когда $U_{\text{баз}} > E$, выходное напряжение колеблется от -15 В до $+15\text{ В}$.

Мы не будем подробно изучать эти логические операции, потому что это выходит за рамки данной книги. И все же необходимо знать, что эти логические операции, состоящие из цифровых сигналов, составляют основу работы компьютеров. На практике это требует большое количество транзисторов: например, процессор Пентиум 4 содержит 42 миллиона транзисторов...

Таким образом, транзистор, изобретенный в 1948 году, лежит в основе главных революционных технологий последних десятилетий: именно с него началась эра цифровых форм и информатики.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Полупроводник является веществом, в котором некоторые электроны освобождаются из атомов при наличии достаточно высокой энергии. В атоме на месте выбывшего электрона образуется дырка: произошло образование пары «электрон – дырка». Чем выше температура, тем выше проводимость вещества. Наиболее часто используемый химический элемент – кремний.
- Легирование n-типа состоит в подсаживании атомов, содержащих больше валентных электронов, чем у атома принимающего вещества: «лишние» электроны становятся свободными электронами. Легирование p-типа состоит в подсаживании атомов, содержащих меньше валентных электронов, чем у атома принимающего вещества: образуются дыры из-за нехватки валентных электронов. В обоих случаях проводимость вещества повышается.
- Диод в основном состоит из двух совмещенных полупроводников, легированных по p и n-типу. Асимметрия дает замечательный эффект: ток может проходить по диоду только в одном направлении.
- Биполярный транзистор состоит из трех совмещенных полупроводников: легированный по n-типу называется эмиттер, легированный по p-типу называется базой, второй легированный по n-типу – коллектор. Он производит ток, который на выходе из коллектора сильнее, чем на выходе из базы.
- Транзистор имеет разнообразное применение: помимо функции усиления тока, он может служить конвертером аналоговых сигналов в цифровые. С одной стороны, это сохраняет мощность сигнала. С другой стороны, с цифровыми сигналами впоследствии можно совершать логические операции, формируя базу компьютера.

Часть 4 Оптика

Свет и другие электромагнитные волны

19. Природа света

Предыдущие главы позволили нам сделать обзор принципов электромагнетизма. Настало время обобщить эту прекрасную систему, что позволит нам вступить в область применения еще более универсальную, чем электричество: мир электромагнитных волн, к которым относится и свет. Мы рассмотрим различные электромагнитные волны и их свойства: радиоволны, радиолокационные волны, микроволны, видимый свет, инфракрасные, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи. Мы определим скорость, длину и энергию этих волн. Мы объясним природу их возникновения, обратившись к принципу оптического излучения атомов. Мы пронаблюдаем некоторые удивительные последствия волновой природы света с такими явлениями, как интерференция и дифракция. Также мы рассмотрим радиоволны, объяснив принцип действия антенн и беспроводной передачи. Эта глава, без сомнения, открывает новую, очень широкую сферу применения электромагнетизма.

1. Система электромагнетизма в целом

Переменные электромагнитные поля

Введя понятие ЭДС-индукции, мы дополнили представление об электромагнитной силе, выйдя за пределы статики.

Явление индукции предполагает, что изменение магнитного поля влечет появление электрического поля. То есть изменение магнитного поля всегда связано с особым распределением электрического поля, о котором мы не будем говорить здесь подробно.

Запомним: магнитостатическое поле может существовать при отсутствии электрического поля, но *переменное* магнитное поле всегда существует в тесном соседстве с электрическим полем. Временное изменение магнитного поля всегда связано с пространственным изменением поля электрического.

Переменные электрические поля

Возьмем кусок проводящей проволоки, по которой проходит ток. Предположим, что этот ток больше на конце проволоки, чем в начале. В таких случаях говорят, что ток рассеивается. Электроны движутся в направлении, противоположном току, – следовательно, количество входящих электронов больше, чем выходящих (→ **рис. 19.1**). Таким образом, в проволоке накапливается отрицательный заряд. Запомним, что расхождение тока связано с изменением заряда.

Рассмотрим теперь влияние на электрическое и магнитное поле. Ток создает магнитное поле вокруг себя: следовательно, растекание тока создает особое распределение магнитного поля вокруг провода (мы не будем рассматривать это распределение в деталях). Кроме того, заряды создают электрическое поле вокруг, то есть накопление зарядов создает электрическое поле, которое увеличивается.

Сосредоточимся на некоей точке пространства, а не на проводе. В этой точке находится электрическое поле, которое увеличивается, связанное с пространственным изменением магнитного поля. Временное изменение электрического поля напрямую связано с пространственным изменением магнитного поля, о котором мы упоминали выше.

Запомним: электростатическое поле может существовать при отсутствии магнитного поля, но переменное электрическое поле всегда связано тесным соседством с магнитным полем. Временное изменение электрического поля всегда связано с пространственным изменением магнитного поля.

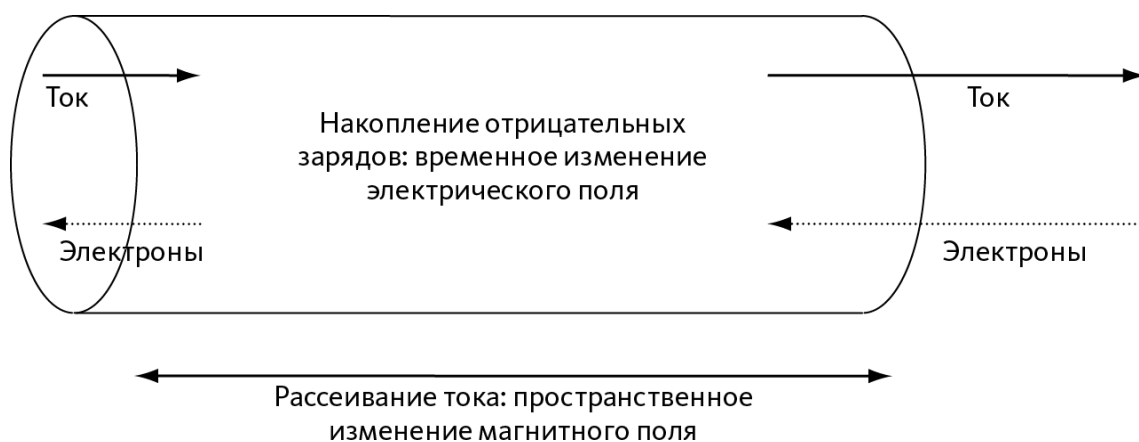


Рис. 19.1 – Электромагнитные эффекты растекания тока

Обобщение

Мы можем наконец подвести итоги всех аспектов, которые принимает электромагнитная сила:

- заряды создают электрическое поле;
- движение зарядов создает магнитное поле;
- временное изменение магнитного поля связано с пространственным изменением электрического поля (электромагнитная индукция);
- временное изменение электрического поля связано с пространственным изменением магнитного поля (то, что мы только что объяснили).

Мы видим, что электрическое и магнитное поля тесно связаны: их нельзя отделить друг от друга. Электрическая составляющая осуществляет воздействие силы на заряды, каким бы ни было их движение, в то время как магнитная составляющая воздействует с помощью силы, пропорциональной скорости зарядов, на которые она направлена.

В итоге мы констатируем любопытную симметрию законов электромагнетизма: изменение магнитного поля сопровождается электрическим полем (индукция), но справедливо и обратное: изменение электрического поля сопровождается магнитным полем.

Эта «красивая» симметрия не случайна: как мы уже сказали, сложность законов электромагнетизма всего лишь иллюзия. Все перечисленные законы сводятся к одному, когда мы рассматриваем их с точки зрения теории относительности, как мы увидим в главе 26.

Отношения между электрическим и магнитным полями позволяют понять наблюдения, которые велись уже несколько веков, в частности свет, о чем мы и поговорим в дальнейшем.

2. Электромагнитные волны

Волны на поверхности воды

Чтобы лучше понять природу и происхождение электромагнитных волн, мы начнем с аналогии с волной на поверхности воды. Представим поток волн, которые синусоидально колеблются на поверхности воды (→ **рис. 19.2**). Кажется, что волны горизонтально перемещаются по поверхности воды (слева направо на **рис. 19.2**). Но происходит это из-за *вертикального* колебания воды: в заданной точке уровень воды поднимается и опускается во время прохождения волны. Корабль, помещенный в эту точку, поднимался и опускался бы при прохождении каждой волны, но не перемещался бы ими.

Таким образом, сама вода колеблется вертикально, а не горизонтально: перемещение волны всего лишь следствие этого вертикального колебания, которое постепенно распространяется.

Это вертикальное движение уровня воды представлено стрелками на **рис. 19.2**. В точке *B* мы видим, что уровень воды сильно поднялся – **(b)** относительно **(a)** – из-за перемещения волны: именно здесь вертикальная скорость максимальна. То же самое в точке *F*, где уровень сильно понижен.

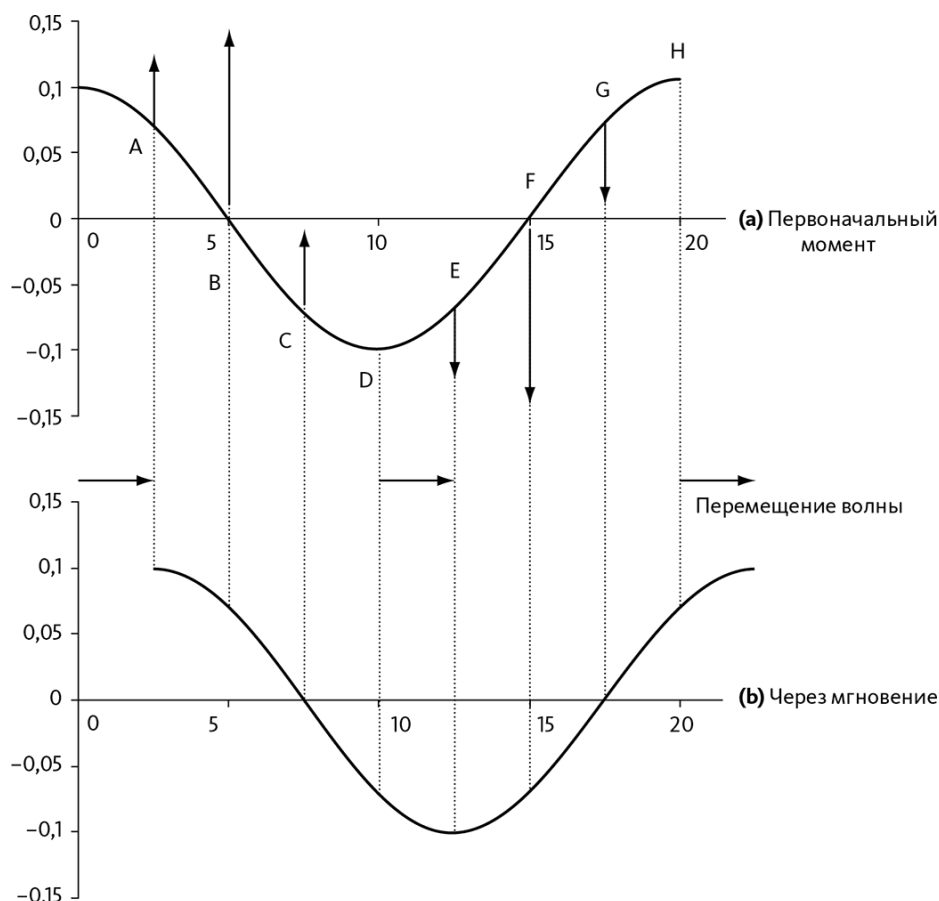


Рис. 19.2 – Волна на поверхности воды

И наоборот, точка *D* соответствует самому низкому уровню волны: это значит, что в данной точке вертикальная скорость равна нулю (уровень достиг минимума, прежде чем снова начать подниматься). То же самое касается точки *H*.

Эти наблюдения позволяют выделить важное свойство волны. Точка *B* находится на боку волны, то есть на самом скате. Однако именно здесь вертикальная скорость является наивысшей. То же самое с точкой *F*. Иными словами, *временное* колебание уровня воды максимально там, где максимально *пространственное* колебание.

И наоборот, точка *D* соответствует одновременно *временному* (уровень повышался мгновение назад и понизится через мгновение) и *пространственному* (вершина волны) максимуму.

Запомним, что у волн существует тесная связь между *временными* и *пространственными* колебаниями.

Другими словами, если корабль поднимается (*временное* повышение уровня воды), это происходит потому, что он находится между гребнем и впадиной волны (*пространственное* повышение уровня воды). И наоборот, корабль на гребне волны не имеет никакой вертикальной скорости.

Образование электромагнитной волны

Для волны на поверхности воды мы подчеркнули связь между *пространственным* и *временным* уровнем воды. Вам это ничего не напоминает? Именно об этом мы говорили в связи с электрическими и магнитными полями: *временное* изменение *магнитного* поля связано с *пространственным* изменением *электрического* поля. *Пространственное* изменение *магнитного* поля связано с *временным* изменением *электрического* поля.

В случае с волнами воды единственным параметром, который менялся, был уровень воды. Здесь же объединены два параметра: электрическое и магнитное поля. Чтобы аналогия была

полной, следовало бы сказать: «Пространственное изменение сопровождается всякое временное изменение магнитного поля» (то же самое касается электрического поля). Именно это мы постараемся проверить.

Представим провод, по которому проходит переменный ток – это создает переменное магнитное поле. В каждой точке временные изменения магнитного поля сопровождаются пространственным изменением электрического поля (индукция).

Поскольку магнитное поле колеблется по синусоиде, его временные изменения не всегда имеют одинаковое значение: магнитное поле увеличивается, а затем уменьшается. Это означает, что пространственное изменение электрического поля также разное в каждый момент: оно разное, когда магнитное поле увеличивается и когда уменьшается.

Таким образом, электрическое поле тоже претерпевает временные изменения. Между тем электрическое поле связано с пространственными изменениями магнитного поля.

В итоге мы видим, что временное изменение магнитного поля связано с пространственным изменением магнитного поля *через электрическое поле*.

Получается конфигурация, абсолютно идентичная **рис. 19.2**, только вместо уровня воды у нас теперь магнитное поле: *временные колебания* в одной точке пространства обязательно сопровождаются *пространственными колебаниями* (чередование впадин и гребней волны). Другими словами, колебание магнитного поля в данной точке обязательно сопровождается «магнитной волной».

Эта волна возможна благодаря наличию электрического поля, которое служит промежуточным этапом между пространственными и временными изменениями магнитного поля.

Однако рассуждения, которых мы придерживались выше, применимы и для электрического поля: *любое временное изменение электрического поля связано пространственным изменением электрического поля через магнитное поле*. Таким образом, «электрическая волна» обязательно сопровождает магнитную волну, которую мы описали.

Если точнее, можно показать, что электрическое и магнитное поля достигают максимума одновременно и в одном и том же месте. Таким образом, обе волны находятся «в фазе» и не могут быть отделены друг от друга. Речь идет об «электромагнитной волне», которая характеризует последовательные колебания электрического и магнитного полей во времени и пространстве.

Если мы бросим камень в воду, то создадим локальное переменное колебание поверхности воды: оно распространяется в форме волны. То же самое произойдет, если мы пустим по проводу переменный ток, мы создадим локальное переменное электромагнитное поле – оно также распространяется в форме волны.

В этом случае мы видим электромагнитные «волны», которые расходятся в пространстве от провода, так же как мы видим концентрические волны, которые расходятся от того места, куда мы бросили камень.

Скорость электромагнитной волны

Напоминание о свойствах волны

Напомним основные параметры, характеризующие волну, о которых мы уже говорили в главе 12. В качестве примера возьмем волну на поверхности воды, предположив, что она колеблется по синусоиде. В дальнейшем мы убедимся, что такое синусоидальное колебание может быть применено к любой электромагнитной волне.

- Каждое мгновение поверхность воды образует чередование волн. Длина волны λ – это расстояние между двумя одинаковыми точками двух соседних волн.

- В каждой точке пространства уровень воды поочередно поднимается и опускается: частота ν – это количество колебаний в секунду.

- Волны перемещаются со скоростью V : это скорость волны.

Эти три параметра связаны выражением: $\nu = V/\lambda$ ($\rightarrow$ глава 12). Оно означает, что если волны движутся быстро (с высокое) и близки друг к другу (λ маленькая), настолько же быстрым является колебание в заданной точке. Другими словами, на пляже быстрые короткие волны стремительно сменяют друг друга.

Параметры, влияющие на скорость волны

Рассмотрим теперь, от чего может зависеть скорость электромагнитной волны. Выражение $v = \lambda/\tau$ показывает, что скорость выше, когда быстрое временное колебание (большая ν) сопровождается «мягким» пространственным колебанием (большое расстояние между волнами, высокая λ). В случае электромагнитной волны большое временное изменение электрического поля должно быть связано со слабым пространственным изменением магнитного поля (см. врезку ниже).

Между тем поля создаются зарядами. Коэффициент $1/(4\pi\epsilon_0)$ характеризует величину электростатической силы: он должен быть большим, чтобы повлечь значительные временные изменения электрического поля. Коэффициент $\mu_0(4\pi)$ характеризует величину магнитной силы: он должен быть низким, чтобы повлечь небольшие пространственные изменения магнитного поля.

В итоге скорость распространения тем выше, чем выше μ_0 (магнитная постоянная) и чем ниже ϵ_0 (электрическая постоянная).

Математика позволяет уточнить выражение: скорость распространения равна $V = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$.

Можно подсчитать ее значение, $V = 300\,000$ км/с. Это огромная скорость: за одну секунду волна могла бы семь с половиной раз облететь вокруг Земли! Уточним, что волне не должно ничего препятствовать, то есть скорость 300 000 км/с возможна лишь в вакууме.

Необходимо понимать, что пока эта скорость не имеет ничего общего со скоростью света. Мы только можем сказать, что любое локальное колебание электрического или магнитного поля распространяется в форме волны со скоростью 300 000 км/с.

Следующий параграф позволит определить связь между электромагнитными волнами и светом.



ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТИ ВОЛНЫ: ДОПОЛНЕНИЯ

Высокая скорость волны предполагает, что значительные временные изменения связаны со слабыми пространственными изменениями. Мы сделали из этого вывод, что большие временные изменения электрического поля должны быть связаны со слабым пространственным изменением магнитного поля. И аналогично значительные временные изменения магнитного поля должны быть связаны со слабым пространственным изменением электрического поля.

Связь между ними устанавливает явление индукции, то есть поле E не имеет связи с электростатическим полем, образованным зарядами. Таким образом, константа ϵ_0 здесь не участвует. Вместо нее требуется константа, выражающая мощность силы индукции.

На самом деле эта константа напрямую связана с μ_0 , которая является константой, связанной с магнитной силой (глава 26 позволит нам понять эту связь). Таким образом, поле B , как и индукционное поле E , зависят от μ_0 : если μ_0 увеличивается, B и E увеличиваются тоже, а скорость волны остается неизменной (пространственное изменение E увеличивается одновременно с временным изменением B).

В целом рассуждений, приведенных в данном параграфе, достаточно, чтобы полностью охарактеризовать скорость волны.

3. Свет – электромагнитная волна

Открытие Ньютона

С начала XIX в. известно, что свет является волной, даже если до открытия Максвелла люди не знали, какова природа этой волны. И действительно, некоторые опыты, проведенные со светом, позволяли предположить, что мы имеем дело с волной. Чтобы лучше это понять,

заглянем в прошлое и проследим за тем, как происходило постепенное понимание природы света.

В 1600 г. считалось, что свет состоит из маленьких «шариков», которые перемещаются с огромной скоростью. В XVII в. Ньютон проделал несколько весьма любопытных опытов: он пропускал белый свет (например, пламени) через обычный кусок стекла, выточенный в форме призмы (→ **рис. 19.3**). На выходе из призмы свет не только отклонялся, но переставал быть белым, и на экране распадался на все цвета радуги.

Из этого Ньютон сделал вывод, что белый свет состоит из «шариков» разных цветов, которые, смешиваясь, образуют белый. В стеклянной призме красные шарики отклонялись меньше, чем синие, что вызывало видимое рассеивание цветов.

При установке второй призмы на пути одного из цветных лучей феномен не повторялся: красный цвет не рассеивался на множество других цветов, а попросту отклонялся, не распадаясь на разноцветные лучи.

Волновые свойства света в этих опытах не проявлялись. Только в начале XIX в., в частности благодаря опытам Юнга, была определена истинная природа света.

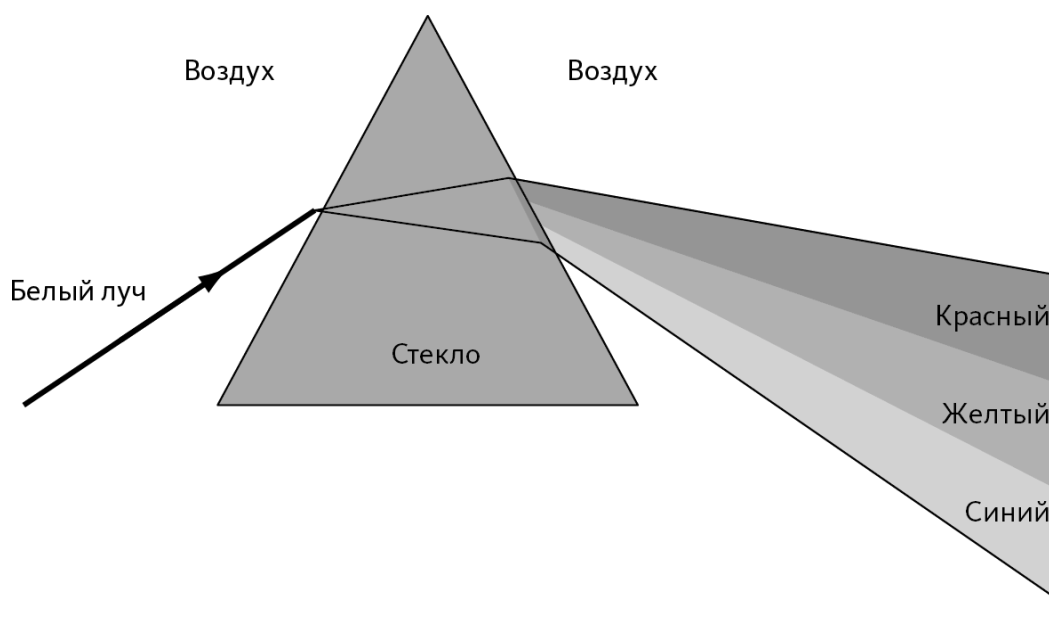


Рис. 19.3 – Дисперсия света, прошедшего через призму

Дифракция света

Опыт

В следующих опытах использован не белый луч, а один из цветных лучей, полученных Ньютоном, – допустим, красный.

Сначала направим луч на экран, в котором проделано большое отверстие. Предположим, что свет исходит из точечного излучателя во всех направлениях. Разумеется, он может пройти только через отверстие: с другой стороны экрана мы наблюдаем пучок света, размер которого пропорционален размеру отверстия. Чем больше отверстие, тем шире пучок (→ **рис. 19.4.a** и **рис. 19.4.b**). Это само собой разумеется...

А теперь уменьшим отверстие настолько, что оно станет еле заметным. Вместо тоненького луча на выходе мы видим, что пучок света стал шире, как будто выходит из другого источника (→ **рис. 19.4.c**). Начиная с определенной величины отверстия, чем больше мы его уменьшаем, тем шире становится пучок света. Это явление называется дифракцией.

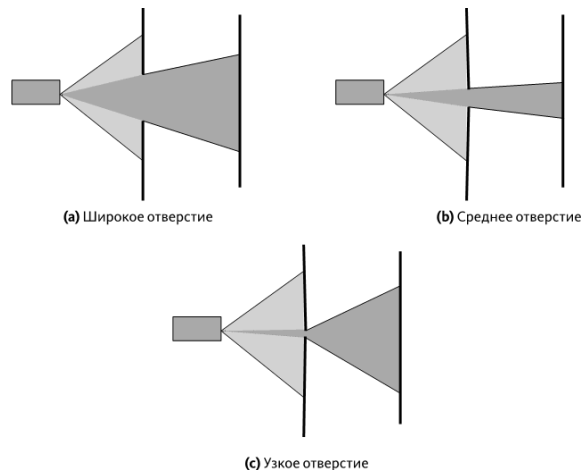


Рис. 19.4 – Явление дифракции

(a) и (b) – мы уменьшили ширину отверстия, что уменьшило сноп света, выходящего из него. (c) – мы сузили отверстие еще сильнее, однако свет на выходе становится шире: таково явление дифракции.

Аналогия с волнами на поверхности воды

Этот опыт трудно объяснить, если мы будем считать свет совокупностью маленьких шариков. И будет логичнее, если мы представим свет как волну.

Чтобы это понять, проведем аналогию с волной на поверхности воды, которая появляется, когда мы кидаем в озеро камень: концентрические волны расходятся во все стороны от того места, куда упал камень.

Предположим, что эти волны достигли берега озера, в котором есть небольшая протока в другой водоем. Мы видим, что созданные волны устремляются туда и образуют новые волны в водоеме. Эти новые волны образуют круги, которые как будто бы исходят от протоки, а не от того места, куда мы бросили камень (→ рис. 19.5). То есть протока ведет себя как новый источник волн, распространяющий их во всех направлениях.

Такое поведение можно легко понять: любой бугор на поверхности воды стремится рассосаться, заполнив окружающие впадины. Во время распространения волны это движение направлено вперед, но не в стороны, где тоже есть бугры. Но после выхода из протоки боковых бугров уже нет, потому что их остановили края берега, а бугор, прошедший через протоку, стремится сгладиться, распространяясь во все стороны. Поэтому на выходе из протоки снова образуются концентрические круги.

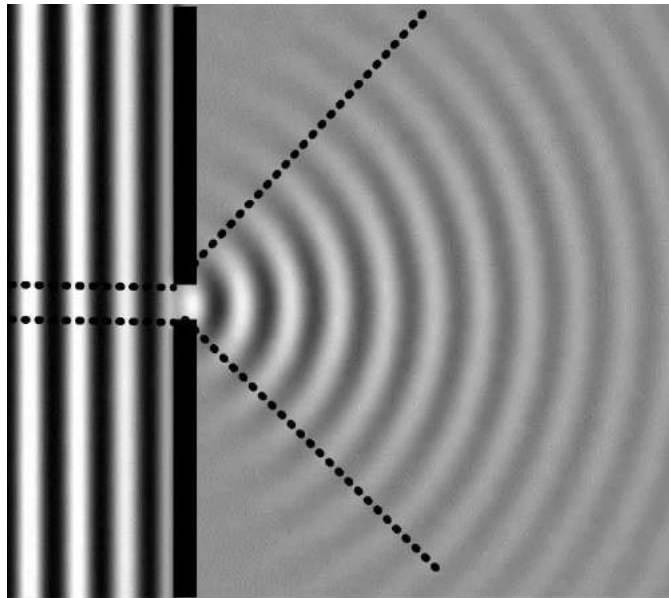


Рис. 19.5 – Волны на поверхности воды, проходящей через отверстие

Черным цветом показан низкий уровень воды, белым цветом – высокий. Волны движутся в направлении отверстия. Проход позволяет пройти лишь малому потоку: справа от прохода гребень волны встречается с более низким уровнем воды, расходящимся во всех направлениях. То есть волна может распространяться всюду – вверх и вниз по рисунку. В итоге пучок волн расширяется.

Наблюдения за светом дали очень похожие результаты: они показывают, что свет также является волной, даже если его природа явно другая. В случае с водой колеблется уровень воды, и это колебание распространяется. В случае со светом тоже что-то колеблется и распространяется, но что? До начала XIX в. люди этого не знали.

Интерференция света

Опыт с отверстиями Юнга

В продолжение предыдущего представим еще один опыт, результаты которого не менее впечатляющие. Снова возьмем точечный излучатель, испускающий красный свет. Но вместо одного отверстия в экране сделаем два недалеко друг от друга (→ **рис. 19.6**). Каждое маленькое отверстие ведет себя как источник света, из которого позади экрана выходит новый световой пучок, который не является продолжением первого.

Рассмотрим результат прохождения света на стене, расположенной позади: стена освещена не равномерно, а содержит светлые и темные зоны. Это явление называется интерференцией. Понять его можно, только если мы имеем дело с волной.

Рис. 19.6 позволяет понять, что произошло: круги изображают «световые волны» (природа которых до сих пор не известна), по аналогии с тем, что происходит на поверхности воды.

Мы видим, что, пересекаясь друг с другом, волны, проходящие через два отверстия, создают зоны, где колебаний больше нет: в зоне *B* уже нет чередований темных и светлых кругов, в отличие от зоны *A*. Каждое мгновение волны, исходящие из обоих отверстий, «нейтрализуются» в зоне *B*. На стене эти зоны, где нет колебаний, выглядят как неосвещенные участки. В остальных местах есть очень быстрое чередование светлых и темных кругов по мере распространения волны. Зоны, в которых есть такое колебание, выглядят светлыми (точка *A*).

Мы могли бы проделать такой же опыт с волнами на поверхности воды. Сделаем два отверстия, ведущие во второй водоем, через которые могут проходить волны. Пересекаясь между собой, эти волны создают ту же геометрию, что и на **рис. 19.6**: в зоне *A* уровень воды поднимается и опускается по мере прохождения волны. Но в *B* уровень не меняется: на самом деле в определенный момент гребень верхней волны накладывается на впадину нижней, что

в итоге гасит колебание. В следующее мгновение впадина верхней волны накладывается на гребень нижней, и снова колебание гасится. В этой точке нет никаких колебаний: для света это соответствует темной зоне.

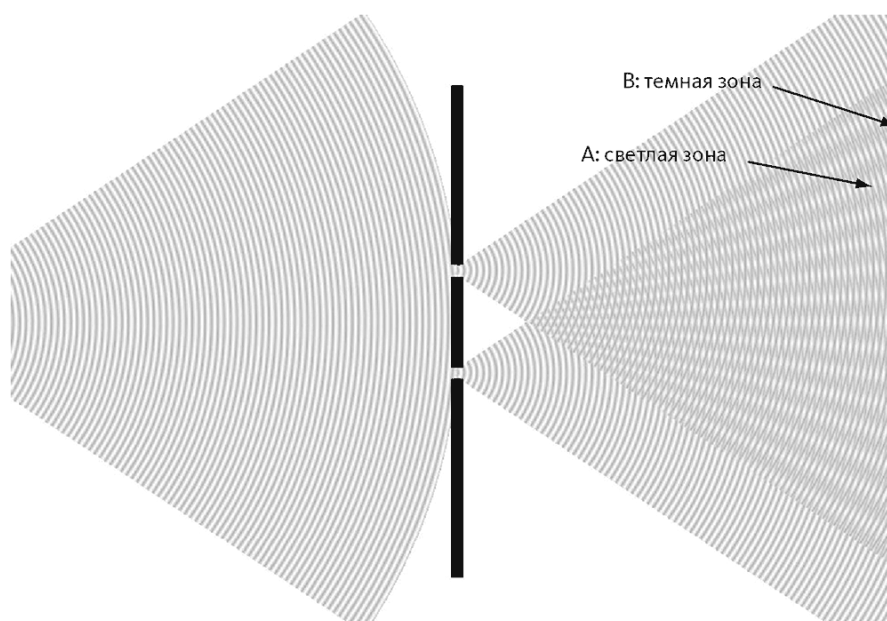


Рис. 19.6 – Интерференция света через отверстия Юнга

Разоблаченный свет

Таким образом, с начала XIX в. нам известно, что свет является волной, но по-прежнему неизвестно, какова природа этой волны: что именно колеблется? Ответ на этот вопрос дал Максвелл: он определил, что электромагнитные волны распространяются со скоростью 300 000 км/с в вакууме (или в воздухе), как сказано в параграфе 2 «Электромагнитные волны». Так, значит, мы можем измерить скорость света: она составляет именно 300 000 км/с! Какое прекрасное совпадение: очевидно, что свет является электромагнитной волной. Иначе говоря, свет является распространением колебаний электрического поля, которое сопровождается колебаниями магнитного поля. На **рис. 19.6** светлые и темные круги представляют собой, соответственно, положительные и отрицательные электрические и магнитные поля.

Таким образом, в основе света лежат заряды, потому что именно они создают электрическое и магнитное поле: электромагнитная сила присутствует решительно всюду. Это открывает новый раздел физики – оптику.



ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА

Свет, проходящий через отверстие, подвержен дифракции: по ту сторону отверстия он распространяется во все стороны, а не определенно направленным пучком. Мы могли бы представить, что свет освещает стену в глубине равномерно, но это не так, и мы сейчас объясним почему.

Чтобы это понять, необходимо вспомнить явление интерференции: когда есть два отверстия, на стене появляются темная и светлая зоны – результат наложения двух волн. Этот эффект сохраняется, даже если мы расположим отверстия рядом: все равно две волны будут накладываться друг на друга.

Теперь представим одно-единственное отверстие вдвое шире, которое мы мысленно поделим на две половины: левую и правую. У нас получаются те же два отверстия, но без перегородки между ними. Часть волны, проходящая через левую половину, будет распространяться во все стороны; то же самое касается правой половины. Таким образом, мы легко можем представить,

что речь идет о двух волнах, которые проходят по двум разным частям отверстия и накладываются друг на друга. В итоге появляются зоны интерференции, которые являются результатом этого наложения.

Именно это мы и наблюдаем: простая дифракция через отверстие приводит не только к расширению пучка света, но и к интерференции. Это называется дифракционной картиной, но мы видим, что речь идет о том же физическом явлении, что и в картине интерференции при двух отверстиях.

4. Различные электромагнитные волны

Электромагнитный спектр

Длина световой волны

Какова длина световой волны? Опыт с интерференцией, проведенный Юнгом с помощью двух отверстий в экране, позволяет ответить на этот вопрос. На стене появился ряд темных и светлых зон (картина интерференции). Небольшие вычисления (которых мы приводить не будем) дают подобную картину в случае *синусоидальных* волн. Более того, кажется логичным, что размеры светлых и темных зон напрямую связаны с длиной волны, то есть с «шириной волн» (это также определяется вычислением): измерив темные и светлые пятна, можно легко определить длину волны излучения.

Теперь мы понимаем, что красный луч соответствует длине волны около 0,7 мкм (1 микрометр соответствует одной тысячной миллиметра). Фиолетовый луч равен примерно 0,4 мкм (то есть расстояние между двумя последовательными волнами составляет 0,4 мкм). Между этими двумя длинами волн расположены все остальные цвета радуги: желтый около 0,58 мкм, зеленый 0,54 мкм и т. д.

Таким образом, свет соответствует очень узкому диапазону длин волн (примерно от 0,4 до 0,7 мкм). Соответствующие им частоты колоссальны: 0,4–0,7 миллиона миллиардов колебаний в секунду!

Это значит, что можно создать электромагнитные волны, которые не являются светом, изменяя частоту колебаний. И действительно, мы видели, что такие волны были созданы в электричестве: простой переменный ток создает колеблющееся магнитное поле, что порождает электромагнитную волну.

Мы имеем дело с типичными частотами в 50 Гц (50 колебаний в секунду), что смехотворно мало по сравнению с видимым излучением. Именно поэтому электромагнитные волны, созданные в электричестве, абсолютно не видны. Длина волны здесь составляет порядка 6000 км: сравните с видимым светом, длина волны которого 0,6 мкм...

Также встречается большое разнообразие электромагнитных волн, чьи свойства сильно различаются в зависимости от их частоты (то есть от длины волны). Сделаем их обзор.

Длина волны различных излучений

Для начала вернемся к видимому излучению: 0,4 мкм составляет длина волны фиолетового цвета. Ниже этого значения излучения уже не видны: по очевидным причинам такие лучи называли ультрафиолетовыми. Но волны с длиной меньше 0,01 мкм (то есть еще дальше от зоны видимости) уже не называются ультрафиолетовыми: это так называемые рентгеновские лучи. Излучения с длиной волны еще более короткой называются гамма-лучи.

И наоборот, излучения с длиной волны больше 0,7 мкм (соответствующей красному цвету) называются инфракрасными. Волны длиной больше миллиметра называются микроволнами. Наконец, волны длиной более метра называются радиоволнами. Электромагнитные волны, встречающиеся в электричестве, принадлежат как раз последней категории (радиоволн), поскольку мы уже знаем, что длина их волны может составлять несколько тысяч километров.

Эти различные названия в зависимости от частоты представлены на **рис. 19.7**. Таким образом, мы изобразили весь электромагнитный спектр.

В дальнейшем мы расскажем о способах передачи и свойствах различных волн. Видимый свет станет темой сразу двух глав (глава 21 и 22). Но способ его передачи можно будет описать

только с помощью квантовой физики (глава 23). Параллельно будет рассказано об ультрафиолетовых и инфракрасных лучах.

Гамма-лучи связаны с рассказом о радиоактивности: их мы рассмотрим в главе 27. Что касается радиоволн, они присутствуют в электричестве, о них мы поговорим в следующем параграфе.

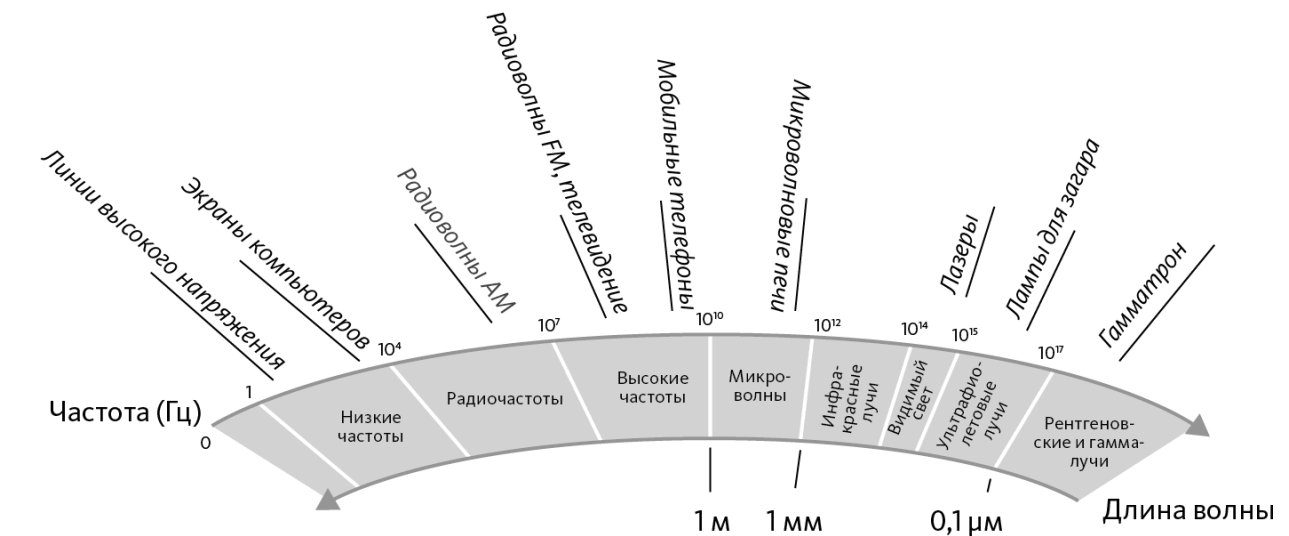


Рис. 19.7 – Электромагнитный спектр

Радиоволны

Распространение информации по электрической сети

Подключим электроприбор (например, сопротивление) к генератору. Представим, что этот генератор находится на расстоянии 1000 км, то есть у нас есть очень длинный провод, чтобы их соединить. Когда мы подключаем генератор, в сопротивлении можно констатировать практически мгновенное появление тока. Как же свободные электроны сопротивления так быстро узнали о подключении генератора, который находится за 1000 км отсюда?

Мы могли бы подумать, что электроны, приведенные в движение на уровне генератора, передают это движение от одного к другому с помощью толчков до самого сопротивления. Но во время этого процесса скорость передачи информации ограничена скоростью электронов между двумя столкновениями. Скорость электронов между двумя столкновениями составляет порядка сотни километров в секунду, то есть понадобилось бы десять секунд, прежде чем ток появился бы в сопротивлении, расположенном за 1000 км. Но мы наблюдаем совершенно другое: значит, объяснение неверное.



ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ

Представим провод, по которому проходит переменный ток. Мы могли бы подумать, что ток создают колебания свободных электронов. На самом деле в движении находятся только заряды, расположенные рядом с поверхностью провода: заряды в центре провода остаются неподвижными и не участвуют в токе.

Рисунок ниже позволяет понять, что происходит: мы рассматриваем ток, направленный вверх, который повышается во время своего переменного колебания. Магнитное поле, созданное этим током, также увеличивается, что означает появление электрического поля благодаря явлению индукции. Правило трех пальцев позволяет понять направление указанного магнитного поля. Усиление этого поля создает индукционный ток, который создает магнитное поле,

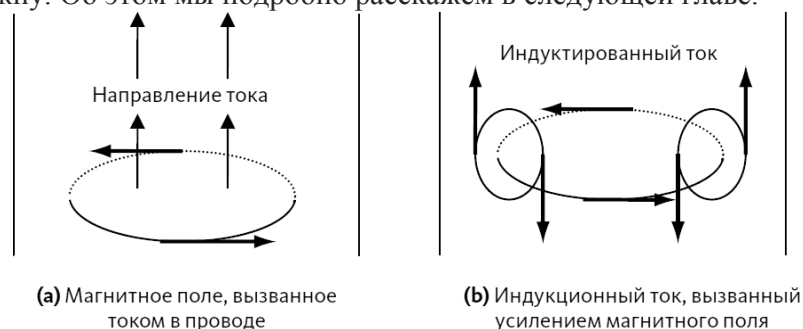
препятствующее этому усилению (как в катушке). Направление индукционного тока также можно узнать с помощью правила трех пальцев.

В конце концов индукционный ток прибавляется к первоначальному току: видно, что это препятствует усилению тока в середине провода и усиливает его на периферии. Чем больше временные изменения, тем сильнее индукция и тем слабее ток в центре провода по сравнению с током на периферии. Так происходит при высокой частоте колебаний.

Это явление называется поверхностным эффектом. При частоте 50 Гц (частота электросети) этот феномен в основном незаметен, и электроны перемещаются по всему проводу. Но при высокой частоте (например, 100 миллионов Гц) электроны перемещаются только по поверхности провода, то есть по поверхности проводника.

В конце концов все происходит так, как если бы провод был очень тонким. Между тем мы видели, что сопротивление росло, когда отрезок провода уменьшался, то есть потери энергии и нагрев провода весьма значительны при высоких частотах из-за поверхностного эффекта. Для передачи информации через проводники это представляет досадное ограничение: частота ограничена поверхностным эффектом, потому что проводник не выдерживает слишком резких перепадов напряжения. Таким образом, информация, содержащаяся в напряжении, не может меняться слишком быстро: подача информации (подаваемой, как правило, в бит/с) ограничена.

Для увеличения подачи информации мы обязаны прибегнуть к совершенно другой технике передачи – оптоволокну. Об этом мы подробно расскажем в следующей главе.



Не будем забывать, что свободные электроны приводятся в движение электрическим полем: когда электрическое поле генератора увеличивается, это изменение немедленно передается по проводу в виде электромагнитной волны. То есть информация передается со скоростью света: сопротивление, расположенное за 300 000 км от генератора (почти как от Земли до Луны!), отреагировало бы за секунду... Так что в земных пределах передача информации по электрическим проводам происходит почти мгновенно.

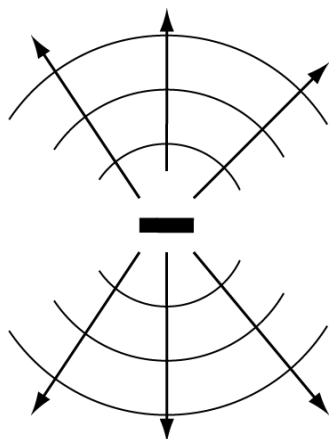
Кроме того, в случае с переменным напряжением с колебанием 50 Гц длина волны излучения составляет примерно 6000 км. Это значит, что в масштабах маленькой страны, если на одном конце сети напряжение максимальное, оно максимальное и на другом конце: вся цепь колеблется одновременно без опозданий от одного конца к другому. В каком-то смысле вся цепь находится на одной волне.

Передача и прием радиоволн

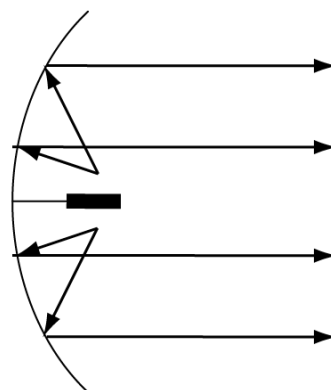
В предыдущем примере мы продемонстрировали электромагнитную волну, проходящую по проводу. Но можно также создать электромагнитную волну, которая распространяется по всему пространству вокруг провода. Для этого достаточно создать в проводе колебательный сигнал: это создает колебательное магнитное поле вокруг провода, которое затем распространяется по всему пространству в виде электромагнитной волны (→ рис. 19.8.a). В каком-то смысле из простого провода, по которому проходит переменный ток, была создана «антенна»: она передает электромагнитную волну, которая распространяется по воздуху.

Эта «радиоволна» передается во всех направлениях, что позволяет поймать ее там, где мы находимся. Но есть тут и недостаток: чем мы дальше от провода, тем амплитуда волны все меньше, потому что колебание распространяется по все большей и большей территории.

Чтобы этого избежать, можно окружить провод тщательно отполированной отражающей поверхностью таким образом, чтобы она посылала волну только в одном направлении, а не во всех сразу, – мы создали параболическую антенну (→ **рис. 19.8.b**). Благодаря этой системе амплитуда волны не уменьшается на расстоянии, поскольку она больше не распространяется на все большую и большую территорию.



(a) Волна, передаваемая по электрическому проводу



(b) Воздействие параболической антенны

Рис. 19.8 – Функционирование антенны

(a) – провод, по которому проходит переменный ток, излучает электромагнитную волну во всех направлениях. Эти волны распространяются от провода, стрелками указано направление распространения.

(b) – добавлена параболическая антенна: волна направлена в одну сторону.

Чтобы поймать эту волну (например, на расстоянии 1000 км) и трансформировать ее в электрический сигнал, достаточно снова прибегнуть к простому проводу: колебательное электрическое поле волны приводит в движение заряды внутри провода колебательным способом. Добавляя параболическую антенну, мы сосредотачиваем всю волну на уровне провода, что позволяет увеличить амплитуду в проводе.

Таким образом, мы реализовали беспроводную передачу информации: электрический сигнал в передающем проводе в итоге оказывается в принимающем проводе.

Как излучать свет?

Механизмы на атомном уровне

Электромагнитные волны, служащие передатчиками информации по радио (радиоволны), имеют частоту близкую к 100 МГц, то есть поле колеблется сто миллионов раз в секунду. Чтобы их генерировать, необходима электрическая цепь, по которой проходит переменный сигнал, колеблющийся сто миллионов раз в секунду, что уже очень много.

И однако, радиоволны являются волнами с низкой частотой. Что же говорить о световых волнах, которые колеблются с частотой миллион миллиардов раз в секунду? С помощью простого электропровода произвести такую волну невозможно. Как же произвести свет?

На самом деле источник всех световых явлений вокруг нас находится внутри атомов. Мы видели, что в любой материальной среде все атомы вибрируют относительно друг друга (именно это создает температуру). Столкновения между атомами или молекулами заставляют электроны «двигаться» внутри атомов (мы объясним более детально суть этого феномена после знакомства

с квантовой физикой). Иными словами, энергия вибрации атомов частично передается электронам атомов.

Между тем электроны являются заряженными частицами, которые создают электрическое поле вокруг себя. Меняя электроны в атомах местами, столкновения локально возмущают электрическое поле, созданное электронами: поле увеличивается там, куда перемещается электрон, и уменьшается там, где он только что был. Это изменение электрического поля вызывает электромагнитную волну, которая будет распространять это изменение повсюду в пространстве.

Кажется ясным, что чем выше температура, тем сильнее столкновение электронов, тем сильнее меняется электрическое поле: таким образом, вызванная волна «сильнее», она переносит больше энергии.

Факт, что атомы могут переносить излучение очень высокой частоты, соответствующей видимому свету, будет объяснен позже, потому что для этого необходимо ознакомиться с некоторыми концептами квантовой физики. Кроме того, сразу возникает вопрос: если все атомы материи вибрируют, любой предмет мог бы излучать свет. Однако Луна, наша мебель, наше тело всего лишь отражают свет Солнца и не способны излучать его сами.

В дальнейшем мы увидим, что все предметы излучают электромагнитные волны, связанные с вибрацией атомов, но в инфракрасном спектре, а не в видимом диапазоне. Причину этого мы объясним с помощью квантовой физики.

Восприятие света

Когда свет возник, каким образом он улавливается? Например, как его распознает наш глаз? Это тоже происходит благодаря связи между электромагнитным полем и движением заряженных частиц.

Проникая в глубь глаза, электромагнитная волна возбуждает нервные клетки сетчатки. Эти клетки преобразуют волну в электрический сигнал, который через глазной нерв передается мозгу. Мозг расшифровывает электрический сигнал в виде цвета: волны длиной 0,8 мкм передает красный цвет, длиной 0,4 мкм – синий. Волны другой длины не расшифровываются (радиоволны не видим). Эта «цветовая расшифровка» выходит за рамки физики, поскольку здесь происходит переход от объективного к субъективному.

5. Энергия электромагнитных волн

Связь между потенциальной энергией и энергией поля

Другой взгляд на потенциальную энергию

Поместим электрон недалеко от протона: благодаря электростатической силе этот электрон будет притянут протоном и приобретет кинетическую энергию. Однако система (протон + электрон) является изолированной, и ее общая энергия должна сохраняться: на практике ее «потенциальная энергия взаимодействия» уменьшается в пользу кинетической энергии.

Такую точку зрения мы усвоили с самого начала: потенциальная энергия в точности отражает потенциал кинетической энергии, что позволяет общей энергии сохраняться. Но мы можем рассмотреть ситуацию и под другим углом: протон создает вокруг себя электростатическое поле, и это поле (а не сам протон) заставляет электрон двигаться и притягивает его к протону (→ **рис. 19.9**). Аналогично поле, созданное электроном, приводит в движение протон.

Значит, мы можем отбросить понятие потенциальной энергии: нет больше перехода потенциальной энергии в кинетическую, а есть переход энергии поля к электрону и протону. Общая энергия сохраняется, потому что то, что мы называем потенциальной энергией, превратилось в энергию электростатического поля: это лишь вопрос терминов.

Электрон и протон будут стремиться друг к другу, пока не войдут в контакт: в этот момент их кинетическая энергия будет максимальной. Между тем, когда протон и электрон соединятся, влияние их противоположных зарядов компенсируется: электростатическое поле вокруг

исчезнет. Энергия поля равна нулю: она полностью перешла в кинетическую энергию. Выражаясь по-старому, мы бы сказали, что потенциальная энергия равна нулю, когда кинетическая энергия максимальна, что, по сути, одно и то же.

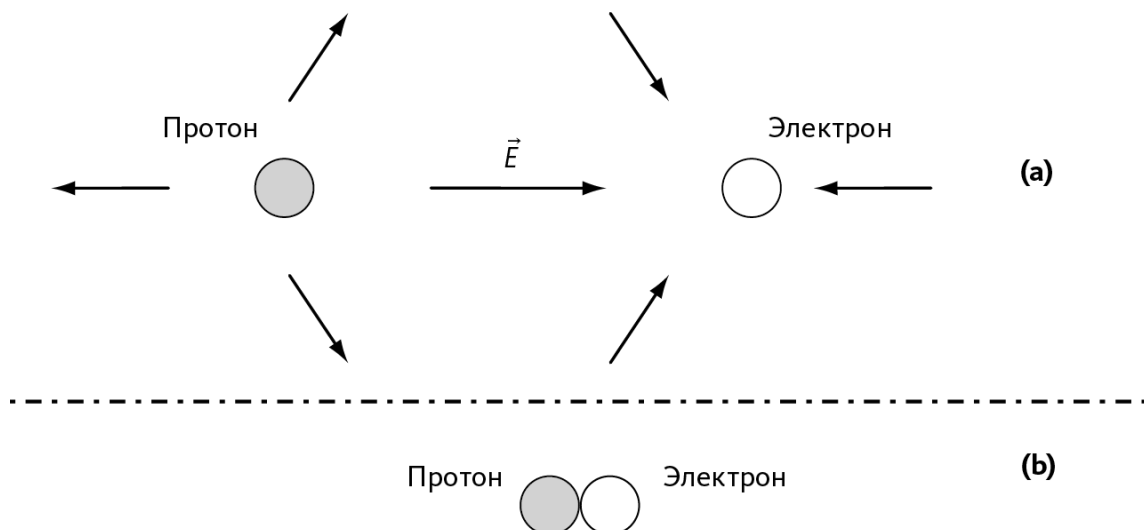


Рис. 19.9 – Потенциальная энергия и энергия поля

(a) – протон и электрон создают вокруг себя электростатическое поле. Из-за наличия этого поля они притягиваются друг к другу. Потенциальная энергия взаимодействия является не чем иным, как энергией электростатического поля.

(b) – протон и электрон приобрели кинетическую энергию до такой степени, что столкнулись. Или же мы считаем, что потенциальная энергия одновременно уменьшалась, пока не исчезла, или же мы считаем, что энергия поля исчезла (отсутствие заряда). В обоих случаях общая энергия сохранилась.

Сохранение энергии и латентный период

Какой смысл в подобной замене терминов?

На этот раз поместим протон за миллионы километров от электрона. Любое изменение электрического поля перемещается со скоростью света (300 000 км/с), то есть электрон не сразу ощутит присутствие протона, который так далеко от него. Таким образом, сначала его кинетическая энергия будет равна нулю, и потенциальная энергия тоже (ничто не придает ему ускорения): его общая энергия равна нулю.

Между тем, когда электрическое поле достигнет его, электрон придет в движение и обретет кинетическую энергию. Таким образом, похоже, общая энергия больше не сохраняется, просто потому что мы не смогли ввести потенциальную энергию. Если вместо потенциальной энергии мы говорим об энергии электрического поля, все встает на свои места: сначала электрическое поле протона содержит энергию, которая перемещается в пространстве по мере перемещения поля. Когда поле достигло электрона, оно отдает ему часть своей энергии: происходит простая передача энергии от поля к электрону. Точно так же поле, созданное электроном, отдает энергию протону, чтобы привести его в движение.

Чем ближе друг к другу электрон и протон, тем больше их кинетическая энергия, а энергия поля должна уменьшаться: и действительно, когда электрон достигает протона (максимальная кинетическая энергия), электрического поля больше не существует, поскольку два заряда компенсировали друг друга (энергия поля равна нулю). Общая энергия сохранилась, она просто изменила природу.

В итоге использование термина «энергия поля» вместо «потенциальной энергии» позволяет принять во внимание длительность распространения волны: необходимо время, чтобы оба заряда узнали о движении друг друга.

Это также придает реальность понятию «потенциальная энергия», которое до сих пор было довольно виртуальным, поскольку простой «потенциал» энергии был чем-то вроде

математической уловки, чтобы общая энергия сохранялась. Здесь это становится энергией поля, то есть, в частности, энергией света, поскольку она является электромагнитным полем. При таком взгляде на вещи свет, разумеется, переносит энергию, что вполне логично.

Энергия электромагнитного поля

Энергия электрического поля

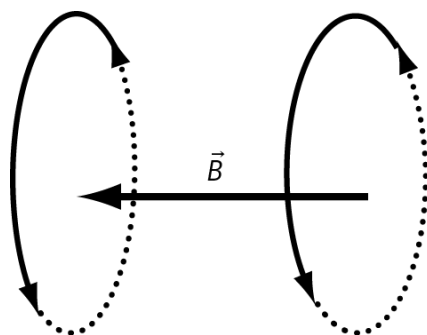
Есть и второе преимущество этого нового взгляда: потенциальная энергия взаимодействия может быть определена только для совокупности двух взаимодействующих зарядов. Тогда как сейчас мы можем определить энергию поля, не принимая во внимание материю, породившую это поле.

Каково значение этой энергии? Это попросту общая кинетическая энергия, которую поле способно придать каждому проходящему через него заряду. Эта энергия не бесконечна: возьмем еще раз пример поля, созданного протоном. Все электроны, проходящие через него, приобретут энергию, будучи притянутыми протонами, но, приближаясь к ним, они уменьшают электрическое поле протона. Общее поле исчезнет, когда поле, созданное приблизившимися электронами, полностью нейтрализует поле протонов: первоначальное поле полностью истратит энергию, которую оно могло дать.

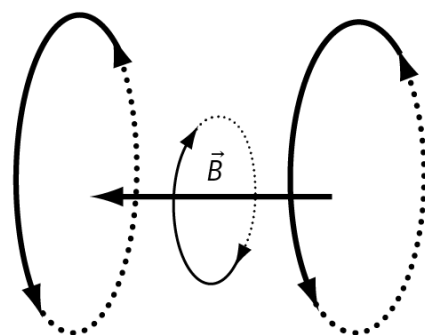
Мы прекрасно видим, что энергия электрического поля должна быть связана с силой электрического поля: если точнее, можно продемонстрировать, что оно пропорционально квадрату этого поля.

Энергия магнитного поля

Можно было бы подумать, что магнитное поле не обладает никакой энергией: и действительно, магнитная сила не работает, она лишь заставляет заряды отклоняться, не придавая им ускорения. Но рассмотрим два кольца с отрицательными зарядами, вращающиеся в заданном направлении, – они создают магнитное поле. Отрицательный заряд, который к нему приблизится, начнет вращаться в обратную сторону из-за действия магнитной силы (→ рис. 19.10): этим заряд уменьшит напряженность магнитного поля.



(a) Магнитное поле, созданное между двумя катушками



(b) Электроны, направленные в середину, начинают вращаться в сторону, противоположную вращению электронов обеих катушек.

Рис. 19.10 – Энергия магнитного поля

Между тем переменное магнитное поле создает электрическое поле (явление индукции), уменьшаясь при этом: магнитное поле преобразуется в электрическое. Однако оно содержит энергию, как мы только что убедились. То есть магнитное поле обладает энергией, которая может перейти в форму электричества, прежде чем перейдет в кинетическую энергию...

Можно продемонстрировать, что энергия магнитного поля пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля.

Энергия света

Свет является колеблющимся электромагнитным полем: его энергия в заданной точке в заданный момент является суммой электрической и магнитной энергии. Поскольку свет является волной, энергия света не одинакова во всех точках: она максимальна на вершинах волны, где поле максимально, и ничтожна в других точках, там, где поле ничтожно. Но поскольку волна распространяется, мгновение спустя ситуация меняется на противоположную: энергия распространяется одновременно с вершиной волны. В итоге волна в целом содержит энергию, которая является суммой энергий в каждой точке и которая распространяется вместе с волной.

В заключение напомним эту фразу: «энергия электрического и магнитного полей – это общая энергия, которая может быть передана заряженным частицам». То есть речь идет о потенциальной кинетической энергии. Таким образом, энергию света можно рассматривать как полноценную потенциальную энергию: просто это потенциальная энергия, которая учитывает неявный период во взаимодействии двух зарядов.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Колебание электрического поля всегда сопровождается колебанием магнитного поля. Эти колебания распространяются, образуя электромагнитную волну. Скорость распространения волны в вакууме равна 300 000 км/с.
- Свет является частным случаем электромагнитной волны, длина которой колеблется от 0,4 до 0,7 мкм. Явления дифракции и интерференции – два важных следствия волновой природы света.
- Синусоидальные сигналы в электричестве испускают волны очень маленькой частоты и очень большой длины, которые называются радиоволнами. Антенна является простым проводником, по которому проходит ток, не важно, принимает он сигнал или передает.
- Электромагнитная волна переносит энергию, выражение которой зависит от мощности электрического и магнитного поля волны.

20. Распространение света

Из всех электромагнитных волн, которые нас окружают, мы сосредоточимся на наиболее видимой из них – свете. Мы расскажем о том, как он распространяется, и выдвинем на передний план удивительное свойство траектории полета: это, в частности, поможет понять явление миража. Мы также поговорим о различных взаимодействиях света и материи: рассеивании света, которое объясняет голубой цвет неба, дисперсии, лежащей в основе явления радуги, поляризации, которая в том числе используется при создании фильмов 3D, абсорбции, рефракции и рефлексии. Два последних взаимодействия позволят нам перейти к следующей главе, касающейся оптических приборов.

1. Световые лучи

Луч и направление света

Бросим камень в озеро: на поверхности появятся волны, образуя concentric circles, которые радиально расходятся до первого препятствия. Если мы сфотографируем какой-то момент, то увидим просто круги на поверхности воды. Но если мы рассмотрим движение этих кругов, то сможем изобразить их стрелками, радиально направленными от места удара (→ рис. 20.1).

То же самое происходит при перемещении зарядов (например, электронов), они вызывают локальные колебания электрического поля и электромагнитную волну, которая радиально распространяется во все стороны. В определенный момент эта волна может быть представлена в виде концентрических кругов. Но чтобы изобразить распространение этой волны, лучше воспользоваться радиальными стрелками, направленными за пределы круга.

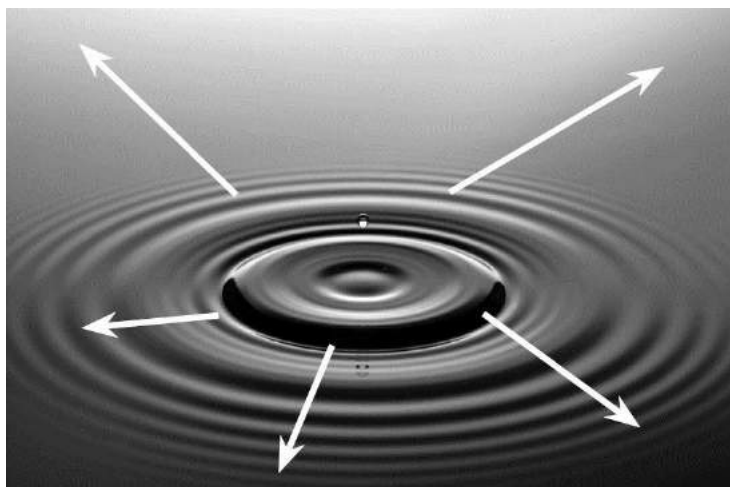


Рис. 20.1 – Распространение кольцевых волн

Тогда волна будет представлена радиальными прямыми, а не концентрическими кругами: в случае света эти прямые называются световыми лучами. Мы видим, что эти лучи не похожи ни на что реально существующее, они необязательно выглядят пучком света, как, например, луч лазера. Они просто позволяют видеть направление распространения волны в различных точках пространства. Если луч отклонен, это значит, что направление распространения меняется по мере того, как свет достигает новых районов.

Бесконечно удаленные световые объекты

Бесконечно удаленный точечный объект

Продолжим рассматривать нашу волну, которая распространяется от одной точки во всех направлениях, и сильно удалимся от ее источника, как изображено на **рис. 20.2**. Мы констатируем, что световые лучи, достигающие нашего глаза, почти параллельны друг другу. Чем дальше мы от источника, тем сильнее эта параллельность.

Между тем источники света, расположенные очень далеко от нас, вполне обычны: Солнце, звезды, Луна, далекий маяк или даже уличный фонарь высотой в 20 м входят в эту категорию, потому что каждая точка этих объектов посылает лучи, которые достигают нашего глаза параллельно друг другу. В оптике такие источники света называются бесконечно удаленными. В дальнейшем, когда мы будем рассматривать параллельные лучи, это будет означать, что они исходят от бесконечно удаленного точечного объекта.

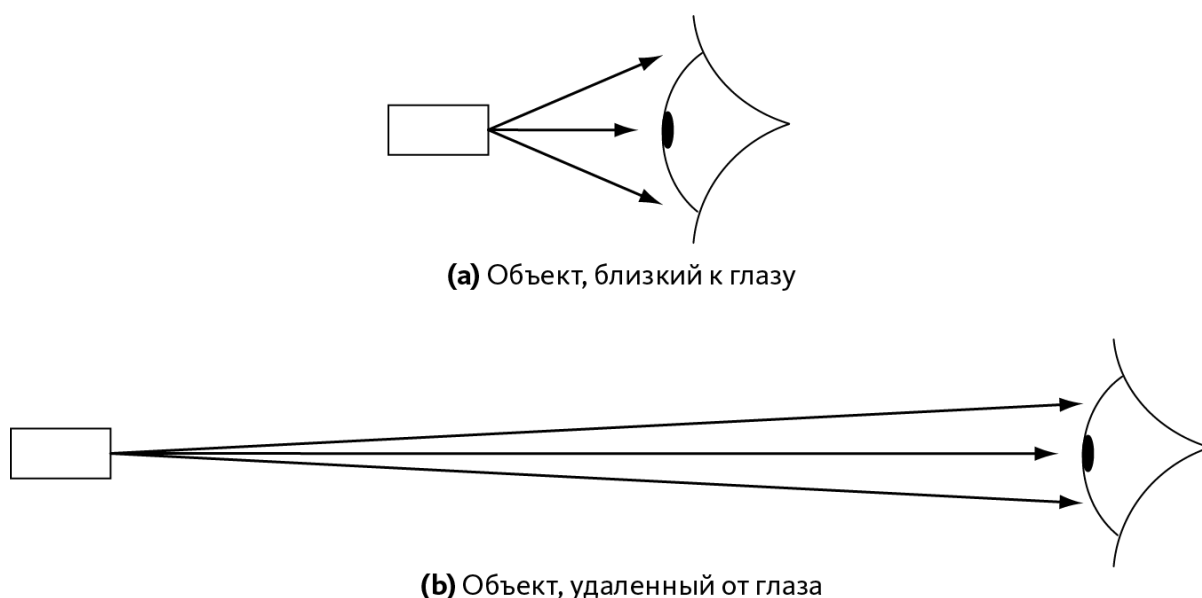


Рис. 20.2 – Влияние расстояния до объекта

(a) – лучи, исходящие из точки в лампе, сильно наклонены относительно друг друга. **(b)** – мы видим, что угол между лучами довольно мал. Чем дальше объект, тем меньше будет этот угол. На определенном расстоянии можно считать, что все лучи параллельны (бесконечно удаленный объект).

Бесконечно протяженный объект

Продолжим пример с Солнцем: оно бесконечно удалено, это значит, что заданная точка его поверхности посылает лучи, которые достигают нашего глаза параллельно друг другу. Но Солнце огромно: лучи, исходящие от его края, не параллельны тем, что исходят от его центра (→ **рис. 20.3**).

Если бы все лучи были параллельны друг другу, Солнце было бы лишь точкой на небе, что вовсе не так. Мы видим, что источник света может быть бесконечно удаленным, но его лучи не параллельны друг другу при условии, что объект является «протяженным» (то есть достаточно большим).

Лучи, исходящие от края Солнца, показанные на **рис. 20.3**, образуют угол на уровне глаза. Этот угол называется «видимым диаметром» Солнца. Очевидно, что видимые диаметры выражаются в градусах, а не в метрах.

В дальнейшем мы попытаемся понять траекторию световых лучей, прежде чем попробуем изменить ее с помощью оптических приборов (целью этого может быть увеличение объекта, усиление света и т. д.). Мы рассмотрим ситуации, когда явление дифракции, описанное в предыдущей главе, не возникает: для этого понадобятся достаточно широкие отверстия, ибо мы видели, что дифракция возникает в узких отверстиях. Если точнее, можно продемонстрировать, что отверстие должно быть гораздо больше длины волны излучения. Поскольку длина волны видимого света измеряется в микрометрах, это условие будет легко соблюсти.

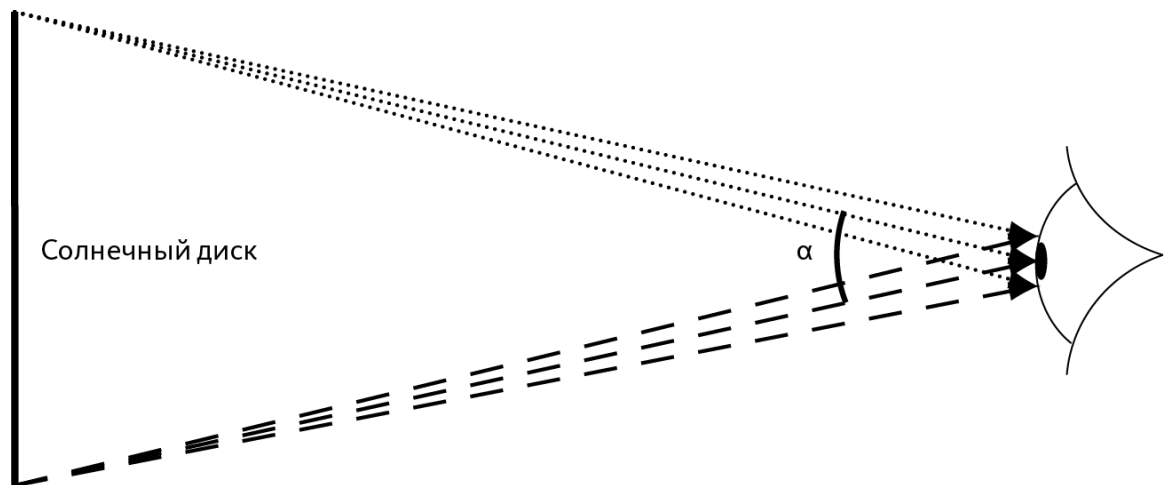


Рис. 20.3 – Бесконечно удаленный объект

Мы убеждаемся, что все лучи, исходящие из одной точки солнечного диска, почти параллельны друг другу. А лучи, исходящие из двух разных точек диска, не параллельны. Угол α , под которым мы видим солнце, называется видимым диаметром.

2. Взаимодействие света и материи

Можно объяснить, что свет взаимодействует с материей довольно просто: на микроскопическом уровне материя состоит из атомов, протоны и электроны которых обладают зарядом. Между тем свет является колеблющимся, распространяющимся в пространстве электрическим полем: это поле вызывает колебание зарядов.

Но такие колеблющиеся заряды сами создают колеблющееся электрическое поле: это поле, созданное зарядами, накладывается на поле света, которое распространяется, возмущая его. В итоге свет не может свободно перемещаться в материи: свет возмущает заряды материи, которые, в свою очередь, возмущают свет...

Это возмущение может вызвать множество явлений: рассеяние света, снижение скорости волны по сравнению со скоростью в вакууме, абсорбцию, рефлекссию или рефракцию. Мы сделаем их краткий обзор.

Рассеяние света

Она возникает, когда электромагнитное поле света заставляет электроны вибрировать внутри атомов. Вибрируя, электрон также начинает испускать электромагнитную волну во всех направлениях. Частота возникающего света соответствует частоте вибрации электрона, которая, в свою очередь, соответствует частоте падающего света. Таким образом, свет просто рассеивается во всех направлениях без потери энергии и изменения длины волны.

Можно продемонстрировать, что длинные (красные) волны, которые колеблются медленно, мало подвержены этому феномену: в каком-то смысле у электронов есть время сопровождать движение волны, не возмущая ее. У коротких волн (синих) быстрая вибрация электронов уже не в фазе и возмущает электромагнитное поле: возникает рассеяние.

Наиболее наглядный пример этого явления – голубой цвет неба: электроны молекул атмосферы рассеивают синее излучение, исходящее от солнца, во всех направлениях. Таким образом, небо само становится источником синего света, рассеянного во всех направлениях: именно благодаря ему на земле светло, когда солнце скрывается за тучей или недалеко за краем горизонта.

Это также объясняет красный цвет солнца на рассвете и на закате: синий цвет, идущий от солнца, был рассеян во всех направлениях, тогда как красный продолжает идти по прямой, достигая нашего глаза. Толстый слой атмосферы, через который мы смотрим на горизонт, усиливает этот феномен, но он возникает в любое время дня: солнце кажется немного желтее (менее белым), чем есть на самом деле.

Показатель преломления (рефракции)

Взаимодействие с зарядами материи уменьшает скорость волны относительно скорости ее перемещения в вакууме (ограничимся таким условием). Как и при рассеянии, волны большой длины (красные) менее подвержены этому, чем короткие (синие), то есть в среде красный цвет распространяется быстрее синего.

По сравнению с распространением в вакууме отличие может быть значительным: например, в стекле скорость света составляет порядка 200 000 км/с, в воде – 225 000 км/с, а в вакууме – 300 000 км/с. Скорость света в воздухе приближается к скорости в вакууме: среда, мало уплотненная газом, слабо возмущает скорость излучения.

Вместо того чтобы уточнять скорость света в той или иной среде, лучше обозначить отношение n между скоростью в вакууме c и скоростью в среде v : по определению $n = c/v$.

Коэффициент n называется «показателем преломления среды» и является очень важной величиной в оптике. Он всегда больше 1, потому что материя всегда стремится замедлить свет по сравнению с вакуумом ($v < c$). Для стекла он составляет примерно 1,5, для воды 1,3, для воздуха 1,0.

Как мы убедились, этот показатель зависит от длины волны: для синего света он немного выше (короткая длина волны → низкая скорость → высокий показатель преломления), чем для красного света (большая длина волны → скорость, близкая скорости света в вакууме → показатель преломления близок к 1).

Абсорбция (поглощение)

Молекулы содержат много атомов, которые могут быть заряжены (это мы объяснили в главе 11). Так, прохождение электромагнитной волны может заставить атомы вибрировать внутри молекул: эта вибрация тут же передается от атома к атому путем толчков, что передает вибрацию соседним молекулам. В конце концов температура среды повышается: это значит, что свет передал материи энергию. Сила свечения, то есть амплитуда электромагнитного поля, уменьшилась: произошла абсорбция (поглощение).

Волны разной длины поглощаются по-разному: волна поглощается сильнее, если она колеблется с частотой, совпадающей с естественной вибрацией атомов в молекулах (явление резонанса). Между тем каждое вещество обладает различными молекулами, составленными разными способами. Таким образом, каждое вещество будет поглощать волны разной длины, то есть разного цвета. Сироп grenadin больше поглощает синий цвет: только красный цвет может выйти наружу, что объясняет цвет сиропа. Аналогично мятный сироп пропускает только зеленый цвет...

Стекло также имеет свойства абсорбции, несмотря на свою прозрачность: оно поглощает инфракрасные и ультрафиолетовые лучи, но не видимый свет. Это объясняет, почему мы не можем загорать через стекло (ультрафиолетовые лучи сквозь него не проходят). Это объясняет также «парниковый эффект»: свет солнца может проникнуть внутрь теплицы, но инфракрасное излучение предметов внутри не может выйти наружу (мы вернемся к этому позже). Салон машины, например, начинает сильно нагреваться.

Мимоходом заметим, что радиоволны (волны очень большой длины) в основном поглощаются очень мало, каким бы ни было вещество, благодаря очень медленным колебаниям (низкой частоте): поэтому мы можем слушать радио дома.

Абсорбция также объясняет цвет всех непрозрачных предметов вокруг нас: цвета, которые мы видим, те, что не были поглощены внутри. Синий предмет поглощает красный цвет, и наоборот. Кроме того, черный цвет поглощает все, а белый ничего.

В частности, вода поглощает в основном красный цвет, что объясняет синий цвет моря. Нырятьщику, который погружается в глубину, все окружающее также кажется синеватым. Также необходимо, чтобы толщина воды была достаточной для абсорбции: так, лужа выглядит прозрачной, потому что свет может пройти через небольшой слой воды без искажений. Наконец, отметим, что отражение синего неба усиливает его синий цвет: в пасмурную погоду море выглядит гораздо менее синим.

На этом этапе напрашивается вопрос: мы сказали, что белая стена ничего не поглощает, как и прозрачное стекло. Почему же тогда стена непрозрачная и не пропускает свет? На это мы ответим в следующем параграфе.

Отражение и преломление света

Когда свет резко переходит из одной среды в другую, взаимодействие с атомами, близкими к поверхности, заставляет волну частично «отскочить»: происходит отражение. Отражение также очень сильно зависит от вещества и молекул, которые оно содержит. В любом случае если излучение поглощено, оно не может отражаться.

Возьмем, например, синюю стену: она лучше поглощает красный цвет, отражает синий и ничего не передает (она непрозрачна). Другой пример: сироп гренадин больше поглощает синий цвет, частично отражает красный, а часть пропускает через себя (он относительно прозрачен в красном секторе спектра).

Мы видим, что внешний вид различных предметов является сложной игрой поглощений и отражений света на их поверхности. Большинство веществ полностью поглощают излучения, которые не были отражены, что делает предметы непрозрачными. Стекло и вода составляют два важных исключения.

Как именно отражается свет, мы объясним чуть позже в этой же главе.

Что касается части света, которая не была отражена и не была сразу поглощена, она продолжает свой путь внутри вещества. При этом можно видеть, что свет резко меняет траекторию, проникая внутрь объекта: происходит преломление, или рефракция. Мы подробно вернемся к преломлению света позже в этой главе.

3. Траектория света

Искавленные лучи

Происхождение кривизны световых лучей

Чтобы понять траекторию света, мы снова возьмем пример волны на поверхности воды. Если мы бросим камень в воду, волна расходится радиально, в форме концентрических увеличивающихся кругов (→ **рис. 20.1**). То есть соответствующие «лучи» являются радиальными прямыми, направленными к внешнему краю: иначе говоря, речь идет о *прямолинейных* лучах. Также в однородной среде свет распространяется прямолинейно: световые лучи являются прямыми.

Теперь представим прямую волну, которая распространяется слева направо (→ **рис. 20.4**). Предположим также, что среда не однородна и волна распространяется ниже быстрее, чем выше, на **рис. 20.4.a**. На **рис. 20.4.b** ясно видно, что через короткий промежуток времени волна не только продвинется вперед, но и отклонится вверх. Поскольку волна перемещается вперед, ее продвижение будет происходить «вверх вправо». Чем больше проходит времени, тем сильнее искривляется волна.

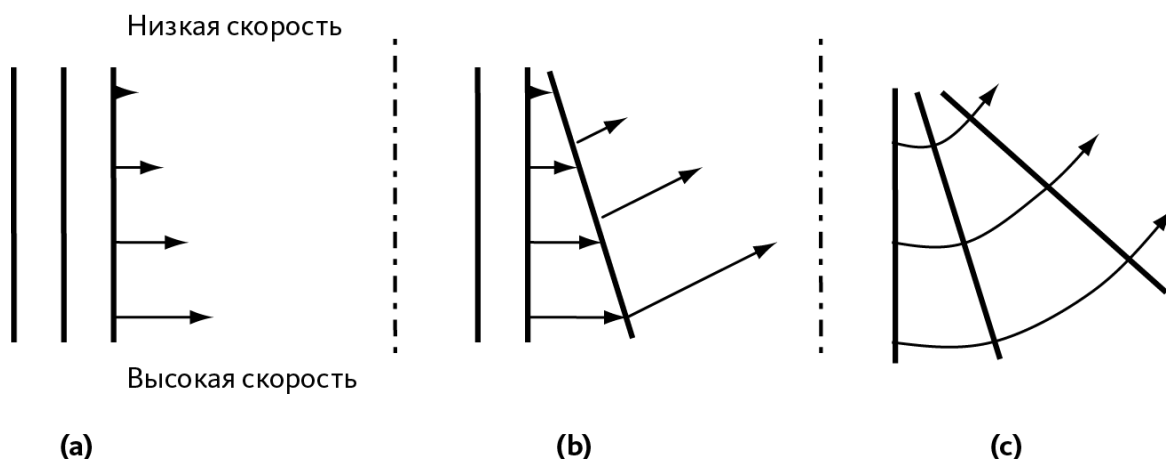


Рис. 20.4 – Распространение волны в неоднородной среде

(a) – прямая волна распространяется слева направо (прямая волна). Она достигает такой зоны, где ее скорость выше снизу, чем сверху. (b) – мы видим, что волна искривляется кверху из-за разницы в скорости. (c) – мы представили последующую траекторию волн: волна искривлена вверх, то есть к зоне низкой скорости. Точно так же световые лучи искривлены в сторону зон с высоким показателем преломления (слабых скоростей).

Если теперь мы представим направление распространения волны в форме луча, мы увидим, что это направление искривляется вверх, – иначе говоря, луч искривлен вверх, то есть в сторону зоны низкой скорости (→ рис. 20.4.с).

То же самое касается электромагнитной волны: если среда не однородна, траектория света всегда искривляется в стороны зон низкой скорости, то есть траектория света искривляется в сторону зон с высоким показателем преломления. Световые лучи больше не прямолинейны, а образуют изгибы.

Феномен миража

Существует хорошо известное следствие искривленной траектории световых лучей – миражи. В основном на высоте 10 м концентрация воздуха примерно равна концентрации над поверхностью земли. Но предположим, что мы очутились в пустыне: земля сильно нагрета солнцем, а температура воздуха высока как над самой землей, так и на высоте 10 м.

Между тем мы знаем, что давление P пропорционально произведению концентрации воздуха n и температуры T : $P = knT$. Поскольку на высоте 10 м давление равномерное, повышенная температура снижает концентрацию воздуха. Таким образом, в пустыне концентрация воздуха рядом с поверхностью земли меньше: значит, влияние воздуха на скорость света здесь ниже («ближе к вакууму»), и свет движется быстрее у поверхности земли, чем на высоте 10 м. Иначе говоря, «коэффициент воздуха» больше на высоте 10 м, чем над поверхностью земли.

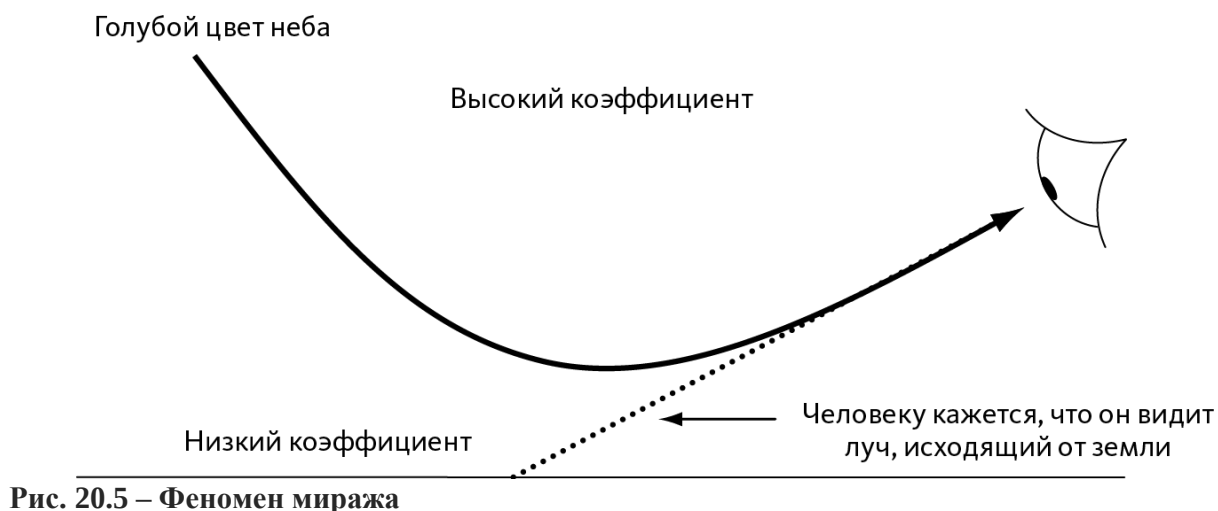


Рис. 20.5 – Феномен миража

Это значит, что свет искривляется вверх (всегда в сторону повышенного коэффициента). **Рис. 20.5** позволяет понять последствия этого: человек смотрит вниз на землю и видит луч, идущий не от земли, а с неба. Между тем небо голубого цвета: глядя на землю, человек видит голубой цвет, который ассоциируется у него с водой. Он стал жертвой миража...

Существуют также обратные миражи, когда земля слишком холодная: пейзаж кажется подвешенным в воздухе, потому что, глядя на небо, человек видит луч, исходящий от земли...

Наконец, благодаря этому феномену мы можем видеть дальше, чем позволяет округлость Земли: если луч преодолеет изгиб Земли, он может распространиться высоко над ее поверхностью. В этом случае человек сможет увидеть далекую гору, которую теоретически невозможно увидеть по прямой.

Путь, который хорошо видно

Настало время уточнить величину изгиба светового луча. Возьмем пример луча, направленного из точки А в точку В в неоднородной среде. На **рис. 20.6** мы использовали факт, что траектория искривляется в сторону зоны низкого коэффициента: чтобы дойти от А до В, свет проходит по дуге.

Мы сразу констатируем, что дуга ведет его через зону высокой скорости (низкого коэффициента). Произведя некоторые подсчеты, мы заметим, что такой путь позволит свету сэкономить время по сравнению с прямой траекторией. Конечно, путь получается длиннее, чем по прямой, но, поскольку по дуге свет проходит быстрее, время пути меньше.

Можно пойти дальше. Учитывая уже изложенные законы электромагнетизма, можно сделать довольно удивительный вывод: чтобы пройти из точки А в точку В, свет стремится приобрести траекторию, которая максимально увеличит или локально минимизирует время пути.

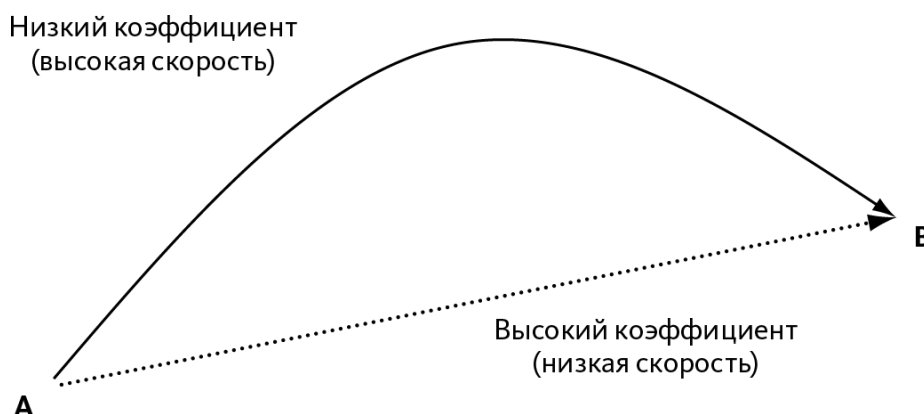


Рис. 20.6 – Самый быстрый путь

Нужно несколько пояснить эту фразу, которая может показаться непонятной. Возьмем для примера лампу, свет которой распространяется по всем направлениям. Положим недалеко от нее зеркало, как показано на **рис. 20.7**. Мы можем видеть лампу двумя способами: глядя на нее прямо или в зеркало, которое отражает свет лампы.

Это значит, что для того, чтобы пройти от лампы до нашего глаза, свет одновременно проходит два пути: прямой и через зеркало. Прямой путь свет проходит за минимальное время: любой другой луч пошел бы по более длинному пути. Что же касается пути через зеркало, здесь тоже использован локальный минимум: если представить другие лучи, соседствующие с прямым и проходящим через зеркало (на схеме обозначены пунктиром), можно убедиться, что их путь был бы длиннее.

Разумеется, электромагнитная волна лампы занимает все пространство: лампа испускает свет во всех направлениях. Но среди всех световых лучей только два достигают глаза. Другие лучи не идут к глазу, потому что тогда их путь по времени не был бы локально минимальным (ни максимальным).

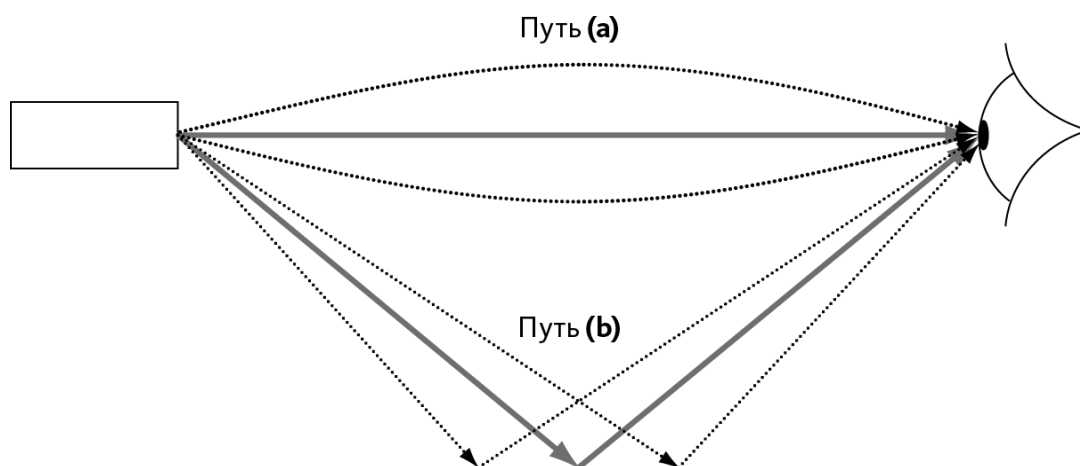


Рис. 20.7 – Трактории, выбранные светом

В однородной среде кратчайший путь проходит по прямой, то есть светом выбран путь (a).

В неоднородной среде (присутствие зеркала) лучи могут отклоняться от прямой линии: среди всех возможных отклоненных лучей путь (b) самый короткий (пунктир показывает пути более длинные).

Таким образом, свет одновременно проходит два пути – (a) и (b).

4. Отражение и преломление

Предыдущий пример побуждает объяснить подробнее, что происходит, когда свет внезапно достигает среды с другим коэффициентом, как, например, поверхность зеркала или любого другого объекта. Вступая в контакт с материей и взаимодействуя с ее атомами, волна делится надвое: одна часть проникает внутрь вещества, другая часть отражается (законы электромагнетизма позволяют понять почему, здесь мы не будем о них говорить).

Закон отражения

Для начала рассмотрим отраженную часть: отражение всегда происходит так, что свет выбирает путь «локального экстремума» времени. Геометрически можно легко доказать, что это тот случай, когда угол падения равен углу отражения относительно перпендикулярной поверхности прямой (→ **рис. 20.8**). Это «закон отражения». Добавим, что перпендикулярная поверхности прямая называется «нормалью».

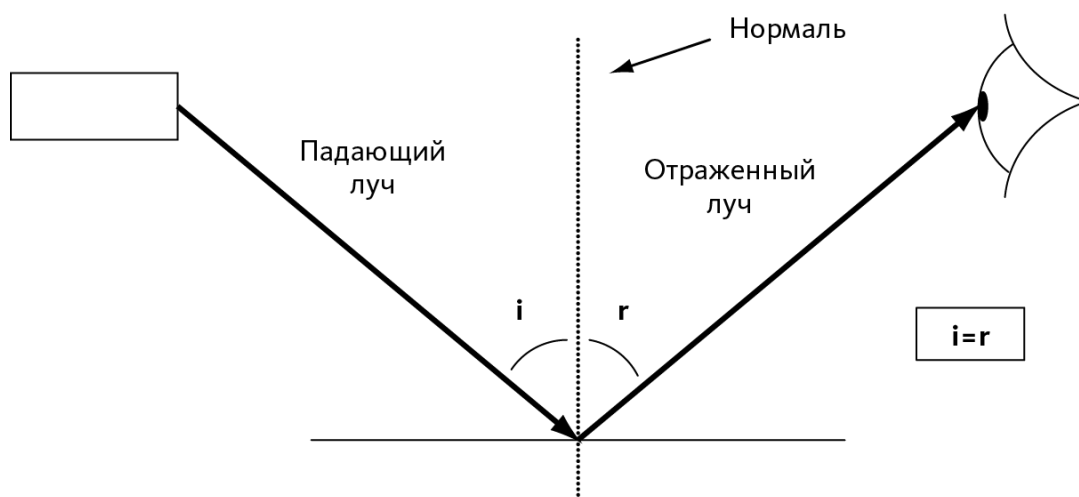


Рис. 20.8 – Закон отражения

Мы сказали, что всегда есть отраженная часть, однако не все поверхности ведут себя как отражающее зеркало, далеко не все... Дело в том, что на микроскопическом уровне поверхность очень неровная (мы говорили об этом в главе 5), поэтому пучок света отражается во всех направлениях, поскольку он падает на участки поверхности с очень разным наклоном (→ рис. 20.9)

Возьмем для примера шкаф, освещенный солнцем: он отражает свет (иначе бы мы его не увидели), но во всех направлениях. Под каким бы углом мы ни смотрели на шкаф, мы увидим одно и то же, потому что ни одно из направлений отражения не является главным; в то время как когда мы смотрим на зеркало, то можем видеть солнце лишь под определенным углом.

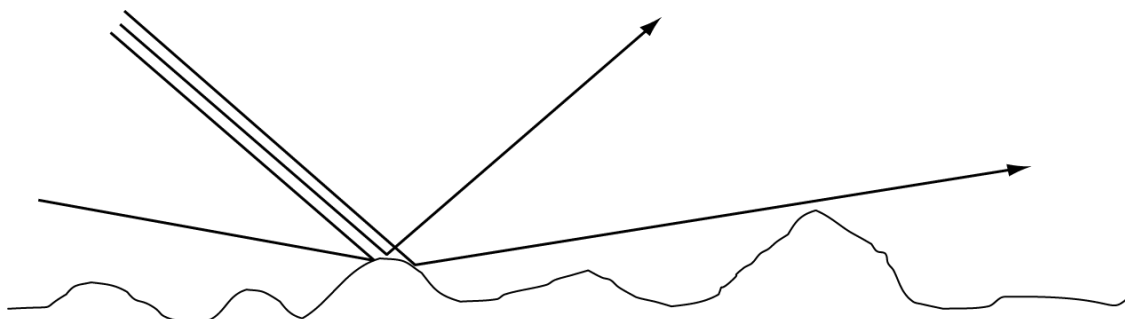


Рис. 20.9 – Отражение на неровной поверхности

В любой точке поверхности закон отражения сохраняется. Но если на микроскопическом уровне поверхность неровная, свет выглядит отраженным во всех направлениях.

Понятно, что для того, чтобы изготовить зеркало, необходимо прежде всего иметь идеально гладкую поверхность на микроскопическом уровне. На практике используется слой металла, помещенный на пластину полированного стекла. Именно этот металлический слой возвращает наше изображение, а стекло, помещенное спереди, служит для создания идеально гладкой поверхности.

Напомним, что материя по-разному реагирует на волны разной длины, достигающие ее поверхности. В том, что касается видимого света, если вещество в основном отражает волны большой длины, он будет красным. Если оно больше отражает короткие волны, свет будет синим. По этой причине большинство объектов вокруг нас имеют не цвет света, который их освещает, а свой собственный цвет.

Закон преломления

Рассмотрим теперь ту часть света, которая проникает внутрь вещества, так называемый преломленный луч. Мы уже говорили, что большая часть веществ сразу поглощает свет. Если взять прозрачное стекло, прекрасно пропускающее свет через себя, каким будет путь светового луча, который в него проник?

Луч избирает путь локального экстремума времени. Рассмотрим **рис. 20.10**, где свет проходит от среды низкого коэффициента в среду высокого. Это значит, что он идет медленнее после пересечения поверхности вещества (эта поверхность называется границей двух сред).

Какой путь выбрать от А до В? Можно было бы подумать о прямой как кратчайшем расстоянии. Но хитрость в том, чтобы как можно дольше оставаться в «быстрой зоне», а не в «медленной»: так луч сэкономит время относительно прямого пути. Именно так и поступает свет, как показано на **рис. 20.10**. Видно, что если i_1 и i_2 являются углами падения и отражения относительно нормали границы двух сред, а n_1 и n_2 , соответственно, коэффициентами преломления двух сред, путь, занимающий наименьшее время, соответствует $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$. Это закон преломления.

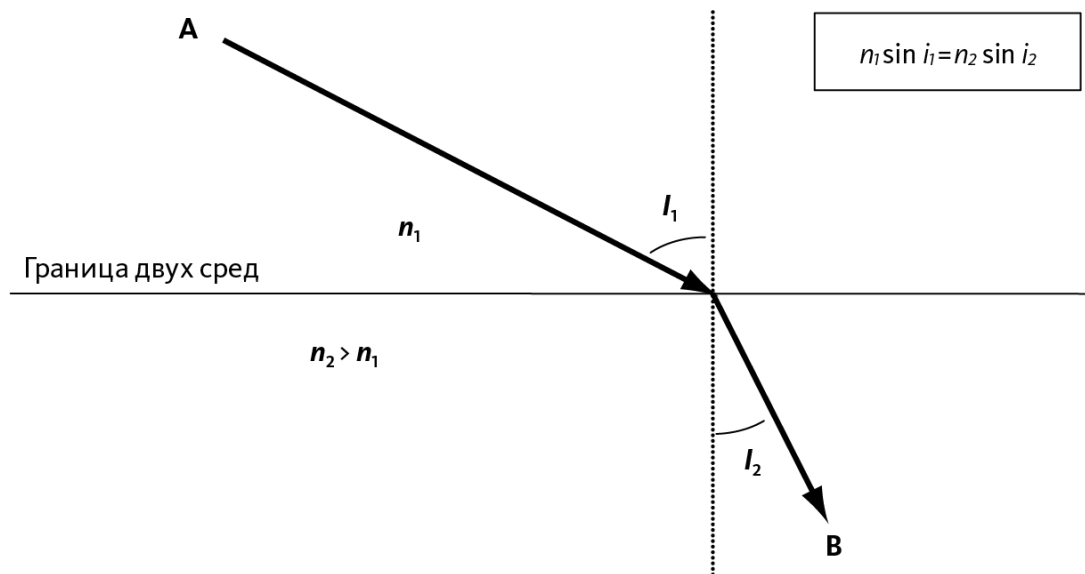


Рис. 20.10 – Закон преломления

Запомним, что луч *тем ближе* к нормали поверхности, *чем выше* коэффициент среды. *Чем ниже* коэффициент, *тем дальше* луч от нормали.

Чтобы проиллюстрировать это, можно взять классический пример: представим на пляже человека А, который спешит на помощь тонущему В. Он мог бы подбежать сразу к воде, прежде чем прыгнуть в нее и поплыть на помощь. Но гораздо умнее будет пробежать по пляжу до точки, в которой утопающий окажется напротив него, чтобы начать плыть оттуда. Человек бежит быстрее, чем плавает, и таким образом он экономит время. Именно так поступает и свет.

Законы отражения и преломления, которые могут быть продемонстрированы с точки зрения законов электромагнетизма, являются основополагающими при создании любого оптического инструмента. Об этом мы поговорим в следующей главе.

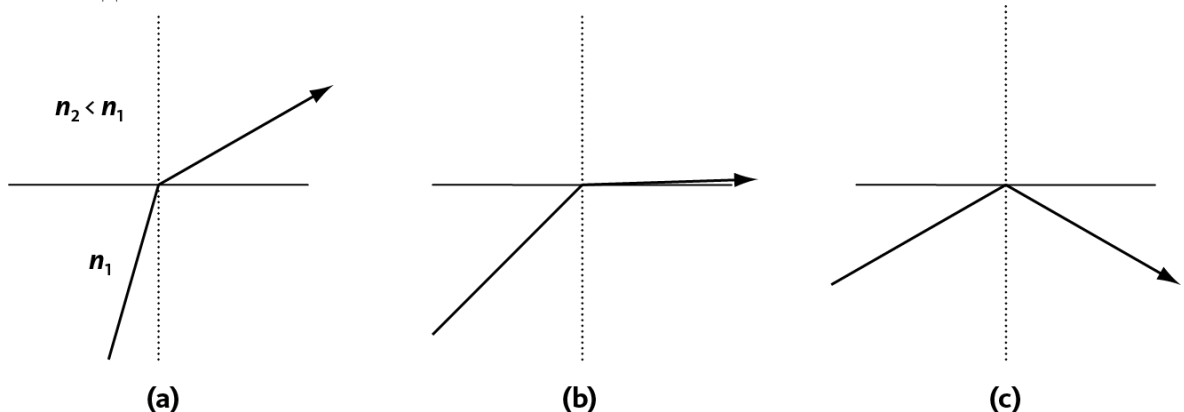


ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Когда луч переходит в среду с меньшим коэффициентом концентрации (например, из воды в воздух), он удаляется от нормали в сторону поверхности. Это значит, что начиная с определенного угла падения преломленный луч почти полностью «ложится» на поверхность

(см. схему ниже). При большем угле падения луч уже не может преодолеть границу двух сред (становится *невозможно* проверить закон преломления). То есть происходит отражение луча, и он продолжает свой путь по ту же сторону границы. Поверхность ведет себя как зеркало.

Этот феномен используется при создании оптического волокна: это позволяет световому сигналу распространяться вдоль гибкого стержня путем последовательных отражений. По сравнению с передачей по электрическому кабелю скорость остается почти такой же, поскольку речь идет об электромагнитной волне (радиоволны в электричестве, свет в оптических волокнах). С другой стороны, частота сигнала в электрическом кабеле ограничена поверхностным эффектом (глава 20) и, следовательно, «плотность» передаваемой информации тоже. В то время как в оптическом волокне подобных ограничений не существует: его пропускная способность порядка Гбит/с, то есть миллиарды импульсов в секунду передаются бинарными кодами.



От части (a) к части (c) падающий луч все больше отклоняется. В части (b) мы видим, что луч находится на границе преломления, поскольку он едва поднимается на другой стороне. Если бы угол падения был больше, преломления не произошло бы. В этом случае происходит «полное отражение», и в силу вступают законы отражения.

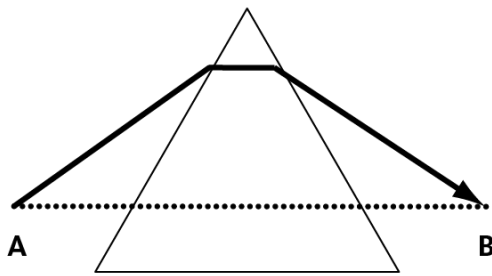
5. Дисперсия света

Призма

Рассмотрим стеклянную призму, на которую направим пучок света: теперь мы можем объяснить опыт с дисперсией света, проделанный Ньютоном. Коэффициент преломления стекла составляет примерно 1,5, то есть через стекло свет проходит явно медленнее, чем через воздух. При проходе от точки A к точке B на **рис. 20.11** мы видим, что прямой путь проходит через толстый слой стекла и он не самый быстрый. Световой луч «предпочитает» пройти там, где толщина меньше, пусть путь и будет немного длиннее: это объясняет отклонение луча во время прохода через призму.

Почему свет, проходя через призму, раскладывается на разные цвета? Потому что красный цвет проходит в стекле быстрее, чем синий, как в большинстве веществ: поэтому у красного цвета путь более прямолинейный, чем у синего. Другими словами, красный цвет отклоняется меньше синего: на экране, поставленном за призмой, мы можем наблюдать радугу.

Этот опыт также показывает, что белый свет является совокупностью многих волн разной длины: здесь смешаны все цвета. То есть белый свет не является синусоидальной волной с единой длиной, а наложением волн, которые колеблются с разной частотой и более или менее удалены друг от друга. Море с такими волнами показалось бы весьма хаотичным.

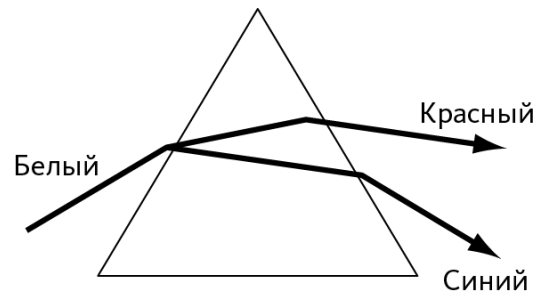


(a) «Монохромный» свет

Рис. 20.11 – Отклонение света в призме

В части (a) через призму проходит монохромный свет, то есть цветной луч с определенной длиной волны. Чтобы пройти от A до B, он идет через наименее толстый слой стекла, в котором его скорость ниже: видно, что свет в стекле идет медленнее и отклоняется от прямой линии.

В части (b) красный цвет проходит через стекло быстрее, чем синий, то есть он меньше отклонен. Происходит дисперсия белого света.



(b) Белый свет

Радуга

Из белого света на выходе из призмы мы получаем цвета радуги. Образование радуги в небе является результатом тех же механизмов.

В этом случае стеклянную призму заменяют капли воды. Как и у стекла, коэффициент преломления у воды больше, чем у воздуха. Принципиальная разница в том, что капли воды имеют сферическую, а не призматическую форму. **Рис. 20.12.a** показывает путь солнечного света: красный цвет проходит сквозь воду быстрее синего, он меньше отклоняется, что приводит к дисперсии света.

И появляется радуга, потому что угол α между образовавшимися лучами и падающим лучом имеет четко определенное значение: возникает целый световой круг, чьей центральной осью является падающий луч ($\rightarrow$ **рис. 20.12.b**). В реальности на небе видна лишь верхняя часть этого круга. Чтобы увидеть нижнюю часть, нужно смотреть на землю: внизу толщина атмосферы мала, и количество капель в воздухе меньше. Поэтому нижнего края радуги не видно: мы наблюдаем лишь дугу в небе.

Также заметим, что для того, чтобы увидеть радугу, нужно, чтобы солнце было у вас за спиной, а вы должны смотреть в другую сторону. Еще отметим, что красный цвет расположен на внешнем крае радуги, а синий на внутреннем.

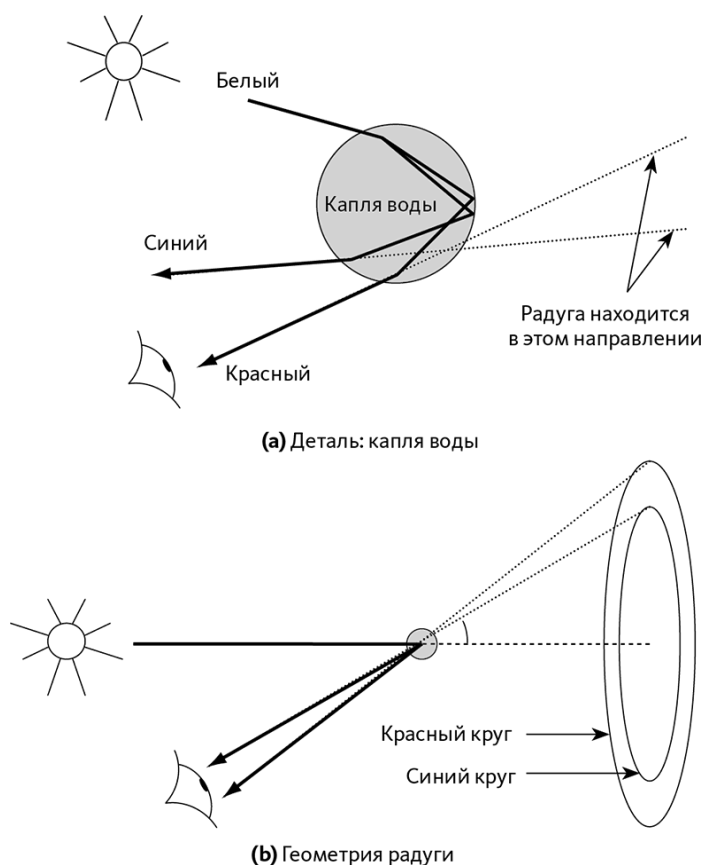


Рис. 20.12 – Радуга

6. Поляризация

1. Создание поляризованного света

Электромагнитная волна соответствует распространению колеблющегося электрического поля, объединенного с колеблющимся магнитным полем. Мы визуализировали его с помощью волны на поверхности воды, но между ними есть фундаментальная разница: поскольку электрическое и магнитное поля являются векторами, они направлены в определенную сторону пространства, которое может меняться.

Для примера возьмем вертикальный электропровод, по которому проходит переменный ток. Вокруг него образуется горизонтальное синусоидально колеблющееся магнитное поле. Это колебание будет распространяться по всему пространству в виде волны, сохраняя горизонтальное направление. В таких случаях говорят, что волна поляризована линейно, потому что электрическое и магнитное поля колеблются, сохраняя одно направление.

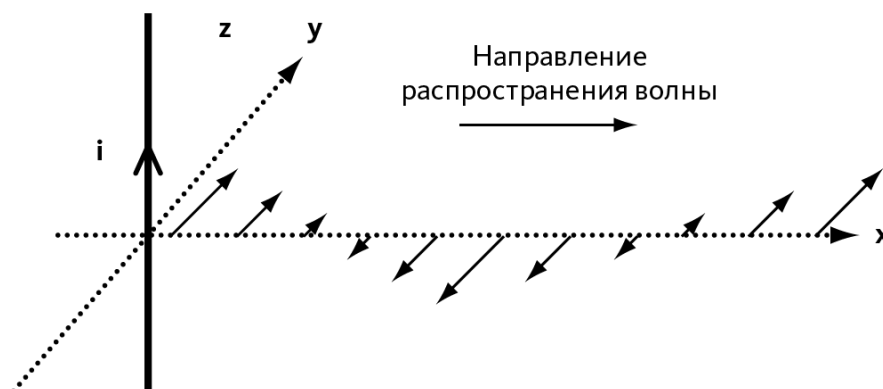
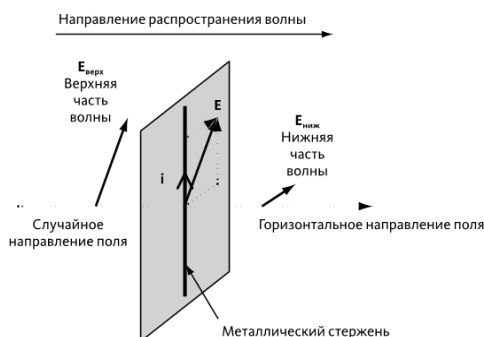


Рис. 20.13 – Пример линейной поляризации

Переменный ток i в проводе всегда направлен в одну сторону (z). Он вызывает появление синусоидального магнитного поля $B \rightarrow$; всегда направленного в одну и ту же сторону (y). Это колебание распространяется в виде волны. Вспомним, что электрическая волна всегда сопровождает магнитную, образуя «электромагнитную волну». Соответствующее электрическое поле $E \rightarrow$; (направление z) представлено не было.

А что же со светом, который является частным случаем электромагнитной волны гораздо более высокой частоты? Он образуется от движения электронов внутри атомов. Поскольку электроны вращаются вокруг атомных ядер в трехмерном пространстве, колебание происходит в случайном направлении (в отличие от предыдущего примера, где направление провода навязывало направление колебания). Вследствие этого наложение всех волн, испускаемых всеми атомами, приводит к образованию электромагнитного поля, колеблющегося во всех направлениях сразу. В таких случаях говорят, что свет, исходящий таким образом, не поляризован. Таков свет, исходящий от солнца и лампы накаливания.

Как получить линейно поляризованный свет? Простейший способ состоит в том, чтобы поместить на пути света маленькие металлические стержни толщиной меньше длины волны (то есть меньше микрометра). Свободные электроны внутри стержня придут в движение вдоль стержня под действием электрического поля волны. Это движение электронов, в свою очередь, породит электромагнитное поле, которое наложится на поле волны и возмутит его. Электрическое поле, колеблющееся в направлении стержня, будет поглощено вследствие этого взаимодействия, в то время как перпендикулярное электрическое поле продолжит распространяться, не будучи возмущенным. Пройдя через стержень, электрическое поле продолжает колебаться только в перпендикулярном направлении: свет был линейно поляризован. Металлические стержни выступили поляризаторами.

**Рис. 20.14 – Действие поляризатора**

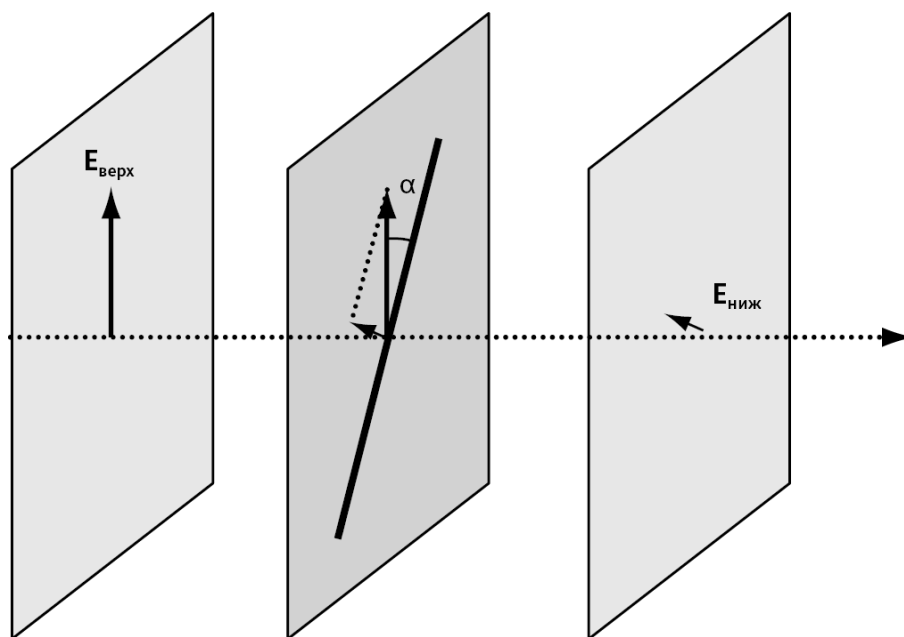
Случайное электрическое поле волны направлено в произвольную сторону. Оно приводит в движение электроны металлического стержня (появление вертикального тока). Ток, в свою очередь, создает собственное вертикальное электрическое поле, которое возмущает поле волны. В итоге единственная горизонтальная составляющая электрического поля проходит сквозь стержень, не будучи возмущенной: волна становится горизонтально поляризованной.

2. Использование поляризованного света

Поляризованный свет необходим, чтобы можно было легко менять его мощность с помощью другого поляризатора. Поместим металлический стержень в направлении колебания электрического поля: из-за явления, которое мы только что описали, поле полностью поглощено, и свет не может пройти сквозь поляризатор. Теперь повернем поляризатор на 90° : поле колеблется перпендикулярно стержню и может пройти сквозь него невозмущенным. Таким

образом, свет передан целиком. А для угла величиной от 0 до 90° передается лишь часть света: мощность света на выходе может быть просто отрегулирована изменением направления поляризатора.

Фотография служит примером применения этого явления. Атмосфера оказывает легкое поляризационное действие на солнечный свет: так, синий цвет неба обладает более предпочтительным направлением колебания. С помощью тщательно направленного поляризатора можно легко контролировать интенсивность синевы неба на фотографии. Более того, смягчение света, рассеянного в воздухе, придает контурам предметов больше четкости, увеличивая резкость.



Поляризатор

Рис. 20.15 – Действие с поляризованным светом

В верхней части $E_{\text{верх}}$ волна поляризована вертикально. Только составляющая, перпендикулярная стержню, может пройти сквозь него: мы видим, что чем меньше угол α , тем слабее поле $E_{\text{ниж}}$. То есть угол направления поляризатора управляет мощностью света на выходе.

Отметим, что некоторые насекомые (например, пчелы) пользуются поляризацией света неба, чтобы ориентироваться в пасмурную погоду. Аналогично, если бы наши глаза были поляризаторами, интенсивность синевы неба изменялась бы в зависимости от направления взгляда, помогая нам ориентироваться даже при отсутствии солнца.



ОЧКИ 3D

В фильмах 3D в основном используется явление поляризации. Видение объема предмета является результатом того, что левый глаз видит окружающее пространство под другим углом, нежели правый: картинка слева не точно накладывается на картинку справа. Тогда мозг составляет четкую картину в 3D, используя эту разницу.

Чтобы смотреть фильм в 3D, достаточно передать две разные картинки левому глазу и правому глазу. Для этого картинки, предназначенные для правого глаза, поляризуются вертикально, а для левого глаза – горизонтально. Очки 3D снабжены вертикальным поляризатором на правом стекле и горизонтальным на левом. То есть через правое стекло проходят только картинки, поляризованные вертикально; для левого глаза наоборот. Оба глаза

видят разные серии картинок, что позволяет мозгу составить то, что он считает единой серией картинок 3D.

Отметим, что этот метод, основанный на линейной поляризации, вытесняется круговой поляризацией (описанной ниже) для достижения большего комфорта.

3. Круговая поляризация

Кроме колебания в заданном направлении (линейная поляризация) или во всех направлениях (отсутствие поляризации), существуют другие способы колебания электрического и магнитного поля волны. Когда поля только вращаются вокруг оси распространения, не меняя напряженности, это называется круговой поляризацией (→ **рис. 20.16**). Когда поля вращаются, а их напряженность поочередно увеличивается и уменьшается, это называют эллиптической поляризацией. В обоих случаях различают «левую» и «правую» поляризации в зависимости от направления, в котором вращается поле.

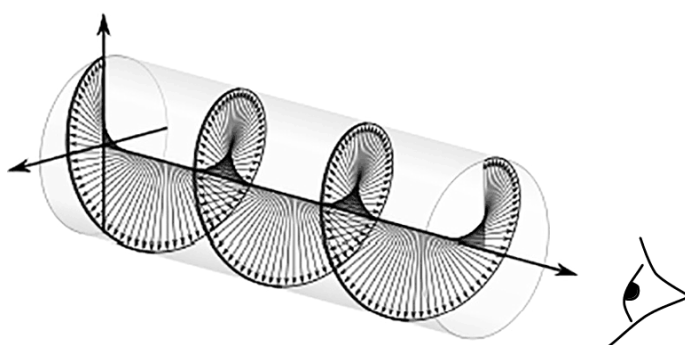


Рис. 20.16 – Пример левой круговой волны

С точки зрения наблюдателя, который смотрит на приближение волны (глаз на схеме), электрическое поле выглядит вращающимся влево и описывающим круг. С изображением в перспективе мы видим, что поле в действительности описывает спираль.

Рассмотрим круговую поляризацию: по мере того как электрическое поле описывает круг, его составляющая по вертикальной оси синусоидально колеблется, так же как его составляющая по горизонтальной оси (→ **рис. 20.17**). Таким образом, каждая из двух составляющих соответствует линейно поляризованной волне. Другими словами, циркулярно поляризованный свет является суммой двух линейно поляризованных волн.

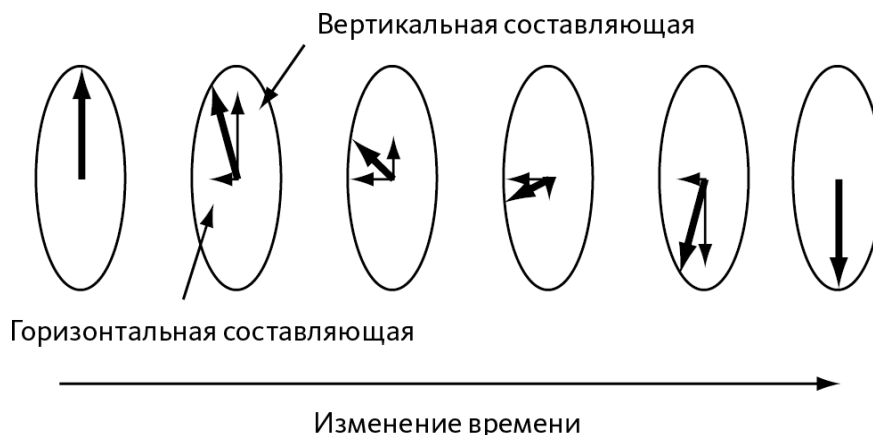


Рис. 20.17 – Наложение линейных волн

Толстые стрелки представляют левую круговую волну. Тонкие представляют вертикальные и горизонтальные составляющие толстого вектора. Мы видим, что они синусоидально

колеблются всегда в одном направлении, то есть круговая волна (толстая) соответствует наложению двух линейных волн (тонкие).

Также, если наложить две круговых волны, вращающиеся в фазе в противоположных направлениях (одна влево, другая вправо), получим линейную волну (см. схему ниже).

В итоге любая волна может быть рассмотрена как наложение линейных волн или как наложение круговых волн. Математически обе точки зрения справедливы. Физически «линейная» точка зрения более адекватна, если заряды, создающие поле, колеблются вдоль оси (как в примере с проводом, по которому проходит ток). «Круговая» точка зрения более адекватна, если заряды вращаются вокруг оси (как электроны в атоме; чтобы рассмотреть это подробно, необходима квантовая физика).

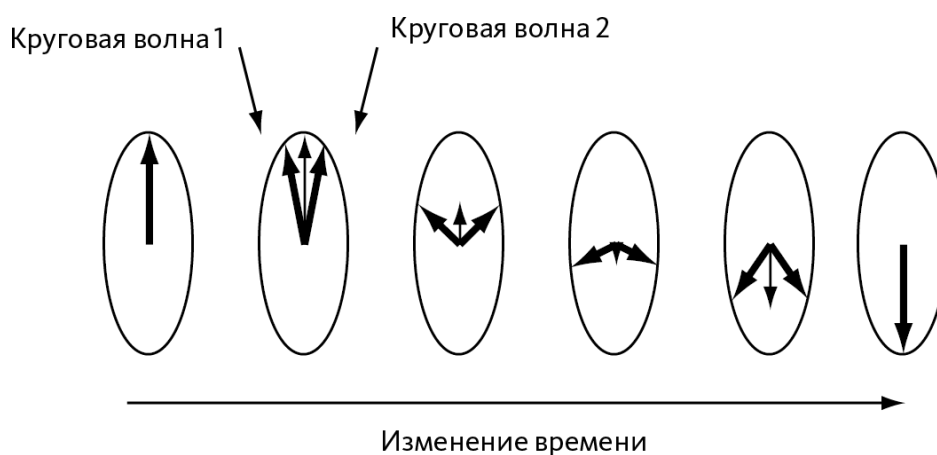


Рис. 20.18 – Наложение круговых волн

Толстые стрелки представляют две круговых волны, левую (волна 1) и правую (волна 2). Сумма двух волн представлена тонким вектором: мы видим, что он всегда остается вертикальным и колеблется синусоидально. Сумма двух круговых волн – линейная волна.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Световой луч является дугой, представляющей направление распространения световой волны в любой точке.
- Свет взаимодействует с материей благодаря движению зарядов, которое он провоцирует. Это может привести к рассеянию света, абсорбции, уменьшению скорости распространения по сравнению с вакуумом, отражению и преломлению.
- Коэффициент преломления среды является отношением между скоростью света в вакууме и скоростью света в определенной среде. Он всегда больше 1 (скорость в материи меньше) и зависит от длины волны излучения.
- Законы электромагнетизма показывают, что свет всегда распространяется по пути локального экстремума времени. Законы отражения и преломления являются производными из этого.
- Свет отражается от поверхности под тем же углом, под которым падает на нее. Когда свет проникает в другую среду, происходит преломление: свет приближается к прямой, перпендикулярной поверхности, если коэффициент более высокий (и наоборот).
- Дисперсия света в призме объясняется двояко: с одной стороны, свет избирает кратчайший временной путь, с другой стороны, красный цвет двигается в стекле быстрее синего.

- Когда электромагнитное поле всегда колеблется в одном направлении во время распространения, говорят, что свет поляризован линейно. Если оно ограничивается вращением во время распространения, говорят, что свет поляризован циркулярно.

- Интенсивность поляризованного света легко изменить. Некоторые животные пользуются этим для ориентации. Это также применяется в очках 3D.

21. Оптические приборы

В этой главе мы рассмотрим оптические приборы в широком смысле, то есть все устройства, способные передать измененное изображение объекта. Мы узнаем, почему мы видим себя в зеркале и почему поверхность воды дает «эффект лупы» на погруженные в воду предметы. Мы опишем принцип действия линз, что позволит понять, как устроены разные приборы, сам человеческий глаз, а также телескопы, микроскопы и фотоаппараты.

1. Плоские поверхности

Поверхность воды

Когда мы смотрим на поверхность воды, предметы в воде всегда кажутся ближе, чем они есть на самом деле. Например, дно кастрюли кажется ближе, когда в ней налита вода, — это так называемый «эффект лупы».

Можно легко понять этот феномен, вспомнив о световых лучах. Взгляните на рыбу под водой: поскольку мы ее видим, это значит, что лучи, исходящие от рыбы, достигают нашего глаза. Изобразим два световых луча рыбы, как показано на **рис. 21.1**: сначала они идут в воде по прямой, затем отклоняются на поверхности, потому что коэффициент преломления среды меняется. Лучи переходят из среды более высокого преломления ($n=1,33$) в среду преломления более низкого ($n=1$), то есть они удаляются от прямой, перпендикулярной поверхности («нормали»), прежде чем достичь нашего глаза. На **рис. 21.1** мы видим, что эти лучи как будто идут из точки, более близкой к поверхности воды, чем рыба. Нам кажется, что рыба не так глубоко, как на самом деле.

Можно также рассуждать, используя термин «видимый диаметр». Возьмем теперь два луча, исходящие от головы и от хвоста рыбы. Если бы не было воды, рыба была бы видна под определенным углом (этот угол является «видимым диаметром» рыбы). Но на **рис. 21.1** мы видим, что этот угол больше, когда рыба находится в воде: рыба выглядит более крупной, и это напрямую связано с тем, что она кажется ближе к поверхности.

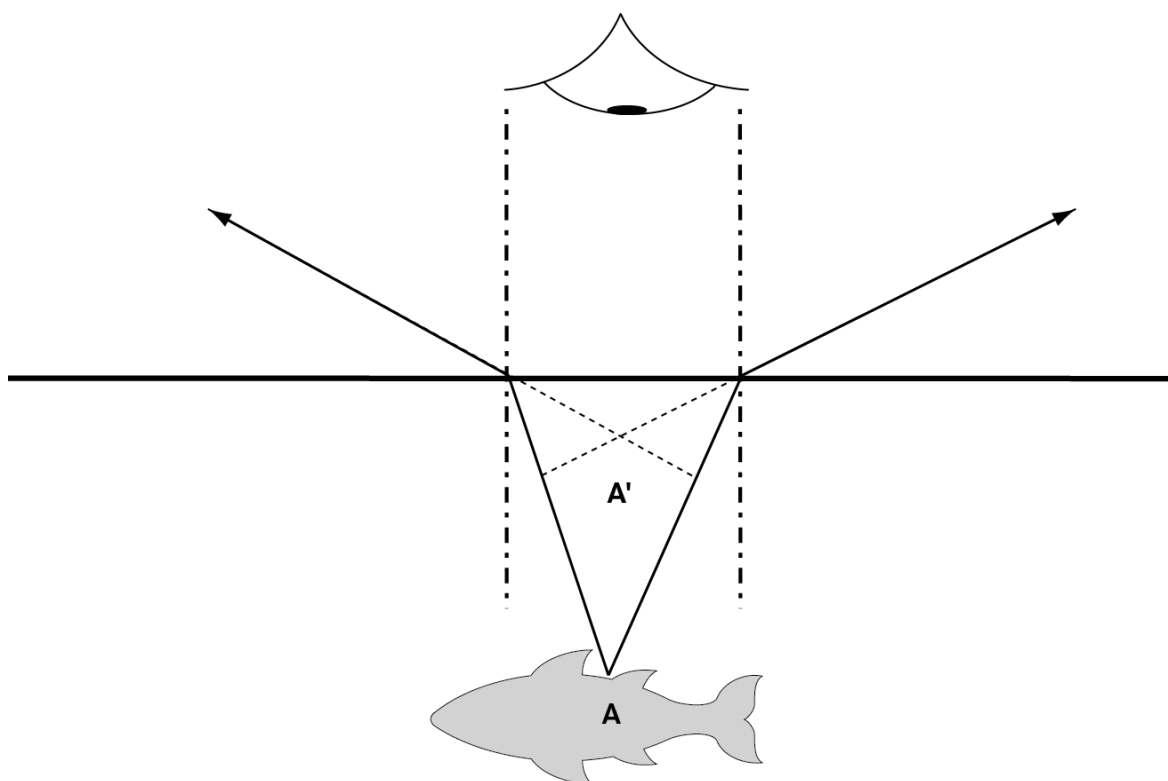
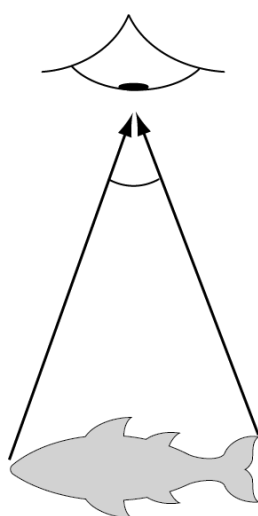
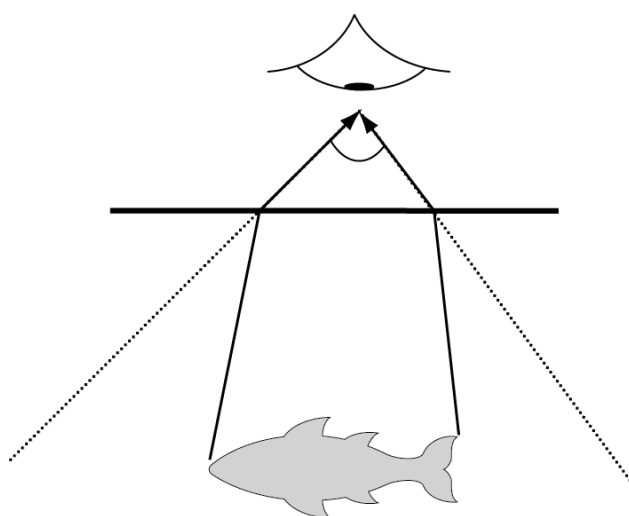


Рис. 21.1 – Вид рыбы под водой

С точки зрения глаза, лучи, исходящие из точки A, кажутся исходящими из точки A': рыба кажется ближе к поверхности воды.



(а) Рыба без воды



(b) Рыба под водой

Рис. 21.2 – «Видимый размер» рыбы

Плоское зеркало

Посмотрите на свое отражение в плоском зеркале: вам кажется, что вы находитесь «по ту сторону» зеркала. Это впечатление также можно легко объяснить с помощью световых лучей.

Предположим, что видите себя с головы до ног. Это значит, что лучи, исходящие от ваших ног, достигают вашего глаза с помощью зеркала (→ **рис. 21.3**). Изобразим два таких луча,

исходящие от ваших ног. Благодаря закону отражения мы знаем, что происходит с ними после попадания на зеркало. В этом случае они отражаются под тем же углом, под которым падают.

На **рис. 21.3** мы видим, что с точки зрения глаза эти два луча кажутся исходящими из точки, расположенной *по ту сторону* зеркала. Если точнее, мы видим, что эта точка находится на том же расстоянии, что и реальная нога, но с другой стороны, можно продемонстрировать, что картинка, видимая глазом, симметрична видимому предмету относительно зеркала.

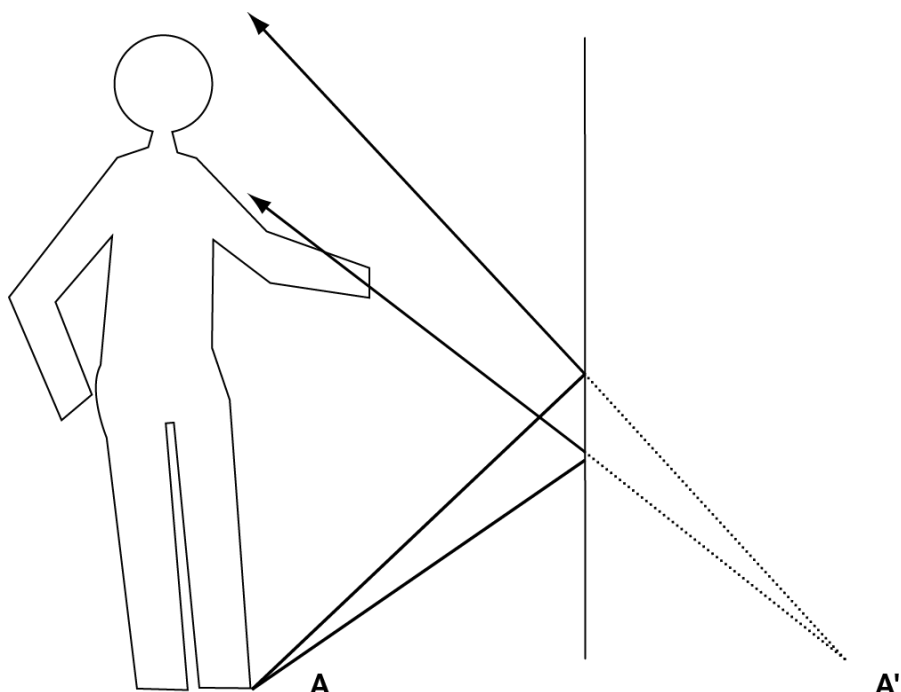


Рис. 21.3 – Наблюдение через зеркало

С точки зрения наблюдателя, оба луча, исходящие из точки A, кажутся исходящими из точки A', расположенной по ту сторону зеркала: человек видит свою ногу (в том числе) с той стороны зеркала. Если точнее, изображение самого себя, которое наблюдает человек, симметрично ему самому относительно зеркала.

Очевидно, что в повседневной жизни мы сталкиваемся с множеством иллюзий... На самом деле наш мозг всегда предполагает, что световые лучи перемещаются по прямой, и интерпретирует положение объекта согласно этому предположению; тогда как в действительности эта идеально линейная траектория далеко не подтверждена.

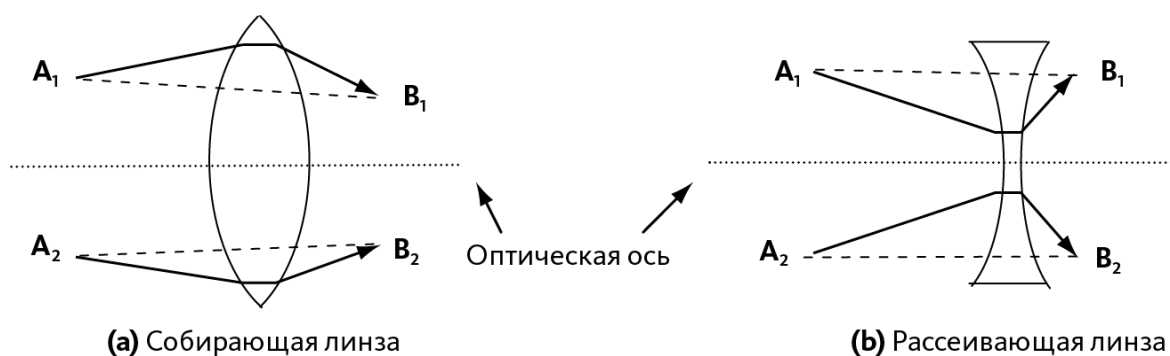
2. Линзы

Фокусировка лучей

Выпуклые и вогнутые линзы

Понятие светового луча также позволяет понять пользу сферической линзы при фокусировке световых лучей. Такая линза является куском стекла, выточенного таким образом, что с одной и с другой стороны ее поверхность имеет сферическую форму. Различают линзы выпуклые и вогнутые (→ **рис. 21.4**).

Напомним, что свет всегда выбирает путь временного локального экстремума, чтобы пройти от одной точки до другой (в основном речь идет о минимальном временном пути). Так, чтобы пройти от A_1 к B_1 (**рис. 21.4**), луч идет не по прямой, потому что для этого ему придется пройти через толстый слой стекла, в котором его скорость меньше.



(а) Собирающая линза

(б) Рассеивающая линза

Рис. 21.4 – Отклонение света в линзе

В части (а), чтобы пройти от A_1 к B_1 и от A_2 к B_2 , свет проходит по более тонким краям собирающей линзы.

В части (б), чтобы пройти от A_1 к B_1 и от A_2 к B_2 , свет проходит через более тонкий центр рассеивающей линзы.

В выпуклой линзе луч предпочитает пройти по краю с самой маленькой толщиной. В вогнутой линзе луч проходит через центр по той же причине. Из этого следует, что выпуклая линза фокусирует лучи к центральной оси (оптическая ось), в то время как вогнутая линза, напротив, заставляет лучи расходиться.

Феномен абберации (искажения)

Должно наблюдаться то же явление дисперсии, как и в призме: красный цвет должен отклоняться меньше синего. Этот феномен действительно имеет место (его называют хроматической абберацией), но если линза достаточно тонкая, он остается незначительным. В призме данный эффект усиливается за счет значительного наклона стенок.

Кроме того, можно продемонстрировать, что, если линза достаточно тонкая, все лучи, исходящие из точки А, сходятся в одной и той же точке В: это важное свойство, потому что это позволяет четко видеть сквозь линзу. На самом деле одна точка должна давать одну точку после линзы, а не пятно... Это называется «стигматизм».

Чем толще линза, тем меньше выражено это свойство, и изображение, видимое через линзу, становится более расплывчатым: это явление геометрической абберации. В дальнейшем мы будем рассматривать только тонкие линзы.

Фундаментальные параметры линзы

Чем более выпуклая линза, тем сильнее она собирает лучи. В таких случаях говорят, что у нее высокая оптическая сила. Также чем линза более вогнута, тем больше ее отрицательная оптическая сила. Оптическая сила является фундаментальным параметром линзы, поэтому мы немного уточним ее определение.

Предположим, что мы хотим посмотреть на звезду через линзу, поскольку звезда является бесконечно удаленным объектом. Более того, если мы хорошо сцентрируем линзу, лучи будут параллельны оптической оси ($\rightarrow$ рис. 21.5.а). Поскольку звезда является точечным объектом, все лучи сходятся к одной-единственной точке позади линзы, обязательно расположенной на оптической оси (благодаря симметрии). Эта точка называется задним фокусом: по определению, это изображение бесконечно удаленной точки, расположенной на оптической оси.

Расстояние от заднего фокуса до линзы называется фокусным расстоянием. Чем больше выпуклость линзы, тем ближе к центру линзы лучи сходятся на оптической оси, тем, соответственно, меньше фокусное расстояние: фокусное расстояние линзы характеризует ее способность собирать лучи (или рассеивать, если речь идет о рассеивающей линзе).

Сложность в том, что способность собирать (или рассеивать) лучи изменяется противоположно величине фокусного расстояния (маленькое фокусное расстояние → высокая собирающая или рассеивающая способность линзы). Вот почему предпочитают прибегать к величине, обратной фокусному расстоянию, оптической силе.

Предположим, наконец, что наблюдаемый объект расположен так, что лучи на выходе из линзы оказываются параллельны оптической оси. Таким образом, полученное с помощью линзы изображение становится бесконечно удаленным (→ **рис. 21.5.b**). В этом случае говорят, что объект находится на переднем фокусе линзы: по определению, передний фокус дает бесконечно удаленное изображение на оптической оси. Можно продемонстрировать, что передний фокус находится на том же расстоянии от линзы, что и задний фокус, но с другой стороны.

Линза может быть использована, например, в производстве фотоаппаратов: достаточно поместить позади линзы фоточувствительную пленку, чтобы зафиксировать полученное изображение объекта (на самом деле фотоаппарат снабжен несколькими линзами, но здесь мы не будем вдаваться в эти подробности).

Далее мы в основном сосредоточимся на гораздо более ценном оптическом приборе – наших глазах. Сделаем краткий обзор того, как работает глаз.

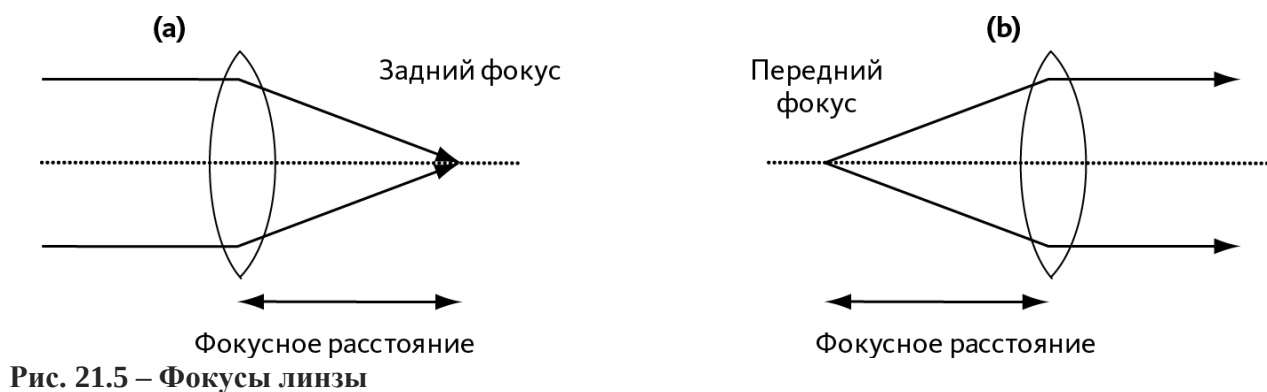


Рис. 21.5 – Фокусы линзы

3. Глаз

Структура глаза

Глаз состоит из защитной роговицы, радужной оболочки, определяющей границы зрачка, через которую проходит свет, хрусталика и сетчатки, которая служит экраном (→ **рис. 21.6**). Коэффициент преломления у хрусталика не такой, как у воздуха, и он имеет выпуклую форму, то есть является выпуклой линзой, хотя он состоит и не из стекла.

Предположим, что человек смотрит на луну, бесконечно удаленную с точки зрения оптики. Лучи, исходящие от центра луны, идут параллельно друг другу и параллельно оптической оси (→ **рис. 21.6.a**). Поскольку человек видит четкое изображение луны, это значит, что все лучи сходятся в единой точке, расположенной на сетчатке, которая, как мы видели, соответствует переднему фокусу.

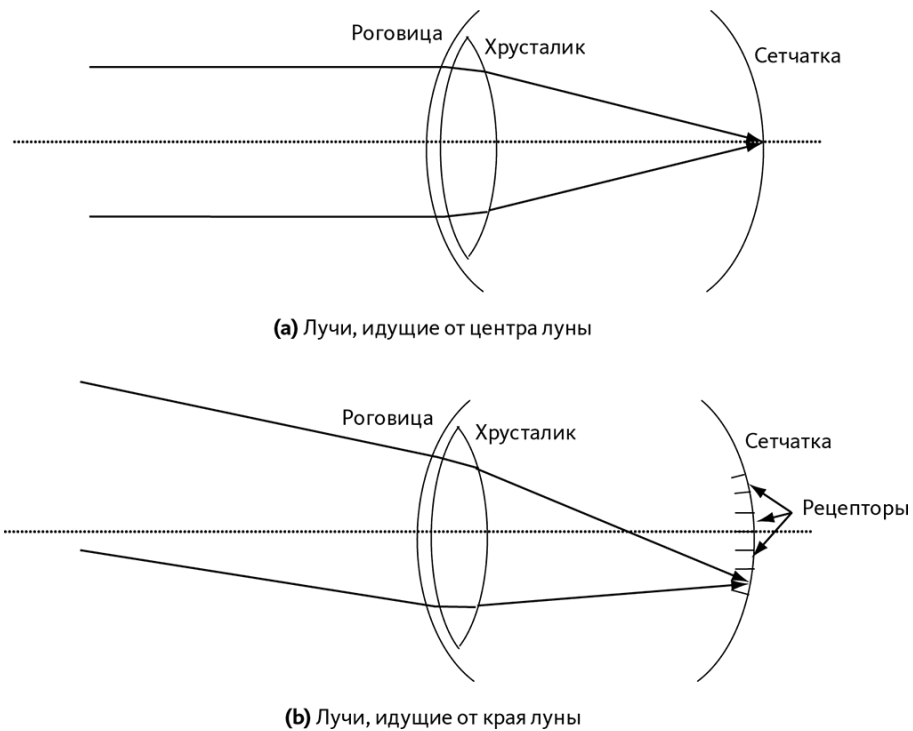


Рис. 21.6 – Изображение в глазу бесконечно удаленного объекта

В части (b) мы схематично изобразили рецепторы света на сетчатке. На рисунке видно, что в частях (a) и (b) лучи падают в разные точки, то есть можно различить центр и край луны. Иначе говоря, мы видим луну не в виде точки, а как диск.

Что же касается лучей, идущих от края луны, они также параллельны друг другу, но не параллельны лучам, исходящим из центра луны (в противном случае мы не смогли бы различить центр и край), – мы изобразили это на **рис. 21.6.б**. Они также сходятся в единой точке на сетчатке.

В итоге на сетчатке формируется четкое изображение диска. Если бы все световые лучи луны достигали одного и того же рецептора, планета была бы видна в виде точки, а не диска.

Также если глаз смотрит на две близких звезды, он сможет различить их, только если каждая звезда изобразится на отдельном рецепторе сетчатки, потому что в этом случае мозг может воспринять две информации по отдельности. Таким образом, размер рецепторов сетчатки управляет разрешением глаза, то есть нашей способностью видеть детали.

Феномен аккомодации

Из предыдущего примера мы видим, что хрусталик имеет продуманно выпуклую форму, что позволяет четко видеть бесконечно удаленный объект (его «сходимость пучка» адаптирована к такому типу объектов). Но объекты, расположенные на расстоянии всего 30 см, также четко видны, хотя не являются бесконечно удаленными.

Рис. 21.7 показывает, что в данном случае не так: лучи, идущие от некоторой точки объекта, не параллельны между собой, они расходятся в разные стороны. Чтобы собрать их на оптической оси в единую точку на сетчатке, нужно рассеять их гораздо сильнее. Иными словами, нам необходим гораздо более выпуклый хрусталик (более сильная сходимость пучка).

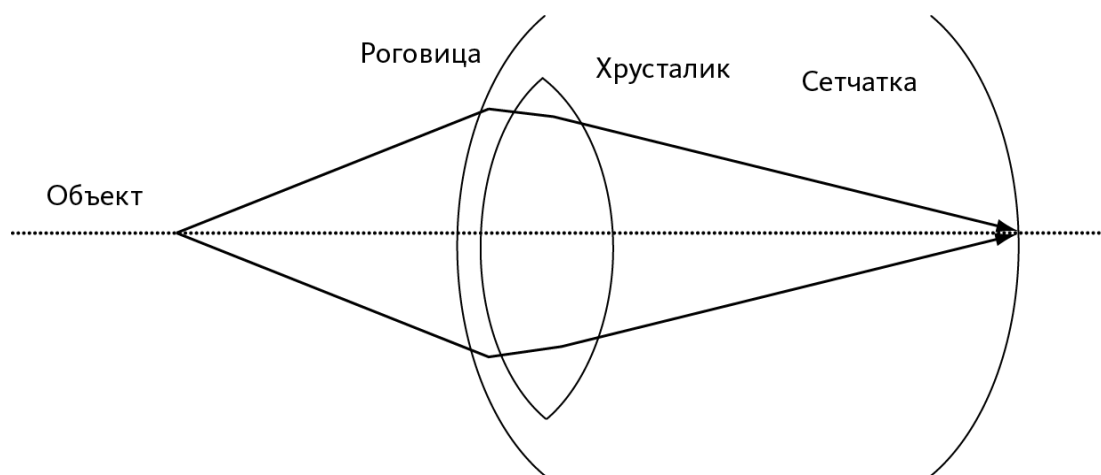


Рис. 21.7 – Изображение в глазу близкого объекта

Для того чтобы одна точка объекта давала одну точку на сетчатке (четкое изображение), необходимо рассеять лучи еще сильнее, чем в случае с бесконечно удаленным объектом (ср. рис. 21.6). Для этого хрусталик должен быть более выпуклым, что происходит при посредстве сжимающих его мышц. Это феномен аккомодации.

Для этого существуют мышцы, сжимающие хрусталик и заставляющие его становиться более выпуклым в зависимости от удаленности объекта. Такая способность делать хрусталик более выпуклым путем нажатия на него называется аккомодацией. Благодаря этому точка объекта, расположенного в 30 см от глаза, дает единую точку на сетчатке: изображение четкое.

Мозг может автоматически управлять мышцами хрусталика так, чтобы он постоянно адаптировался к расстоянию до наблюдаемого объекта, а мы этого даже не замечали: глаз является чрезвычайно эффективным инструментом.

Отметим, наконец, что радужная оболочка может открываться и закрываться, чтобы пропускать меньше или больше света (говорят, что радужная оболочка служит диафрагмой): здесь мозг также автоматически управляет закрытием и открытием в зависимости от яркости дневного света, для того чтобы свет не слепил нас, без угрозы для клеток сетчатки. Не будем забывать, что, когда свет поглощается клеткой, он передает ей свою энергию, которая в основном передается в тепловой форме (из-за вибрации атомов): при определенной яркости света рецептор сетчатки может получить необратимый ожог...



КОГДА ГЛАЗ НЕ РАБОТАЕТ КАК НАДО...

Мы описали функционирование «нормального» глаза. Рассмотрим некоторые проблемы зрения.

- **Миопия**, или близорукость, вырабатывается, когда хрусталик имеет слишком сильную выпуклость: глаз становится таким, как на **рис. 21.7**, даже без аккомодации. Иначе говоря, чтобы глаз видел четко, объект должен быть расположен близко. Когда хрусталик становится более выпуклым (аккомодация), это позволяет ему видеть еще более близкие объекты: близорукий человек способен видеть ближе, чем не близорукий. Но его хрусталик ни в коем случае не сможет стать менее выпуклым: иначе говоря, он не может видеть бесконечно удаленные объекты. Поскольку большинство объектов вокруг нас являются бесконечно удаленными или находятся от нас на большом расстоянии с точки зрения оптики, близорукий человек видит окружающее очень расплывчато.

И наоборот, при дальнозоркости хрусталик недостаточно выпуклый. Таким образом, чтобы соответствовать **рис. 21.6**, дальнозоркий глаз должен при аккомодации сузить свой хрусталик. То есть он может четко видеть бесконечно удаленные объекты, но при постоянном напряжении мускулов это приводит к утомлению глаза. Более того, дальнозоркий человек, в отличие от

человека с нормальным зрением, не может сделать хрусталик более выпуклым: близкие предметы он видит расплывчато.

- Астигматизм – это дефект сферичности глаза: как указывает его название, у глаза отсутствует стигматизм, и он плохо видит на любом расстоянии.

- Наконец, пресбиопия (старческая дальнозоркость) представляет собой большие трудности с аккомодацией: такое наступает с возрастом, когда мышцы глаза начинают слабеть. Глаз видит хорошо, пока не требуется аккомодация: нормальный глаз будет продолжать хорошо видеть бесконечно удаленные объекты, но будет плохо видеть близко расположенные.

Мы видим, что в основном глаз, который был изначально нормальным, с пресбиопией хорошо видит вдаль и плохо вблизи, как дальнозоркий. Но физические причины здесь совершенно разные: человек с пресбиопией может быть одновременно близоруким, тогда как дальнозоркий человек не может одновременно страдать миопией.

Чтобы исправить эти дефекты, достаточно поместить перед глазом линзу (очки служат опорой для линз). Для дальнозорких людей нужны выпуклые линзы, поскольку их хрусталик недостаточно выпуклый. Близоруким нужны линзы вогнутые.

Следствие: использование лупы

Сферическая собирающая линза, используемая отдельно, называется лупой. Зная, как работает глаз, мы теперь можем точно описать метод работы этого оптического инструмента.

Посмотрим невооруженным глазом на пылинку, расположенную в 25 см от нас: у нее определенный видимый диаметр (→ **рис. 21.8.а**). Поскольку объект расположен очень близко, глаз должен использовать сильную аккомодацию, чтобы четко видеть, что может его утомить (мышцы должны сильно сжимать хрусталик).

Теперь воспользуемся лупой: лучше расположить ее так, чтобы лучи, исходящие от объекта на выходе из лупы, были параллельны. В этом случае глаз будет видеть бесконечно удаленный объект, и ему не нужна будет аккомодация. На **рис. 21.8.б** мы ясно видим, что лучи, исходящие от края объекта, выходят с сильным отклонением относительно оптической оси. Иначе говоря, видимый диаметр объекта, который видно через линзу, кажется больше, чем при взгляде невооруженным глазом: объект кажется больше. В этом и заключается главная польза лупы – в увеличении объектов. Но мы между делом замечаем и еще одну пользу: изображая объект бесконечно удаленным, лупа не дает глазам напрягаться.

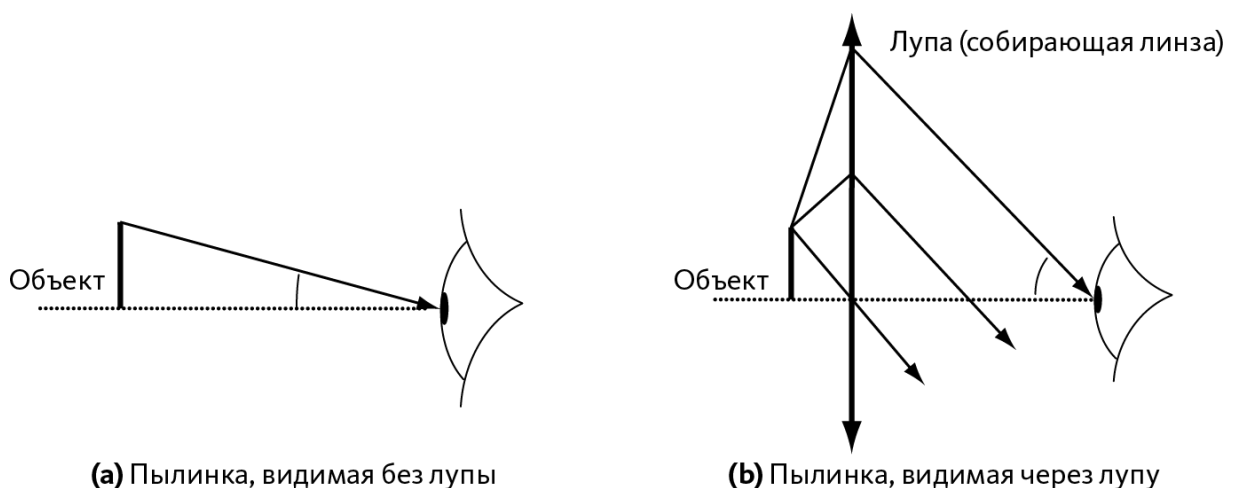


Рис. 21.8 – Наблюдение с лупой

Лупа играет двоякую роль: с одной стороны, видимый диаметр пылинки больше (угол, под которым видна пылинка, больше). С другой стороны, объект кажется бесконечно удаленным, что позволяет глазу не использовать аккомодацию.

Мы только что видели, как лупа позволяет увеличивать объекты, то есть видеть микроскопические вещи. На практике в микроскопе используются такие маленькие сферические выпуклые линзы; но чтобы добиться большего увеличения, в микроскопе используются две линзы, размещенные одна позади другой. Первая называется объективом микроскопа, вторая окуляром. Мы не будем вдаваться в подробности работы микроскопа, потому что в итоге получим те же выводы, что и при описании лупы.

4. Наблюдение за звездами

Астрономический телескоп

Принцип телескопа

Как можно наблюдать за такими удаленными объектами, как планеты, с более близкого расстояния? Трудность в том, что на этот раз речь идет о небесно бесконечно удаленном объекте: лучи, исходящие от объекта, параллельны друг другу. Если мы поставим простую лупу, эти лучи уже не будут параллельны на выходе, поскольку они сходятся к оптической оси: объект, видимый через лупу, уже не будет бесконечно удаленным.

Однако мы видели, что глаз адаптирован для того, чтобы видеть бесконечно удаленные объекты, то есть необходимо сделать так, чтобы лучи были тоже параллельны друг другу на выходе, чтобы объект всегда казался бесконечно удаленным. Другими словами, необходимо «увеличить» планету, не приближая ее.

Для этого можно сконструировать астрономический телескоп, состоящий из двух последовательных линз, названных объективом и окуляром (как в микроскопе). Эти линзы расположены на таком расстоянии, что падающие параллельные лучи остаются параллельными и на выходе из прибора (→ **рис. 21.9**): так, бесконечно удаленный объект, увиденный в телескоп, предстает действительно бесконечно удаленным, и глаз может без труда видеть его.

На **рис. 21.9** первая линза (объектив) имеет слабую оптическую силу, у второй (окуляра) оптическая сила высокая, то есть лучи меньше отклоняются в объективе, чем в окуляре. Мы видим последствия этого на выходе: лучи, выходящие из прибора, гораздо сильнее наклонены относительно оптической оси, чем падающие лучи. Это значит, что «видимый диаметр» планеты гораздо больше при взгляде через прибор: нам удалось «увеличить» объект, одновременно оставив его «в бесконечности»...

Фокусное расстояние и диаметр телескопа

Отношение между углом выходящих и падающих лучей называется увеличением: увеличение равно двум означает, что видимый диаметр планеты выглядит в два раза больше через прибор, чем невооруженным глазом. Чем больше разница в оптической силе у объектива и линзы, тем больше увеличение. Точнее, можно продемонстрировать, что увеличение равно отношению сходимостей пучка двух линз.

Таким образом, первая линза должна иметь как можно более слабую оптическую силу. Но чем меньше оптическая сила, тем меньше отклоняются лучи, то есть они проходят более длинный путь, прежде чем встретиться внутри линзы (→ **рис. 21.9**). Это значит, что рефрактор должен быть более длинным: на практике длина рефрактора напрямую связана с его способностью увеличения.

Фокусное расстояние рефрактора соответствует фокусному расстоянию объектива и связано с длиной рефрактора: чем она больше, тем больше рефрактор увеличивает. Но в астрономии целью является не только увеличение: часто предпочтительнее уловить максимальное количество света. Таким образом, вторая фундаментальная характеристика рефрактора, помимо фокусного расстояния, — это его диаметр: более крупный диаметр позволяет проходить большему количеству лучей и получить более яркое изображение. Именно это позволяет видеть звезды, не видимые невооруженным глазом.

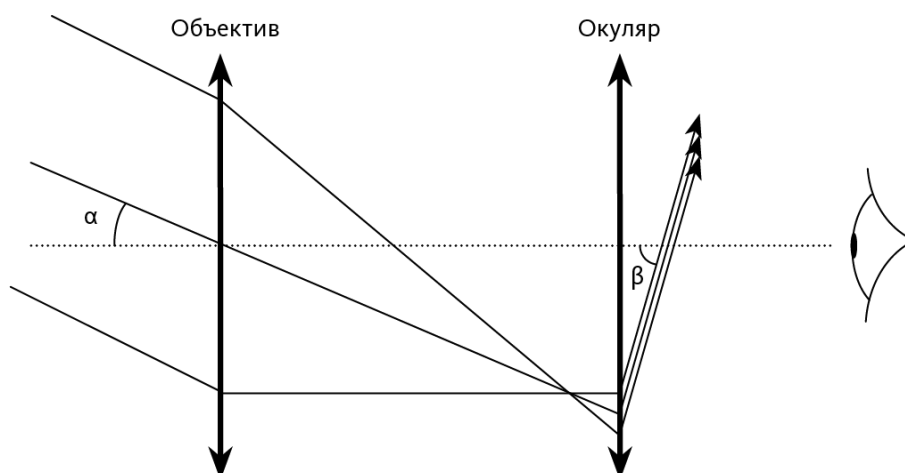


Рис. 21.9 – Рефрактор (телескоп с линзой в качестве объектива)

Расстояние между объективом и окуляром отрегулировано так, что падающие лучи выходят параллельными: так, бесконечно удаленный объект остается таковым при взгляде на него через прибор. С другой стороны, оптическая сила окуляра гораздо выше, чем у объектива (лучи отклоняются сильнее). Это значит, что видимый диаметр планеты через прибор (β) выглядит гораздо больше, чем при взгляде невооруженным глазом (α). Увеличение, по определению равно отношению этих углов, равно отношению оптической силы между двумя линзами.

По ходу дела заметим, что по отношению к взгляду невооруженным глазом планета выглядит перевернутой. На самом деле лучи, идущие от верха прибора, кажутся идущими от низа прибора, там, где находится глаз.

Телескоп

Телескоп устроен по тому же принципу, но вместо сферической линзы используется сферическое зеркало. Поверхность такого зеркала сделана в форме сферического сегмента: если зеркало вогнутое, падающие лучи отражаются, фокусируясь на оптической оси. Если зеркало не слишком большое, можно продемонстрировать, что все лучи, исходящие из одной точки, сходятся в единой точке после отражения зеркалом: присутствует стигматизм, изображение получается четкое.

Сферическое зеркало имеет те же самые свойства, что и сферическая линза, но вместо того, чтобы проходить сквозь него, лучи продолжают путь в противоположном направлении, *перед* зеркалом (→ **рис. 21.10**): это второе зеркало должно быть довольно маленьким, чтобы лучи, идущие от звезды, могли достичь первого зеркала.

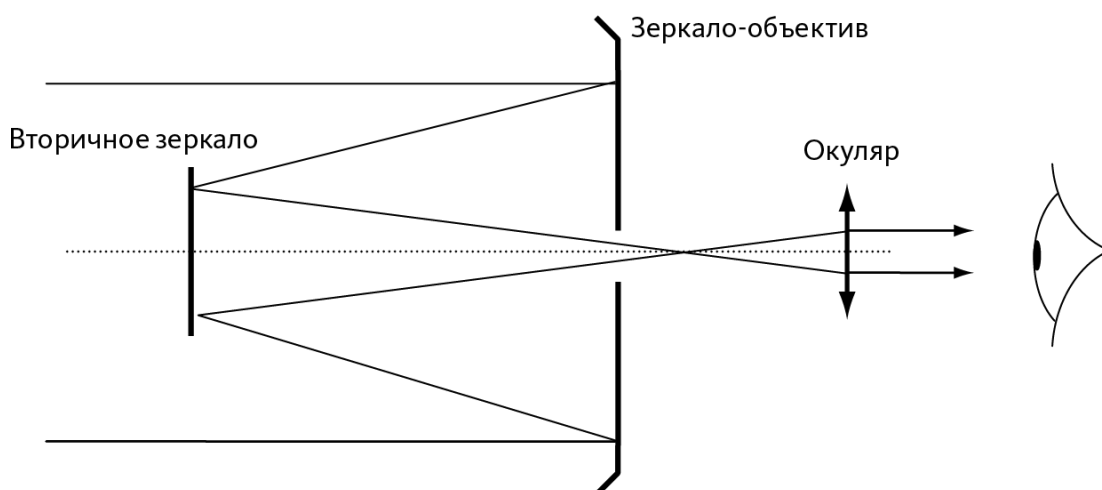


Рис. 21.10 – Телескоп

Мы представили лучи, идущие из бесконечно удаленной точки, расположенной на оптической оси (например, звезды). Изображение, видимое глазом, также бесконечно удалено: большое количество света, собранного слева, сконцентрировано в маленьком пучке справа, который целиком проникает в зрачок. Диаметр телескопа управляет качеством уловленного света: большой диаметр позволяет видеть объекты абсолютно не видимые невооруженным глазом из-за их слабой яркости.

Отметим, что это видно также на **рис. 21.9**. Рефрактор и телескоп играют одинаковую роль с точки зрения оптики.

В итоге рефрактор и телескоп имеют совершенно одинаковые свойства. В качестве большого профессионального прибора телескоп используется чаще, потому что большие зеркала легче полировать и они не такие тяжелые, как большие линзы.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Закон преломления объясняет, почему поверхность воды имеет «эффект лупы», когда мы смотрим сквозь нее. Закон отражения объясняет, что, когда мы смотрим в зеркало, мы видим свое симметричное изображение по ту сторону.
- Задний фокус линзы является изображением бесконечно удаленного точечного объекта. Фокусное расстояние линзы соответствует расстоянию заднего фокуса линзы. Оптическая сила – величина обратная фокусному расстоянию, она представляет собой способность собирать (или рассеивать) лучи.
- Глаз устроен так, чтобы четко видеть бесконечно удаленные объекты. Он также четко видит и близко расположенные объекты благодаря явлению аккомодации, при котором мышцы сжимают хрусталик.
- Рефрактор и телескоп характеризуются фокусным расстоянием, от которого зависит увеличение, и диаметром, от которого зависит количество полученного света. Телескоп оборудован зеркалами, а рефрактор только линзами.

Часть 5

Квантовая физика

Погружение в мир бесконечно малого

22. Свет: частицы или волна?

Мы подошли к фундаментальному рубежу в этой книге: до главы 22 все описанные явления были результатом детерминированного действия гравитации или электромагнитной силы.

Таким образом, мы смогли понять, что такое материя и каковы микроскопические источники ее поведения в крупном масштабе: невозможность пройти сквозь твердое тело, сила трения в текучей среде, понятие давления и температуры, сила Архимеда, источник и освоение электричества, действие магнита, магнитное поле Земли и т. д.

Мы также смогли понять, что такое свет и как он взаимодействует с материей: цвет и непрозрачность вещества, объяснение устройства зеркала и линзы, эффект радуги и другое.

Мы впервые столкнемся с опытами, для объяснения которых недостаточно будет действия двух детерминированных фундаментальных сил. Эти опыты связаны со светом и открывают новую, неожиданную сторону физики – квантовую физику. Ее постулаты будут едва ли более многочисленными, чем у классической физики; более того, они не *прибавятся* к уже известным постулатам, а *заменяют* их.

Разумеется, все, о чем мы говорили до сих пор, остается верным: в нашем масштабе законы квантовой физики совпадают с законами физики классической. То есть прекрасное единство физики, способное все объяснить с помощью небольшого числа фундаментальных законов, сохранится.

В свою очередь, законы квантовой физики гораздо сложнее постичь и сложно логически осмыслить. И однако, эти законы лежат в основе нашего повседневного бытия. Мы увидим, что в них нет ничего сложного, при условии, что вы готовы поверить в невероятное...

1. Погружение в квантовую физику

Испускание света

Движение зарядов и излучение

В предыдущих главах мы объяснили, что взаимодействие света с материей было связано с приведением в движение зарядов материи: в зависимости от длины волны излучения заряды реагируют более или менее «бурно». Когда свет заставляет их вибрировать с их естественной частотой, колебание зарядов усиливается, и электромагнитное поле, которое они создают, тоже. Поэтому свет сильнее искажается при таких частотах.

Это объясняет разницу цветов материи: в каждом из них естественная частота колебаний зарядов разная, а значит, поглощение света происходит при разной длине волны.

Если мы говорили об отражении и поглощении света, то об *излучении* света мы высказались довольно неопределенно. Мы упомянули, что оно также связано с вибрацией зарядов в материи: вибрирующий заряд создает колеблющееся электромагнитное поле, которое потом распространяется в форме волны.

Можно было бы подумать, что материя излучает свет с частотой, точно соответствующей естественной частоте колебаний зарядов; но излученные волны с такой частотой сразу же снова поглощаются средой и уже не могут выйти наружу.

Кроме того, существует очень широкая гамма частот: не будем забывать, что температура 25 °C соответствует определенной средней скорости молекул, но что каждая молекула обладает своей скоростью, от 0 до нескольких сотен метров в секунду. Более того, их движения происходят хаотично во всех направлениях.

В итоге электроны вибрируют внутри атомов, которые сами хаотично вибрируют внутри молекул относительно их соседей. Так, в одной точке вещества электрическое поле может колебаться с очень разной частотой в зависимости от движения окружающих зарядов.

Таким образом, любое вещество можно представить как совокупность зарядов, вибрирующих во всех направлениях с разной скоростью, на которые накладывается целый «бульон» электромагнитных волн, которые колеблются как будто с самыми разными частотами, постоянно образующимися по мере того, как они поглощаются.

Излучение абсолютно черного тела

Если тело довольно крупное, а материя достаточно плотная, незначительная часть излучений внутри может выйти наружу из-за произошедшего сильного поглощения. Такое тело, которое полностью поглощает любое излучение, называется «абсолютно черным телом»: действительно,

поскольку оно все поглощает, ничего не отражает и ничего не излучает, оно выглядит черным (никакой свет не может исходить от такого объекта).

Против всякого ожидания Солнце, большое и плотное, ведет себя очень похоже на абсолютно черное тело: хотя оно, кажется, и испускает много света (оно далеко не черное!), это весьма незначительная часть по сравнению с постоянно выпускаемым и поглощаемым внутри излучением. Так, внутри его все происходит так, словно речь идет о черном теле.

Мы также можем обнаружить вокруг себя множество предметов, которые являются черными телами: в конце XIX в. такие необычные тела тщательно изучали с целью в деталях понять, как происходит излучение света и какова длина волны.

На **рис. 22.1** мы представили график интенсивности излучения, «ущелешего» в черном теле, относительно длины волны излучения. Это результат после опыта с несколькими черными телами разной температуры. Мы констатируем два интересных факта:

- Какой бы ни была длина волны, интенсивность светового излучения тем больше, чем выше температура. Такого результата следовало ожидать: более высокая температура порождает более мощную кинетическую энергию молекул. То есть эти молекулы могут отдавать больше энергии в виде излучения: световое излучение сильнее.

- Мы констатируем, что световая интенсивность максимальна при определенной промежуточной длине волны: чем ниже температура, тем световой максимум смещается дальше в область инфракрасных волн (большая длина волны). В любом случае здесь почти отсутствуют волны очень большой или очень маленькой длины (слабая световая интенсивность).

Это второе наблюдение довольно удивительно: из-за хаотичного поведения молекул и систематического поглощения/повторного излучения внутри абсолютно черного тела перекрываемый диапазон излучений должен был бы быть шире. Если точнее, классическая физика предусматривает очень сильную пропорцию ультрафиолетовых волн относительно волн другой длины, в то время как мы, напротив, констатируем весьма слабый всплеск энергии в ультрафиолетовой зоне. В конце XIX в. многие физики пытались найти объяснение этому, но без особого успеха.

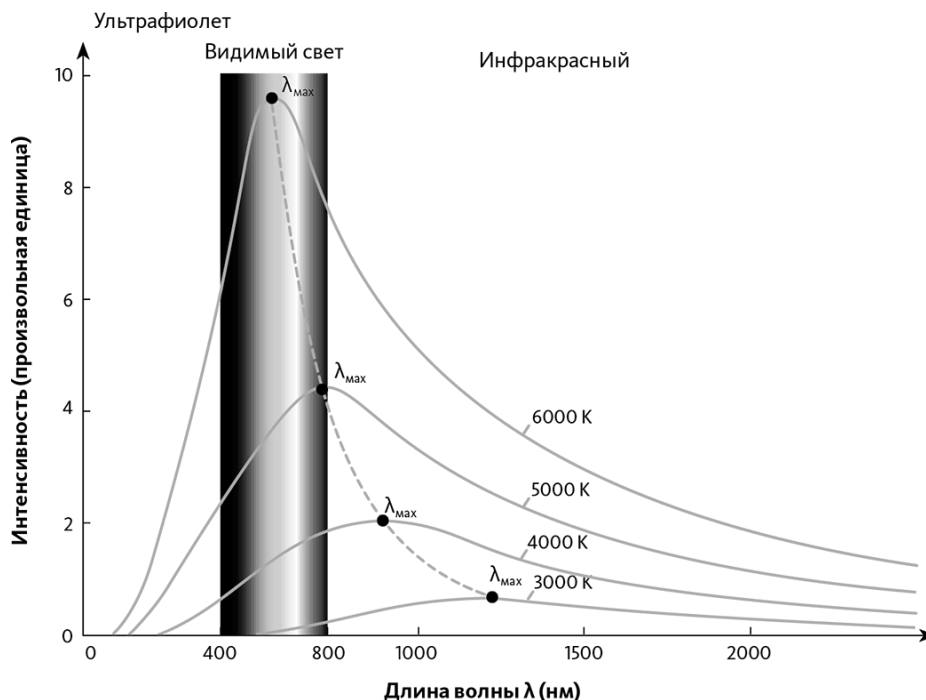


Рис. 22.1 – График излучения абсолютно черного тела

Постоянная Планка

В 1900 г. Макс Планк пытается опытным путем найти математическую формулу, удовлетворяющую полученным данным. Он видит, что все происходит так, как если бы тело

не могло испускать лучи, обладая энергией ниже определенного уровня. Более того, эта *минимальная излучательная энергия*, похоже, точно пропорциональна *частоте* излучения: это значит, что в инфракрасной зоне излучения слабой энергии могут иметь место, тогда как в ультрафиолетовой зоне минимальный энергетический порог гораздо выше.

Эта гипотеза объясняет представленный график: определенная температура соответствует средней энергии определенных молекул. Если эта средняя энергия гораздо ниже минимального порога энергии, тело не может давать никаких излучений, поскольку не обладает достаточной энергией: так происходит в зоне ультрафиолетовых волн, где порог очень высок и гораздо выше энергии вибрации молекул. Поскольку никакое излучение невозможно, график световой интенсивности исчезает в ультрафиолетовой зоне.

Если обозначить E минимальную излучательную энергию к частоте ν , это запишется как $E = h\nu$, где h – простой коэффициент пропорциональности, установленный опытным путем, между порогом энергии и частотой излучения; h называется постоянной Планка.

В 1900 г. продолжали считать, что это отношение можно понять с помощью старых добрых законов классической физики: вероятно, действующие механизмы светового излучения еще не были поняты как следует... Постоянная Планка тогда была всего лишь искусственной константой, которой предстояло кануть в небытие, как только все прояснится, – Планк первый так считал.

Однако пять лет спустя другой опыт окончательно все изменил и открыл путь квантовой физике: этим переворотом мы обязаны Альберту Эйнштейну, который, однако, не был уверен, что у квантовой физики есть будущее.

Фотоэлектрический эффект

Опыт

Если достаточно нагреть металл, электроны могут оторваться от атомов: начиная с определенной температуры, электроны приобретают «энергию освобождения». То же самое происходит, когда металл поглощает свет. Электромагнитная волна сразу передает свою энергию электронам атомов: эта энергия может быть достаточной для освобождения электронов, даже если температура для этого слишком низка.

Опыты в начале XX в. подтвердили этот феномен: в особых случаях, о которых мы скажем отдельно, электромагнитная волна, направленная на металл, приводит к освобождению электронов, которые затем можно обнаружить. Это называется фотоэлектрическим эффектом, или просто фотоэффектом. Эти опыты привели к весьма примечательным и неожиданным результатам:

- электроны отрываются, только если падающие лучи преодолевают определенный порог *частоты*; если порог не преодолен, электроны не освобождаются, *даже если значительно увеличить интенсивность излучения*;
- если порог частоты преодолен, количество освобожденных электронов зависит от интенсивности излучения, в то время как их кинетическая энергия линейно зависит от частоты излучения.

Учитывая излучение черного тела, которое мы рассматривали выше, мы догадывались, что существует связь между частотой и энергией, которую мы здесь обнаруживаем. Но фотоэффект привносит совершенно новые элементы.

Обозначим две величины, связанные с энергией волны:

- *амплитуда* электрических и магнитных полей напрямую связана с энергией волны;
- *частота* волны также связана с понятием энергии через постоянную Планка.

При фотоэффекте мы видим, что световая *интенсивность* управляет *количеством* выпущенных электронов, тогда как *частота* управляет их *кинетической энергией*. В обоих случаях это управляет общей энергией выпущенных электронов (или их больше, или у каждого больше энергии), но очень по-разному.

Объяснив эти опыты теоретически, Эйнштейн окончательно открыл путь физике в новую квантовую эру. Резюмируем здесь его объяснения.

Объяснение Эйнштейна

Излучение и поглощение света материей может происходить только в виде «неделимых порций», называемых «квантами света». Каждый «квант света» обладает энергией E , прямо пропорциональной частоте ν волны, как $E = h\nu$. Общая энергия волны, связанная с амплитудой электрических и магнитных полей, является суммой энергий всех квантов света, которые она содержит.

Электрон может оторваться, только если квант обладает достаточной энергией, то есть только за пределами определенного порога частоты. В этом случае на каждый поглощенный квант приходится один оторвавшийся электрон. Если *частота* повышается, квант содержит больше энергии, и электрон вылетает с большей скоростью. Если *интенсивность светового потока* увеличивается, это значит, что становится больше квантов поглощенного света, а следовательно, и больше вылетевших электронов.

Так объясняются все результаты фотоэлектрического эффекта. Аналогичным образом свет может излучаться только в форме квантов энергии $E = h\nu$, что переключается с постоянной Планка в теме излучения абсолютно черного тела.

Аналогия с каплями воды

Таким образом, во время взаимодействия с материей свет проявляет странные «квантовые» свойства, как при излучении, так и при поглощении. Можно провести аналогию с водой из крана: кран будет представлять материю, а вода свет. Сначала кран открыт. По мере того как мы закрываем его, поток воды уменьшается. То же самое происходит со светом. Когда температура тела уменьшается, интенсивность светового излучения снижается.

Но, завернув кран еще больше, мы видим, что теперь вода капает, а не льется струей: чем сильнее мы заворачиваем кран, тем меньше падает капля. Но зато невозможно заставить упасть полкапли. Таким образом, кран выпускает неделимые «кванты воды».

Так же происходит со светом. Когда интенсивность светового излучения снижается до определенного уровня, материя начинает один за другим испускать кванты света: чем больше интенсивность света снижается, тем меньше количество квантов, но каждый квант сохраняет одинаковую энергию $E = h\nu$.

Существует, однако, разница в размерах у водопроводного крана и светового излучения: поток воды в виде капель объясняется действием двух фундаментальных сил классической физики (вода удерживается притягивающей электростатической силой, пока не станет слишком тяжелой, чтобы упасть). В то время как *ничто* не может объяснить, почему невозможно излучение половины кванта света: таков факт, и $E = h\nu$ становится новым фундаментальным законом, первым в квантовой физике.

По ходу дела отметим иронию Истории: постоянная Планка h , основа квантовой физики, была введена в 1900 г., на рубеже XIX и XX вв. Это также послужило символическим рубежом между классической и современной физикой.

Фотоны

В дальнейшем для большего удобства кванты света стали называть фотонами. Но это наименование нужно использовать с большой осторожностью, потому что мы имеем тенденцию представлять фотоны в виде маленьких световых шариков, подобно другим частицам. Между тем это совсем не так: *фотон целиком является электромагнитной волной*, чья энергия выражается $E = h\nu$.

Если мы наложим несколько фотонов друг на друга, это равносильно наложению друг на друга нескольких волн: образуется одна общая волна большей амплитуды и большей энергии. Эта общая волна очень похожа на отдельно взятый фотон, только ее изгибы более ярко выражены.

Не может существовать волна, энергия которой меньше энергии фотона («полуфотона» не существует, в этом весь смысл кванта света): это значит, что для определенной частоты во Вселенной не существует электромагнитной волны, чья энергия была бы меньше энергии фотона, поскольку ничто не может ее испускать.

Отметим, что сам Эйнштейн придерживался понятия «квант света»: слово «фотон» появилось гораздо позже. На данном этапе лексикон Эйнштейна представляется более разумным, потому что в нем нет места неверным интерпретациям природы света: фотон не имеет ничего общего с шариком, это просто электромагнитная волна, чью энергию невозможно уменьшить!..

2. Природа фотона

Поучительный опыт

Предыдущие опыты показывают, что природа света не сильно изменилась: это электромагнитная волна, которая распространяется. Единственной несколько любопытной новостью является то, что свет может излучаться или поглощаться только в виде определенных «порций энергии», которые ошибочно называют «фотонами».

Чтобы лучше понять революцию, которую совершила квантовая физика, мы сейчас представим один из самых невероятных основополагающих опытов этой «новой» физики.

Этот опыт целиком повторяет опыт с интерференцией Юнга, рассмотренный в главе 20. То есть речь идет о лампе, которая распространяет свет во всех направлениях с определенной длиной волны (допустим, красный свет); чуть дальше мы установили экран, в котором просверлены два маленьких отверстия (→ **рис. 22.2**).

Из-за дифракции свет, пройдя через отверстия, распространяется во всех направлениях по ту сторону экрана. Мы наблюдаем результат на стене позади: на ней видно чередование светлых и темных полос, образовавшихся из-за наложения двух волн, прошедших через два отверстия (**рис. 22.2** позволяет наглядно изобразить то, что происходит). Назовем это «опыт 1».

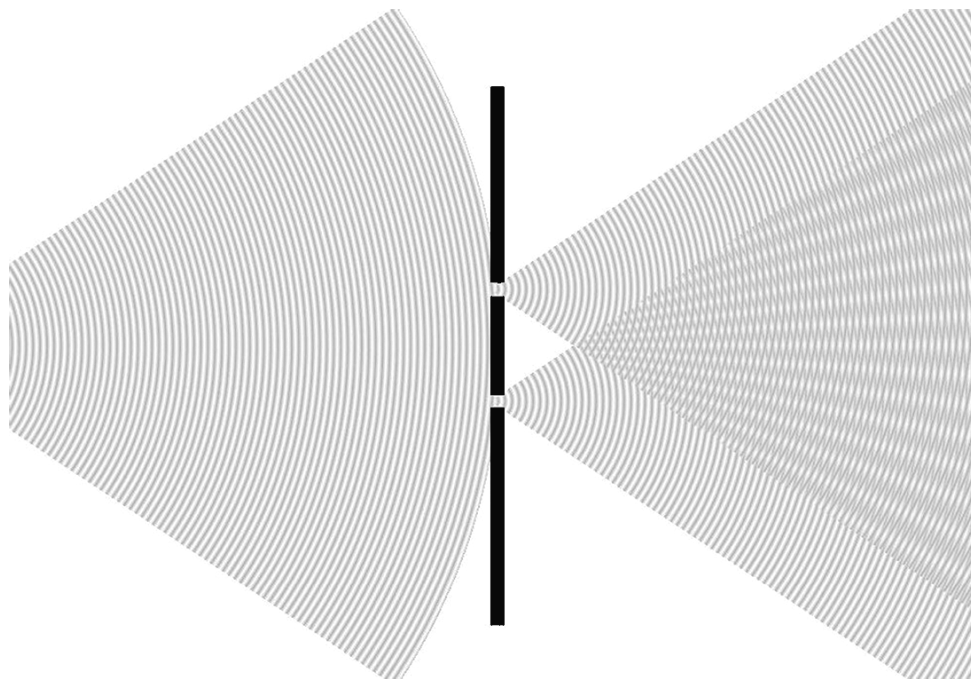


Рис. 22.2 – Опыт Юнга

Затем предположим, что стена позади экрана снабжена улавливателями, способными поглощать и распознавать малейший световой фрагмент.

Уменьшим яркость лампы: световая интенсивность интерференции также понизилась. Но в наших силах настолько понизить яркость лампы, что она будет испускать свет фотон за фотоном («капля за каплей»): что же происходит в этом случае (назовем это «опыт 2»)?

Фотон такая же волна, как другие, просто его энергия самая минимальная из всех, которые можно получить. Волна, идущая от лампы, рассеянная во всех направлениях, вступает в контакт с просверленным экраном. По ту сторону, на уровне двух отверстий, эта волна рассеивается во всех направлениях благодаря явлению дифракции: в данный момент происходит то же самое, что и при большой яркости света. Мы видим, что фотон проходит сразу через два отверстия в экране: в этом нет ничего удивительного, поскольку это волна. Справа от экрана один фотон теперь стал совокупностью двух волн, вышедших из отверстий.

Что произойдет, когда эти две волны достигнут стены позади экрана? Поглощение света в определенной точке стены может произойти только квантом, то есть с помощью фотонов. Однако у нас всего один фотон: то есть его может поглотить всего один атом стены. Таким образом, фотон сможет поглотиться со всей своей энергией, но одной-единственной точкой стены: мы увидим появление точки на стене. Именно это мы и наблюдаем при проведении опыта.

И вот ошеломляющий результат: волна, которая распространялась по всему пространству мгновение назад, внезапно сконцентрировалась в одной-единственной точке пространства в момент взаимодействия с материей, чтобы образовать световую точку, которую мы наблюдаем. *Все происходит так, словно вместо волны была точечная частица, которая достигла стены в определенном месте.* Каким же образом волна, которая распространялась всюду в пространстве, может мгновенно сконцентрироваться в единой точке на стене, унося с собой всю свою энергию?

Феномен становится еще более невероятным, если мы представим волну, которая распространяется на миллиарды километров: как только она встречает материю, то мгновенно концентрируется в одной-единственной точке. Электромагнитное поле волны, которая распространялась на миллиарды километров, внезапно концентрируется в единой точке, как будто эти миллиарды километров ничего не значат.

Об этом факте писали многие ученые, и по сей день не утихают споры о том, как это объяснить. При этом опыте само понятие пространства, кажется, утрачивает свой смысл. Перед нами явление, которое, как кажется, не принадлежит к «земной» физике: электромагнитное поле волны мгновенно меняет местоположение в момент, когда оно концентрируется без всякого перемещения в пространстве (если бы перемещение было, оно произошло бы максимально со скоростью света и не мгновенно).

Корпускулярно-волновой дуализм

Опыт Юнга: продолжение и конец...

Вернемся к опыту Юнга. Читатель, возможно, подумает, что мы совершили грубую ошибку, рассматривая фотон целиком как волну: если стена освещена в *единственной точке*, значит, именно в этой точке ее достигла *точечная частица*, а не волна, рассеянная по всему пространству. То есть фотон – это корпускула, прошедшая определенный путь до того, как коснулась стены.

Однако это не так, и продолжение опыта позволит в этом убедиться. Опыт 2 показывает, что точка касания фотона не случайна: она имела место там, где находилась светлая полоса, когда мы наблюдали интерференцию с более ярким светом во время опыта 1.

Отправим теперь много фотонов один за другим и посмотрим их последовательные точки касания: они показались бы довольно хаотичными, если бы каждый раз это не были зоны светлых полос из опыта 1.

Предположим, что точки касания остаются постоянно «освещенными» после контакта, и пошлем большое число фотонов друг за другом: мало-помалу мы увидим новое появление светлых и темных полос интерференции из опыта 1.

Если бы фотоны были точечными частицами, они проходили бы *или* через отверстие сверху, *или* через отверстие снизу. Между тем интерференция возникает из-за наложения двух волн, *одновременно* прошедших через два отверстия: таким образом, интерференция невозможна,

если свет выбирает одно отверстие, не проходя одновременно через другое. Поскольку мы вызываем интерференцию, эмитируя фотоны один за другим, это значит, что каждый фотон проходит сразу через два отверстия: фотон является волной, а не точечной частицей.

Двойственная природа фотона

В конечном итоге этот опыт позволяет сделать поразительный вывод относительно природы света. В том, что касается распространения, речь идет об электромагнитной волне, о которой мы говорили в предыдущих главах. Но когда дело касается излучения или поглощения, свет внезапно начинает вести себя как совокупность точечных частиц, называемых фотонами. Поглощение этих частиц происходит в хаотично расположенных точках, вероятность расположения каждой из них разная.

Речь идет о корпускулярно-волновом дуализме: фотон является волной, которая концентрируется в точечной частице, как только мы стремимся ее визуализировать (например, установив за экраном стену). Очевидно, что волновую ипостась фотона наблюдать невозможно, поскольку волна исчезает сразу, как только мы пытаемся ее увидеть: волновая природа фотона может быть выявлена лишь косвенно (например, с помощью опыта интерференции Юнга).

При обычной световой яркости существует столько наложенных друг на друга фотонов, что все точки стены заполнены ими одновременно: материя кажется освещенной постоянно, и в этом случае свет является традиционной волной. По этой причине мы смогли посвятить оптике целых три главы, не упоминая о фотонах.

Вторжение случайности

Бог играет в кости...

Опыт, который мы только что описали, позволяет выделить другое центральное понятие квантовой физики: контакт света со стеной выглядит абсолютно хаотичным. Невозможно заранее предвидеть, в какой точке состоится контакт. Мы можем лишь сказать, что есть больше шансов, что фотон попадет в светлую зону из опыта 1, нежели в темную. Иначе говоря, мы можем рассуждать только о вероятностях: для каждого места на стене можно определить вероятность взаимодействия фотона с атомом. Но место реального контакта не станет от этого более предсказуемым.

Эта непредсказуемость происходит не из-за недостатка информации у наблюдателя, как происходит, когда мы хотим предсказать погоду, которая будет через месяц. Наоборот. Она свойственна законам природы: квантовая физика (то есть природа!) не является детерминистской, что означает, что прекрасное знание Вселенной в определенный момент не позволяет знать, какой она будет через десять секунд. Существует множество вариантов возможного будущего: у каждого будущего своя степень вероятности, которую можно подсчитать, но это еще не будет наиболее вероятным будущим, которое произойдет.

Это отсутствие детерминизма серьезно подрывает наш традиционный образ мыслей: почему фотон выбирает эту точку касания, а не другую, если нет *никаких физических причин* для основания этого выбора? Для двух физически идентичных ситуаций в любой точке фотон сейчас может выбрать одну точку касания, а в другой раз другую.

Такая перспектива возмущала Эйнштейна, который воскликнул: «Бог не играет в кости!» Существует ли нечто такое, что заставляет фотон поглощаться именно в этом месте, а не в другом? Опыт, однако, показывает, что выбор представляется абсолютно случайным: выбор есть, но нет причины его объяснять.

Странности квантовой физики: обобщение

Подведем итоги нескольких самых ошеломляющих выводов:

- Волна фотона исчезает, как только мы пытаемся ее обнаружить, что делает абсолютно невозможным наблюдение за этой волной, несмотря на ее бесспорную реальность. То есть фотон

является волной, пока он не обнаружен, но предстает точечной частицей, как только на него обращают внимание. Таким образом, квантовая физика вводит понятие корпускулярно-волнового дуализма.

- Во время попытки обнаружения волна *мгновенно* исчезает целиком, какова бы ни была ее пространственная протяженность. Это происходит, даже если обнаружение осуществляется на расстоянии нескольких световых лет: событие касается одновременно всего пространства, заполненного волной. Квантовая физика не привязана к месту.

- Обнаружение происходит в случайной точке: никакая причина не позволяет объяснить место касания, выбранное фотоном. Может быть вычислена лишь его вероятность. Квантовая физика не является детерминистской.



И СНОВА О ПАРНИКОВОМ ЭФФЕКТЕ

Теперь мы можем понять все действующие силы парникового эффекта, уже упомянутые в главе 21. Сядем в машину: мы видим солнечный свет, проникающий внутрь, потому что в области видимого света стекло является прозрачным. Внутренность машины и наше собственное тело поглощают большое количество света, особенно если цвета черные: прочий свет отражается обратно наружу.

Где есть поглощение, там повышается энергия: салон машины начинает нагреваться. При обычных температурах объекты испускают инфракрасные волны: чем сильнее они нагреваются, тем интенсивнее излучение. Излучая эти волны, объекты снова теряют энергию, то есть вновь охлаждаются. Мы видим, что существует естественный баланс, который создается между видимым светом солнца, который нас нагревает, и излучаемым нами инфракрасным светом, который нас охлаждает.

Но стекло задерживает инфракрасное излучение: в машине никакое излучение энергии невозможно, и баланс нарушается. Мы только нагреваемся из-за видимого света солнца и не можем охладиться, выпустив инфракрасные волны. Температура внутри машины может подняться довольно высоко.

Стекло, в частности, состоит из диоксида кремния SiO_2 , именно эта молекула вызывает поглощение света в инфракрасной зоне. Молекула, которая больше всего на нее похожа, — CO_2 (диоксид углерода), про который каждый знает, что он также задерживает инфракрасные лучи и образует газ с парниковым эффектом. Конечно, концентрацию CO_2 в атмосфере не сравнить с содержанием SiO_2 в стекле, зато толщина атмосферы гораздо выше толщины стекла... Процент содержания CO_2 в атмосфере является критическим параметром для температуры на Земле.

3. Значение квантов света в крупном масштабе

Связь между температурой и длиной волны

Испускание или поглощение квантов света происходит на атомном уровне. Однако существование квантов имеет значение и для нашего масштаба в повседневной жизни.

Снова возьмем дорогой сердцу Планка пример черного тела, которое испускает свет: мы видели, что многие предметы вокруг нас ведут себя почти как абсолютно черные тела. Предположим, что температура тела повышается: это значит, что средняя энергия атомов тоже увеличивается. Таким образом, эти атомы в среднем испускают кванты света большей энергии: поскольку $E = h\nu$, это значит, что излученный свет в среднем имеет более высокую частоту.

Напомним, что более высокая частота соответствует более низкой длине волны $\nu = c/\lambda$: так, пропорция коротких длин волны тем больше, чем выше температура (что показано на **рис. 22.1**).

При довольно низкой температуре (скажем, 37°C) испускание происходит в основном в инфракрасном секторе (большая длина волны). Это касается нашего тела и всего, что нас окружает. Мы не светимся ночью, потому что не излучаем видимого света, но продолжаем испускать электромагнитные волны, как солнце.

Влияние горячих тел на цвет

Посмотрим на железный прут в литейной мастерской: при обычной температуре он испускает инфракрасные волны (его видно в темноте). По мере того как мы будем его нагревать, прут будет испускать волны все более короткие, пока не достигнет предела видимого света: железный прут начинает краснеть.

Продолжим нагрев: максимум излучения сдвинулся от красных к синим волнам (от длинных к коротким). Таким образом, цвет прута должен был постепенно меняться от желтого к зеленому, пока не стал бы синим; однако если мы посмотрим на прут, то увидим, что он стал ослепительно-белым. Это объясняется просто: когда максимум излучения в зеленом диапазоне, это не значит, что прут испускает только зеленые волны. Он также испускает синий и красный цвета, хотя и в более слабой пропорции. То есть здесь присутствует смесь всех цветов, которые доходят до нашего глаза в виде белого цвета.

Затем белый цвет становится все более ослепительным: и действительно, когда мы повышаем температуру, повышается не только средняя частота излучения, но также *интенсивность* излучения. Если мы можем увеличить температуру до 8000 °C, цвет прута станет не только невыносимым, но и приобретет синевато-белый оттенок: пропорция синего будет все выше. Впрочем, железо плавится при гораздо более низкой температуре.



ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Чтобы испускать видимый свет, достаточно сильно нагреть вещество. Это просто сделать в электричестве: мы видели, что простое сопротивление рассеивало энергию в тепловой форме («эффект Джоуля»), когда по нему проходил электрический ток. Именно это свойство используется в электроплитах и электропечах.

В таких печах можно видеть, как внутри краснеют нагревающие сопротивления: их температура становится достаточной, чтобы испускать видимый свет, а не инфракрасное излучение. Достаточно пропустить ток еще большей силы, чтобы еще повысить температуру. Тогда излучение становится зеленым и желтым, а не только красным: с одной стороны, излучаемый свет становится желтым, с другой стороны, световая интенсивность становится выше.

Таков же принцип действия лампы накаливания, которая есть не что иное, как маленькое сопротивление, через которое проходит сильный электрический ток. То есть необходимо устойчивое вещество, проводник с высокой температурой плавления (оно не должно плавиться, несмотря на высокую температуру нагрева).

Таким веществом является вольфрам, потому что у этого металла самая высокая температура плавления (3400 °C). Отметим также, что внутри лампы необходимо создать вакуум, чтобы вольфрам самопроизвольно не возгорелся при контакте с двухатомным кислородом воздуха из-за высокой температуры (мы подробно опишем этот феномен возгорания в главе 25).

С точки зрения энергии мы можем констатировать, что ее потери в лампе накаливания весьма значительны: чтобы сильно разогреть вещество, необходимо огромное количество тепловой энергии, чтобы создать световую энергию (лампы нагревают вашу комнату).

По этой причине от ламп накаливания сейчас отказываются в пользу ламп холодного свечения, чей механизм светоиспускания не связан с увеличением температуры. Энергетическая отдача становится менее затратной.

Это объясняет сияние звезд на небе: Солнце имеет бело-желтый цвет, потому что его температура составляет 5500 °C, что соответствует максимуму излучения в желтом цвете. Некоторые звезды имеют красноватое сияние, такие как Бетельгейзе или Антарес: температура их поверхности ниже. Другие звезды имеют синеватый цвет, такие как Ригель или Сириус: они самые горячие.

Чтобы получить видимый свет, необходимо значительно повысить температуру: температуры на Земле заставляют большинство природных объектов испускать инфракрасные волны. Если одно тело теплее другого, оно испускает более короткие волны, но интенсивность его излучения выше: то есть оно испускает больше инфракрасных лучей. По этой причине инфракрасное

излучение ассоциируется у нас с теплотой: «чем теплее тело, тем сильнее инфракрасное излучение». Инфракрасные камеры основаны на этом принципе. Но в действительности мы видим, что теплота вовсе не связана с инфракрасным излучением: видимый свет соответствует еще более высокой температуре.

4. «Реальность» в физике

Волновая функция вероятности присутствия

До сих пор мы рассматривали фотон как электромагнитную волну, которая распространяется в пространстве. Проблема состоит в том, что эта волна не поддается обнаружению, поскольку она исчезает при любой попытке ее обнаружить. Более того, нам приходится представить электромагнитное поле, распределенное в огромном пространстве, которое мгновенно исчезает, чтобы сконцентрироваться в единой точке (там, где фотон был поглощен): этот факт является по меньшей мере интригующим.

На самом деле точная природа фотона как волны окончательно не определена, поскольку эта волна никогда не будет обнаружена. Понятие реальности в данном случае теряет свой смысл: смысл имеет только то, что можно измерить и наблюдать. Во время своего распространения фотон может быть чем угодно, это абсолютно не важно, поскольку гипотезу невозможно подтвердить: важен только способ его поведения в процессе обнаружения.

Между тем мы видим, что обнаружение, если оно случайно, не происходит в случайной точке: оно подчиняется закону вероятностей. Если точнее, можно вычислить «волновую функцию» (вероятность присутствия) фотона: она указывает на возможность обнаружить фотон в каждой точке пространства.

Опыт показывает, что волновая функция распределена не хаотично: она меняется во времени и пространстве определенным образом и является полностью детерминистской в зависимости от окружающей среды. В опыте Юнга присутствие двух отверстий «моделирует» волновую функцию определенным образом: на стене эта вероятность присутствия «колышется», в темных зонах она нулевая и максимальная в светлых зонах.

Согласно такой точке зрения фотон уже не рассматривается как электромагнитная волна, когда он распространяется. Его рассматривают только как точечную частицу, и волновая функция лишь помогает нам узнать, где эта частица имеет шансы быть обнаруженной.

Так, фотон становится точечной частицей, чье положение в определенный момент управляется волновой функцией: электромагнитное поле больше не распределяется в пространстве подобно электромагнитной волне.

Необходимо понимать, что здесь есть две точки зрения, которые стоят друг друга:

- или мы считаем фотон электромагнитной *волной*, которая концентрируется в одной *точке* при попытке ее обнаружения;
- или мы считаем фотон *точечной* частицей, чья вероятность присутствия во время обнаружения управляется *волной*.

В каждой из двух точек зрения мы встречаем явный корпускулярно-волновой дуализм фотона, который рассматривается по-разному.

Доступна ли «реальность»?

Реальность, которую трудно постичь

Новая точка зрения, которую мы только что предложили, разрешает некоторые странные вопросы, которые мы задавали как перспективу увидеть, как поле мгновенно концентрируется в одной точке пространства. Но возникают и другие вопросы: если волновая функция может быть определена математически, гораздо труднее представить, чем это может быть физически.

Волну на поверхности воды легко увидеть: она представляет собой колебание поверхности. Электромагнитную волну представить сложнее: в данном случае колеблется электрическое поле. Но что сказать о «волновой функции», ведь, по сути, это вероятность? Если речь о «вероятности присутствия», значит, там, где находится волна, вовсе не обязательно что-то должно

присутствовать. Начиная с этого момента само существование волновой функции становится сложно постичь.

Здесь мы касаемся великой сложности квантовой физики: она изучает мир не нашего масштаба, в котором мы не можем провести никаких параллелей с нашей повседневной жизнью. Усилие, которое необходимо сделать, чтобы вновь представить материю и свет такими, какими они могут быть в совершенно ином масштабе, возможно, обречено на провал или, во всяком случае, очень трудно.

Реальность в классической физике: не вполне ясное понятие...

Отметим, что в классической физике концепт реальности тоже не всегда легко определить. Например, электромагнитная волна, о которой мы говорили в предыдущих главах, возможно, не более реальна, чем волновая функция. В самом деле, электрическое поле – это всего лишь плод воображения. Это нечто такое, что может привести в движение любой заряд, помещенный в заданную точку, даже если эта точка пустое место в пространстве.

Мы могли бы считать, что два заряда взаимодействуют напрямую друг с другом без вмешательства электрического поля: в этом случае там, где заканчивается материя, ничего не происходит. Чем говорить о свете, который передает энергию одного заряда другому, мы сказали бы, что два заряда взаимодействуют друг с другом с определенной задержкой.

Говорить, что свет «не существует» и является лишь плодом воображения, не такое уж шокирующее заявление для нашей повседневной жизни. В конце концов, когда мы посмотрим вокруг, мы увидим не свет, а лишь предметы, которые его излучают. Возьмите лазерный луч: пучок света не будет виден, будет видна лишь светящаяся точка на стене, то есть сама стена. Вы всегда можете посыпать пылью на пути лазерного луча, чтобы он стал видимым, но в данном случае вы опять-таки видите лишь саму пыль.

Мы прекрасно понимаем, что для того, чтобы увидеть свет, нужна материя: мы могли бы освободиться от понятия света и сказать, что мы видим лишь материю вокруг себя. С точки зрения физики это объясняется просто: когда мы смотрим на Солнце, колебание зарядов внутри Солнца вызывает колебание зарядов внутри наших глаз и нашего мозга с помощью электромагнитной силы. В этой фразе нет ни слова о свете, и тем не менее она точно отражает реальность.

С этого момента понятие волновой функции выглядит еще более «виртуальным» концептом, который добавляется к «виртуальному» концепту электрического поля.

Волновая функция как основа Вселенной

При таких размышлениях нам хочется заключить, что «реальна» только материя, а все остальное лишь промежуточные математические построения. Между тем в следующей главе мы увидим, что против всяких ожиданий фотон и электрон (то есть свет и материя) имеют огромное сходство: у них одинаковая дуалистическая природа. Сделать свет простым математическим посредником – все равно что сделать то же самое с материей: не останется больше ничего, чем заполнить Вселенную. Именно поэтому лучше рассматривать волновую функцию как реальность и даже как основу реальности, которая нас окружает, даже если это концептуально сложно.

Некоторые физики заключают, что мы должны ограничиться математическими законами, которые «работают», не пытаясь подробно объяснить их физически, потому что сама суть вещей непостижима. Но факт в том, что через сто десять лет после рождения квантовой физики ученые все еще не пришли к согласию относительно физического объяснения этих законов...

Следующая глава поможет иначе взглянуть на мир, который нас окружает, рассматривая природу материи, а не света. Мы узнаем, почему понятие «волновой функции» лежит в основе Вселенной.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Поглощение и испускание света материей может происходить только определенными «порциями» энергии, которые называются квантами света, а также фотонами. Эта энергия пропорциональна частоте излучения согласно закону $E = h\nu$.

- Квантовая природа света объясняет, что тела с обычной температурой излучают инфракрасные волны, тогда как более горячие звезды испускают видимый свет.
- Фотон можно рассматривать как электромагнитную волну, которая мгновенно концентрируется в единственной точке, как только поглощается материей. Его также можно рассматривать как точечную частицу, чье положение во время обнаружения определяется волновой функцией.
- Невозможно определить, в какой именно точке состоится поглощение фотона: можно определить лишь вероятность поглощения в каждой точке. Природа предстает системой, фундаментально чуждой определениям, которую приводят в движение случайные явления.
- В обычном масштабе существует столько наложенных друг на друга фотонов, что точки касания материи возникают везде, где только возможно: число поглощенных фотонов в каждой точке напрямую связано с вероятностью касания, которую можно точно рассчитать. Взаимодействие света и материи опять становится предсказуемым: мы возвращаемся к детерминистским законам классической физики.

23. Материя: частицы или волна?

В предыдущей главе мы увидели, что свет ведет себя как волна во время распространения, но превращается в корпускулу, когда поглощается материей. Также мы увидим, что материя, которая в нашем масштабе представляется совокупностью корпускул, в реальности распространяется как волна на микроскопическом уровне: электрон и протон имеют ту же двойственную природу, что и фотон. Мы подробно опишем электронные волны в атоме и сделаем некоторые удивительные выводы. Волновая природа материи также позволяет понять некоторые явления, которые нарушают классическую физику, как, например, туннельный эффект (туннелирование), или эффект Казимира, который открывает энергию вакуума. Мы также совершим экскурс в теорию декогеренции, которая изучает условия превращения волны в корпускулу и знание которой является главным при создании будущих квантовых компьютеров. Заложив, таким образом, основы квантовой физики, мы откроем тему с некоторыми рассуждениями о концепте реальности в физике.

1. Задачи, которые предстоит решить

Пересмотр модели атома

Возникшая для физиков необходимость пересмотреть взгляд на материю на микроскопическом уровне сложилась из двух вещей: поразительные опыты, которые классическая физика не могла объяснить, и чисто теоретический парадокс в классической концепции атома.

В начале XX в. стало известно, что атомы состоят из трех частиц: протонов и нейтронов, сгруппированных в очень маленьком ядре, и электронов, которые вращаются вокруг ядра и которые гораздо проще вырвать из атома.

Модель Резерфорда в то время представляла атом по образу Солнечной системы, только в другом масштабе: благодаря электростатической силе отрицательно заряженные электроны находятся на «орбите» ядра, которое заряжено позитивно. Как и в Солнечной системе, планеты вращаются по орбите вокруг Солнца благодаря силе притяжения.

Но эта планетарная модель *не может* быть верной. Рассмотрим точку на орбите электрона: в этой точке электростатическое поле, образованное ядром, является постоянным, но поле, образованное электроном, меняется. Оно увеличивается, когда электрон приближается, и уменьшается, когда он удаляется. В этой точке электрическое поле колеблется с периодом, равным периоду полного витка электрона.

Там, где есть колеблющееся поле, возникает электромагнитная волна: это колебание распространяется по всему пространству, и атом излучает свет. Но свет переносит энергию: поскольку энергия сохраняется, значит, она взята у атома. Энергия атома уменьшается по мере того, как излучается свет, из-за периодического движения электрона.

Отметим, что такое следствие можно обнаружить, исключительно приняв во внимание электромагнитную силу, с которой электрон и протон взаимно действуют друг на друга (не имея

нужды говорить о «свете»). Из-за этой силы электрон должен был бы мало-помалу терять высоту, вызывая эту потерю энергии, и по спирали рухнуть на протон. В ту эпоху подсчеты позволили рассчитать время, необходимое для того, чтобы электрон, двигаясь по спирали, достиг ядра: оно составляет порядка сотой доли микросекунды! Иными словами, такой атом был бы совершенно неустойчив.

Поглощение и излучение фотона атомом

Спектр излучения атома

Таким образом, представление об электроне, вращающемся «по орбите» вокруг ядра, явно ложное. Как обычно, только благодаря опыту можно понять, что же происходит на самом деле. Мы подробно остановились на излучении света изолированным атомом: поскольку полностью изолировать атом невозможно, мы рассмотрим на практике распространение газа под очень маленьким давлением.

Это далеко не «абсолютно черное тело», о котором мы говорили в предыдущей главе: в нем материя плотная и процессы излучения/поглощения непрерывны. То есть в нем присутствует постоянный обмен энергией в ее тепловой форме (вибрация молекул) и энергией излучения: финальное излучение и есть результат этого тесного взаимодействия между материей и светом.

В данном же случае мы хотим изучить один-единственный атом. Энергия, которую он излучает, идет изнутри атома. То есть нужно ожидать излучения весьма отличного от излучения абсолютно черного тела.

Опыт приводит к первому выводу: разреженный и холодный газ не дает никакого излучения. Это скорее хорошая новость, ибо она объясняет, что атом стабилен: в противоположность тому, что предусматривает модель Резерфорда, атом не теряет энергию из-за излучения. Это значит, что электрон не «падает» на ядро. Это также подтверждает, что представление об электроне, вращающемся вокруг ядра, наверняка ложное, поскольку в этом случае атом должен был бы испускать лучи.

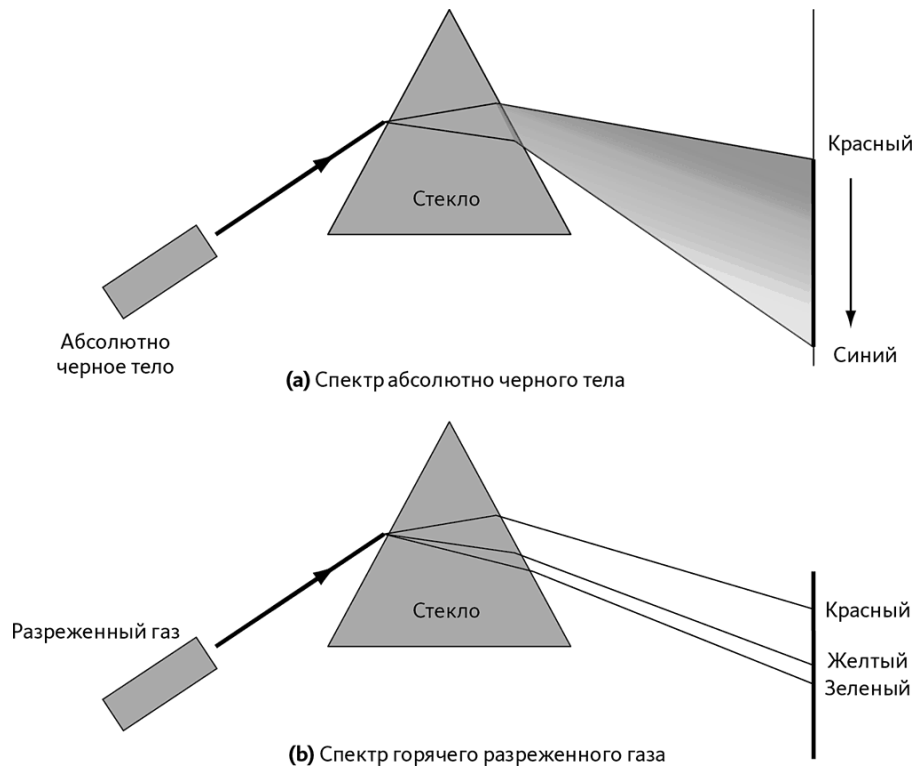


Рис. 23.1 – Дискретный и непрерывный спектр

(а) – черное тело дает излучение волн всех размеров длины, что образует все цвета радуги на экране справа (непрерывный спектр).

(б) – горячий разреженный газ испускает только волны определенной длины: на экране образуются цветные полосы, соответствующие определенному цвету (дискретный спектр).

Теперь нагреем наш разреженный газ: атомы приобретают больше кинетической энергии, и столкновения становятся сильнее. При этом мы видим, что газ начинает излучать свет.

Если мы поместим призму, чтобы рассеять излученный свет, то получим неожиданный результат: вместо семи цветов радуги, на которые раскладывается солнечный свет, мы получили «светящиеся полосы», соответствующие определенным цветам (→ **рис. 23.1**). Это значит, что излучаются только волны определенной длины, а не все волны, составляющие видимый свет. Это называется «дискретным (прерывистым) спектром», в отличие от «непрерывного спектра» солнца.

Чем короче длина волны, тем сильнее она отклоняется в призме: так, в зависимости от положения полосы на экране, можно сделать вывод о длине соответствующей волны. При этом мы замечаем, что данный газ (например, гелий) излучает волны всегда одной и той же длины, которые, следовательно, присущи этому газу: на выходе из призмы светящиеся полосы расположены всегда в одном и том же месте. Зато два разных газа излучают волны различной длины: дискретный спектр будет выглядеть по-разному.

Между тем определенная длина волны соответствует определенной частоте колебания ($\nu = c/\lambda$), то есть излученные фотоны обладают определенной энергией ($E = h\nu$). Это показывает, что атомы не способны эмитировать любые фотоны, а только обладающие строго определенной энергией.

Спектр поглощения атома

Рассмотрим последний опыт, прежде чем перейти к результатам. Пошлем волну белого света (совокупность волн разной длины) к разреженному холодному газу. Белый свет пройдет через газ: на выходе поместим призму так, чтобы наблюдать полученный спектр.

Результат говорит сам за себя: посреди радужных полос, полученных благодаря дисперсии света, в определенных местах мы наблюдаем *темные, неосвещенные полосы*. Это значит, что волны какой-то определенной длины были *поглощены* газом. Мы констатируем, что волны этой длины в точности совпадают с теми, которые излучал газ, когда его нагревали. Единственная разница в том, что на этот раз мы получили темные полосы на световом фоне, тогда как перед этим были светящиеся полосы на черном фоне (→ **рис. 23.2**).

Мы говорим о «спектре поглощения» в противоположность «спектру излучения». В обоих случаях наблюдаемые полосы образованы газом: в одном случае горячий газ *эмитирует* волны определенной длины, в другом случае холодный газ их *поглощает*.

Это значит, что газ не способен поглотить любой фотон: поглощается только энергия определенной мощности, соответствующая длине наблюдаемых волн. Каждый газ поглощает волны разной длины: полученный спектр полос, таким образом, является характерной «визитной карточкой» газа, которая позволяет сразу понять, о каком веществе идет речь.

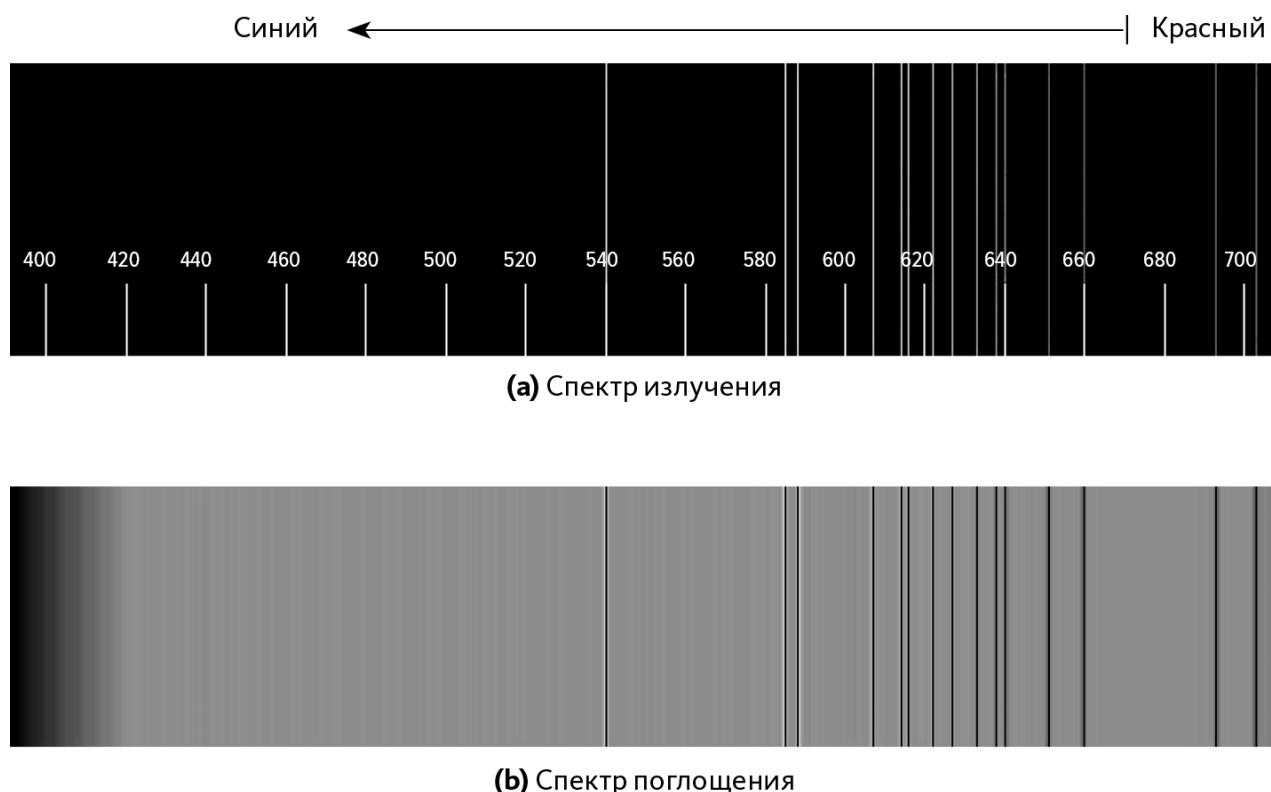


Рис. 23.2 – Спектр поглощения и излучения неона

Здесь мы представили результат, полученный на выходе из призмы.

В части (а) изображен спектр излучения, полученный при нагревании газа: излучаются лишь волны определенной длины, что образует светящиеся полосы на черном фоне.

В части (b) изображен спектр поглощения, полученный при прохождении белого света через холодный газ: газом поглощаются только волны определенной длины, что объясняет наличие темных полос. Это именно те волны, которые излучаются в части (а).

Переходная модель...

Как объяснить эти результаты? В 1913 г. Нильс Бор предложил модель атома, удовлетворяющую опытным данным.

Временно продолжим считать, что электроны вращаются по орбите вокруг ядра: становится ясно, что электроны не могут следовать по произвольной орбите. Им доступны лишь определенные орбиты, каждая из которых соответствует различной энергии электрона (чем ближе орбита к ядру, тем слабее энергия электрона). Каждый раз, когда электрон переходит от большей орбиты к меньшей, эмитируется фотон, который возмещает потерянную энергию электрона.

Данная гипотеза позволяет понять, что происходит во время наших опытов: когда газ холодный, электрон находится на самой нижней орбите (его энергия минимальна). Никакое излучение невозможно, потому что это означало бы, что электрон приближается к ядру (потеря энергии), а это невозможно.

Когда газ горячий, столкновения атомов могут добавить необходимой энергии, чтобы электрон перешел на более высокую орбиту (атом возбужден). С этой новой орбиты электрон может спуститься сам на более низкую: энергия, которую он теряет по дороге, выделяется в виде излучения (→ рис. 23.3). Если точнее, можно предположить, что один-единственный фотон эмитирован во время всей операции (что подтвердится в дальнейшем).

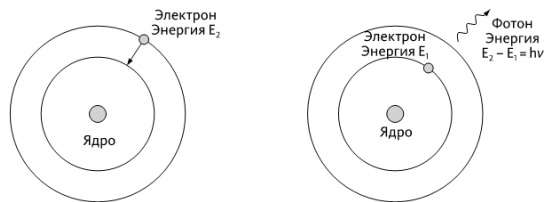


Рис. 23.3 – Спонтанное излучение фотона в модели Бора

В этой модели электрон может достигать лишь определенного уровня энергии (здесь мы представили это в виде орбиты). Когда электрон переходит с верхнего уровня на нижний, он теряет энергию: эмитированный фотон компенсирует разницу энергий двух орбит, и общая энергия сохраняется.

Отметим, что схема представляет собой лишь воображаемый атом: на практике электроны не описывают «орбит», и настоящий атом выглядит совсем по-другому (параграф 3).

Энергия этого эмитированного фотона соответствует потерянной энергии, то есть разнице энергии между отправной орбитой и орбитой прибытия. Поскольку электрону позволены лишь определенные орбиты, выделиться может лишь энергия строго определенной мощности: при $E = h\nu$ это означает, что излучаться могут только волны определенной длины. Это объясняет светящиеся полосы, которые мы наблюдаем.

Это поднимает фундаментальные вопросы: почему электрон не может двигаться по произвольной орбите? Почему позволенные орбиты у разных атомов разные (водород, гелий)?

Кроме того, само понятие орбиты следует упразднить, потому что, как мы убедились, электрон, вращающийся вокруг ядра, образует колеблющееся электрическое поле: такой атом должен был бы светиться, даже при низкой температуре.

Таким образом, модель Бора как раз соответствует случаю и подтверждена опытом, но ее невозможно было объяснить с помощью известных фундаментальных законов физики. Для ученых наступило время пересмотреть свое представление о природе материи...

2. «Световая» гипотеза

Сходство электрона и фотона

Чтобы лучше понять точную природу материи, нам необходимо поставить завершающую точку в поведении света. Когда электромагнитная волна поглощается материей, она участвует в двух процессах:

- Она отдает энергию материи. Большая часть этой энергии затем переходит в тепловую форму: атомы двигаются быстрее, их кинетическая энергия больше.

- Кроме того, электромагнитное поле волны действует с силой на заряды, которые ее поглощают: это придает зарядам ускорение в наиболее подходящем направлении, направлении распространения волны (подсчеты позволяют это продемонстрировать, мы не будем их приводить). То есть все происходит так, как если бы волна, распространяясь и поглощаясь, расталкивала материю перед собой.

Если теперь мы рассмотрим простой фотон, замечания будут те же, но взаимодействие происходит в одной определенной точке, а не повсюду, где распространяется волна. Так, когда мы посылаем фотон, он «ударяет» материю в определенной точке, передавая ей энергию и «толкая» ее перед собой.

Теперь представим, что мы посылаем к стене уже не фотон, а электрон: здесь также столкновение происходит в определенной точке, и электрон отдает свою энергию стене, толкая материю перед собой, благодаря первоначальному толчку.

В итоге поведение фотона выглядит очень близким к поведению электрона. В момент взаимодействия фотон действительно ведет себя как целиком точечная частица, а не как волна.

Гипотеза де Бройля

После констатации этого факта в 1924 г. Луи де Бройль провел еще более смелую аналогию. Вот как он рассуждал: «Электрон и фотон схожи по многим параметрам. Однако фотон является волной, которая превращается в точечную частицу только в момент его обнаружения: то есть он одновременно является волной и частицей. В этом случае электрон, который является частицей, не является ли также одновременно и волной?»

Это значит, что электрон должен был бы вести себя как волна до его обнаружения, когда он становится точечной частицей.

Если это действительно волна, наверняка можно определить «длину волны» для электрона. Здесь де Бройль также действовал по аналогии с фотоном. Мы опустим рассуждения де Бройля, которые привели к следующему заключению: если электроны являются волной, длина их волны должна быть равна $\lambda = h/mv$ для слабых скоростей ниже скорости света (где m – масса электрона, а v – скорость электрона).

Небольшой подсчет позволяет определить, что для нерелятивистской скорости в 1000 км/с длина волны составляет порядка нанометра. Это очень малое значение, которое в диапазоне электромагнитных волн соответствует зоне рентгеновских лучей.

Чтобы проверить гипотезу де Бройля, достаточно отправить электроны в очень узкую щель, шириной порядка нанометра, и поместить сзади стенку. Если появится изображение дифракции, значит, электрон действительно является волной, которая превращается в частицу лишь в момент столкновения. В противном случае это будет означать, что электрон является простой частицей и гипотеза де Бройля не верна.

Опыт состоялся в 1927 г.: вместо экрана с отверстием использовали кристалл, чья атомная решетка послужила микроскопическим отверстием. При прохождении электрона через кристалл действительно наблюдалась дифракция, как и предсказывал де Бройль, – более того, длина волны тоже соответствовала этому предсказанию.

Таким образом, электрон не следует рассматривать как «маленький точечный шарик»: он является волной, которая превращается в точечную частицу только при обнаружении. Теперь понятно, почему «традиционное» представление об атоме, где точечный электрон вращается вокруг ядра, должно быть окончательно предано забвению.

Природа волны электронов

Чтобы понять эти волны, как и в случае с фотоном, здесь возможны две точки зрения:

- Первая точка зрения: волна является всего лишь «носителем». Она только дает «возможность присутствия» электрона в любой точке пространства в любой момент. Истинное расположение электрона как точечной частицы может быть определено лишь во время его обнаружения.

- Вторая точка зрения: электрон распространяется в виде совокупности волн, и его заряд тоже. То есть в этом смысле весь электрон похож на «облако». Электрон находится «сразу везде», он занимает все пространство вокруг атома. В этом случае волна представляет «плотность вероятности присутствия» электрона, а не «вероятность присутствия». Если мы пытаемся его обнаружить, электрон мгновенно концентрируется в заданную точку волны с вероятностью, данной волной.

Точка зрения «электрон-облако» немного приятнее, потому что это проще представить себе, чем более или менее виртуальную «волновую функцию». Электрон одного атома больше не является движущимся шариком, речь идет об облаке, которое распространяется вокруг атома.

Уравнение Шрёдингера

Еще до того, как она подтвердилась опытом, гипотеза де Бройля была встречена физиками с истинным восторгом: такой простой и единый образ материи и света обязательно должен был подтвердиться... Так, с 1925 г. Эрвин Шрёдингер ставит себе задачу найти новую формулу, которая заменит старый добрый фундаментальный закон динамики ($m\vec{a} = \vec{F}$), чтобы

описывать движение волн, а не точечных частиц. Эта формула должна отвечать результатам опытов и давать не только информацию о движении волн материи, но и о форме этих волн.

«Уравнение Шрёдингера», выведенное таким образом, составляет фундаментальное уравнение квантовой физики. Это относительно сложное уравнение, и мы не будем приводить его здесь. Зато мы рассмотрим, что оно означает на микроскопическом уровне.

Упомянем только, что волна материи представлена в виде математической функции. Например, синусоидальная волна может быть представлена функцией синуса. Оказывается, функция, полученная с помощью уравнения Шрёдингера, дает больше информации, чем просто вероятность присутствия рассматриваемой частицы. Точнее, вероятность присутствия представлена *квадратом* этой функции (см. врезку ниже для более подробных объяснений). В дальнейшем мы будем рассматривать только эту вероятность присутствия.

Теперь, когда мы знаем о волновой природе электрона, мы сможем точно сказать, что происходит внутри атома на самом деле, – это попутно позволит понять таинственные опыты, упомянутые в предыдущем параграфе, о световом излучении атомов.



ВОЛНА ФОТОНА И ВОЛНА ЭЛЕКТРОНА

Волна электрона связана с «плотностью присутствия» частицы или с «плотностью вероятности». Те же замечания мы сделали по поводу фотона: частицы света и материи в этом пункте похожи.

Однако фотон также рассматривается и как электромагнитная волна, то есть речь идет об электрическом и магнитном поле, колеблющемся между положительными и отрицательными значениями. Мы сказали, что плотность энергии пропорциональна *квадрату* электрического и магнитного поля (глава 20). Таким образом, плотность энергии максимальна на вершине (максимальный положительный заряд поля) или на дне впадины (максимальный отрицательный заряд поля). Если мы попытаемся обнаружить фотон, именно там у нас больше шансов его найти, потому что там плотность вероятности максимальная.

Иными словами, плотность вероятности связана с *квадратом* волновой функции – это результат, который мы признали для электрона.

3. Описание атома

Происхождение квантовых энергетических уровней

Электрон, который свободно перемещается в пространстве, очень похож на фотон: это волновая функция, которая распространяется, длина волны составляет $\lambda = h/mv$. Если мы попробуем его обнаружить, электрон окажется в одной точке этой волны, вероятнее всего «на гребне волны». В момент, когда мы ее обнаружим, «волна-носитель» мгновенно исчезнет (электрон-волна становится электроном-частицей).

Также и фотон является волной до тех пор, пока его не попытаются обнаружить: в опыте Юнга это произошло при установке на его пути стенки. В момент обнаружения фотон становится точечной частицей, поскольку касается стены в одной конкретной точке, в то время как волна исчезает (мы уточним понятие «обнаружение» и условия превращения волны в точечную частицу в параграфе 4).

Аспект электрона в атоме, напротив, совсем другой. На этот раз электрон пленник электростатического поля ядра, то есть он не может вести себя как волна, которая распространяется. Наоборот, волна остается запертой в ограниченном пространстве. «Волна, запертая в ограниченном пространстве»: вам это ничего не напоминает? Мы уже изучали эту ситуацию в случае с акустической волной, запертой в полости, как у духовых инструментов (глава 12). И тогда мы сделали вывод, что в таком виде могут существовать лишь волны определенной длины, соответствующей размеру полости.

Также и волна электрона, запертого в атоме, не может обладать произвольной длиной. Это значит, что электрону позволены только определенные скорости ($\lambda = h/mv$) и определенная энергия.

А вот и долгожданный результат, который позволит понять модель атома Бора! Электрон может обладать лишь определенным уровнем энергии, потому что может иметь волны некоторой определенной длины: это именно то, что нужно было модели Бора, чтобы объяснить спектр излучения и поглощения атомов. Когда электрон переходит от одной энергии к более низкой, эмитируется фотон, компенсируя разницу энергий. Поскольку электрон может обладать только определенными величинами энергии, то же происходит и с эмитированными фотонами: только волны строго определенной длины могут быть выпущены.

«Форма» волн

Результаты, полученные в случае с акустическими волнами, также позволяют понять вид, который принимают волны электронов в атоме. Если длина волны равна двойной длине полости, это значит, что есть только один гребень в центре, как показано на **рис. 23.4.a1**. Если длина волны равна длине полости, это значит, что есть один гребень и одна впадина ($\rightarrow$ **рис. 23.4.a2**).

Напомним, что в случае с электроном возможность присутствия дана через *квадрат* волновой функции: это дает формы, показанные на **рис. 23.4.b1** и **23.4.b2**. Отметим, что они соответствуют полости, ориентированной по определенной оси, как это было при описании акустической волны. На самом деле «полость», которая составляет атом, имеет три измерения: представление волны в зависимости от расстояния в ядре от этого несколько изменилось бы. В дальнейшем мы предположим, что гребни являются вероятностью присутствия электрона в зависимости от расстояния в ядре, но нужно не забывать, что в этом случае вид гребней не совсем соответствует реальности.

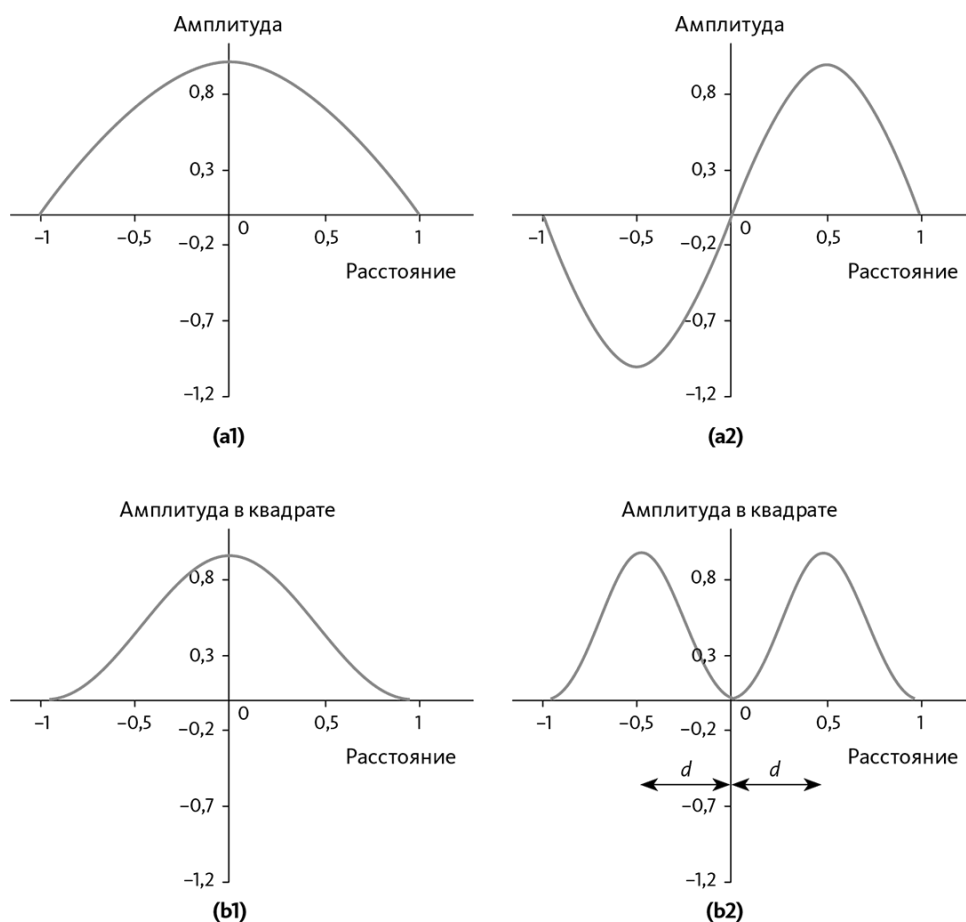


Рис. 23.4 – Волны, заперты в полости

Значения на осях являются произвольными.

В части (а) мы представили две волны самой большой длины, которые могут существовать в полости ($\lambda = 2a$ в случае (a1) и $\lambda = a$ в случае (a2), где a – длина полости).

В части (b) мы представили квадрат этих двух функций. В случае с электронами атома это означало бы вероятность присутствия электрона, начало координат соответствует расположению ядра.

Каждая волна соответствует строго определенному среднему расстоянию в ядре, связанному с определенной энергией.

На этих рисунках нулевая точка оси представляет собой центр полости: в случае с атомом речь идет о ядре. Мы видим, что на графике b2 электрон находится от ядра в среднем на определенном расстоянии d . Эта волна была представлена на рис. 23.5 более наглядно: мы снова видим то же расстояние d до ядра. Видно, что это очень напоминает традиционный облик «орбиты», расположенной на расстоянии d от ядра; но здесь электрон не проходит по этой орбите, он находится *везде сразу*. По аналогии с классическим понятием орбиты волна электрона в атоме называется «орбиталь».

Разные возможные волны имеют каждая свое собственное среднее расстояние до ядра. Какой бы ни была волна, это среднее расстояние до ядра всегда не нулевое, поскольку волна распределяется по целому диапазону расстояний: это значит, что энергия электрона также не равна нулю.

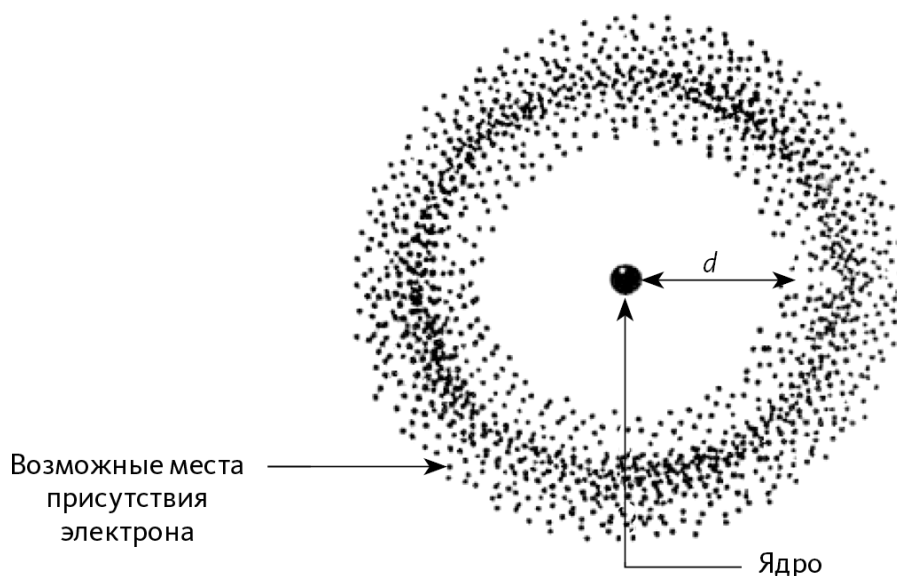


Рис. 23.5 – Вероятность присутствия электрона в атоме

Каждая точка представляет собой обнаружение электрона. Накладывая точки большого количества обнаружений, мы получаем внешний вид волны вероятности присутствия в двух измерениях. Мы видим, что вероятность найти электрон выше на определенном расстоянии от ядра. На заданной высоте ясно просматривается аналогия с понятием орбиты; но электрон не перемещается по этой орбите, он находится «везде сразу». Это называется «атомная орбиталь».

Другими словами, существует минимальный энергетический уровень, ниже которого электрон спуститься не может: он не может подойти к ядру ближе, потому что среднее расстояние до ядра никогда не может быть нулевым. Волновая сущность электрона также объясняет, что электрон не мог бы спуститься ниже минимальной орбиты, соответствующей наименьшему среднему расстоянию до ядра.

Наконец, необходимо уточнить, что волны электронов могут распределяться в трех пространственных измерениях внутри атома. Но волна не обязательно распространяется таким образом во всех направлениях (сферическая симметрия не обязательно присутствует). Уравнение Шрёдингера позволяет уточнить эту геометрию в трех измерениях: мы представили несколько примеров на **рис. 23.6**.

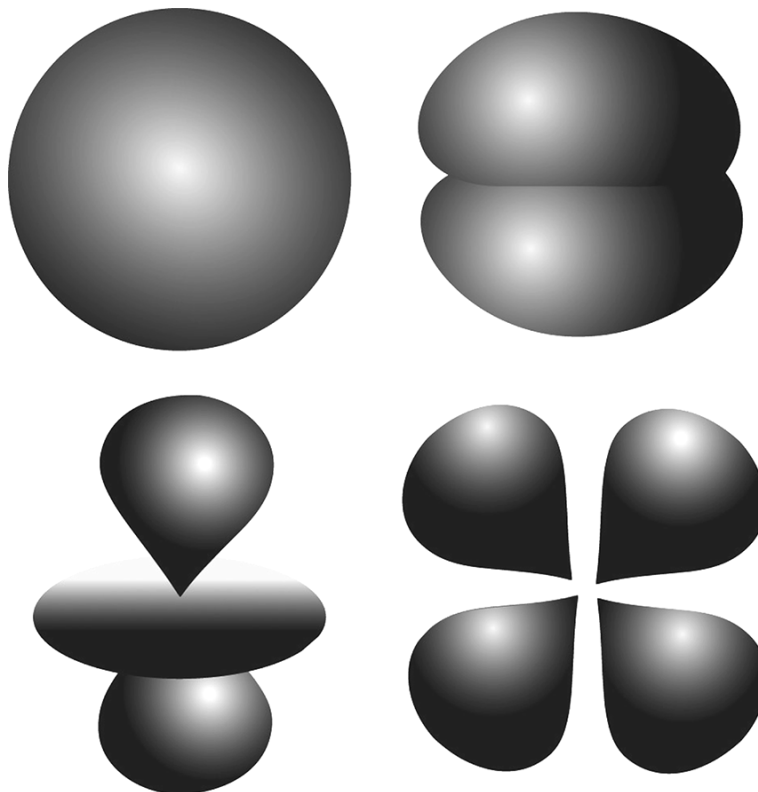


Рис. 23.6 – Геометрия атомных орбиталей

Мы представили разные возможные формы электрона атома (ядро в центре). Некоторые электроны являются сферическими облаками, другие вытянуты в различных направлениях, у третьих более сложная форма.

*В качестве замечания, волна на **рис. 23.5** соответствовала бы сферической геометрии слева вверху.*

На этом рисунке центром всех волн является ядро. Поверхность представляет границу, за которой шанс обнаружить электрон становится ниже 5 %, если мы постараемся его найти. Иными словами, в девяноста пяти случаях из ста мы найдем электрон внутри поверхности. Мы видим, что некоторые волны имеют форму сферы: можно обнаружить электрон вокруг ядра, не глядя на предпочтительное направление. Другие волны имеют более странную форму, вытянутую в разных направлениях.

Вид атомов и молекул

Геометрия атома

Мы видели, что электроны образуют в атоме «облака». Если электронов много, каждый будет иметь разную форму волны. Все эти электроны – отдельные облака, которые *накладываются* друг на друга в атоме: нужно представить различные волны с **рис. 23.6**, которые проникают друг в друга внутри атома. Это дает достаточно верное представление о внешнем виде материи этого масштаба...

Размер образованного облака отождествляется с размером атома: порядка десятой доли нанометра. Атом есть не что иное, как это облако, к которому добавляется совершенно микроскопическое центральное ядро (где-то в 100 000 раз меньше электронного облака).

Размер ядра

Более точное описание ядра будет дано позднее, когда мы перейдем к ядерной физике, но мы уже сейчас можем понять разницу в размерах между ядром и электронами, которые его окружают. На самом деле не только электроны являются волной: волновая природа присуща всем частицам материи, в том числе протонам и нейтронам.

Выражение $\lambda = h/mv$ дает нам представление о длине волны протона и нейтрона: они примерно в 2000 раз тяжелее электрона, что означает, что длина их волны в 2000 раз короче (при той же скорости).

Волна электронов распределяется по всему атому (десятая часть нанометра); волна ядра, которая является совокупностью всех нейтронов и протонов, распределяется в гораздо меньшем объеме, сосредоточенном в центре атома. Разница в размере связана прежде всего с разницей в массе.

Внешний вид молекулы

Завершим это «открытие» микроскопических частиц, поговорив о внешнем виде молекул. Молекула состоит из нескольких атомов, «склеенных» друг с другом электростатической силой. Таким образом, электроны разных атомов оказываются рядом со множеством ядер, а не с одним-единственным. То есть они заперты в электростатическом поле, весьма отличном от поля одного атома. Это значит, что электрон, как волна, может принимать очень разные формы, которые мы обозначили для одного атома. «Облако», которое образует электрон, может даже распространяться на всю молекулу, не сосредотачиваясь на одном ядре.

В качестве примера возьмем молекулу воды H_2O : электроны атома кислорода не остаются запертыми вокруг ядра кислорода, они распределены по всей молекуле. Зато электрон атома кислорода имеет большую «плотность вероятности» возле ядра кислорода, чем возле ядра водорода: если мы попытаемся его обнаружить, у нас больше шансов найти его рядом с кислородом.

В итоге такая молекула, как H_2O , вовсе не является совокупностью трех «смежных шариков» (O, H, H), склеенных друг с другом. Это единая волна, состоящая из наложения друг на друга всех электронов молекулы, внутри которой находятся разные ядра, расположенные в определенных местах.

Такое положение вещей очень важно, чтобы понять химические реакции, которые происходят при взаимодействии между электронами. Мы подробно поговорим об этом в следующей главе.

4. Когда понятие реальности становится все более смутным

Спонтанное излучение

Случайное событие

Вернемся в последний раз к спонтанному излучению фотона возбужденным атомом, уточнив некоторые наблюдения, которые мы оставили в стороне. Предположим, что мы придаем атому необходимую энергию, чтобы электрон перешел на более высокую энергетическую орбиталь. Сколько времени придется ждать, пока электрон снова спустится на более низкую орбиталь, выпустив фотон?

Опыт показывает, что процесс снятия возбуждения (излучение фотона) является произвольным: невозможно предсказать момент, когда мы будем наблюдать эмиссию фотона.

Можно только сказать, что чем больше мы ждем, тем больше шансов увидеть, как электрон вернется на первую орбиталь.

Чувствуется связь с произвольным обнаружением фотона в случае интерференции Юнга: в этом опыте нельзя предсказать, где именно фотон коснется стены, и можно рассуждать лишь в терминах вероятности. В случае спонтанного излучения произвольным становится не место, а *время*: *момент* снятия возбуждения не может быть предсказан, так же как и *место* касания фотона предсказать нельзя.

Объяснение процесса излучения

Что может оправдать подобный феномен случайности? Чтобы его понять, нужно определить, что заставляет электрон вернуться на первоначальную орбиталь. Если бы он вращался вокруг ядра, он эмитировал бы излучения естественным способом, но мы только что убедились, что понятие орбиты является ложным. Если электрон не вращается, у него нет никаких других причин излучать фотон и менять орбиталь...

Наблюдение показывает, что электрон обладает «кинетическим моментом», то есть он по своей сущности обладает характеристикой, связанной с вращением (глава 7). Как если бы «облако», которое образует электрон, вращалось вокруг ядра.

В результате электромагнитная сила стремится заставить электрон упасть на ядро, как в классической физике. Большая разница в том, что он не может следовать по произвольной орбитали и может падать только «скачками».

Что же происходит на практике? Как только электрон оказывается на более высокой орбитали, он начинает излучать волну благодаря влиянию электромагнитной силы. Но волна описывается волновой функцией, что означает, что существует лишь некая вероятность обнаружить фотон.

В этом случае существуют две точки зрения.

- Предположим, что мы пытаемся обнаружить фотон: у нас один шанс из десяти, что мы увидим фотон по истечении секунды. Если он обнаружен, значит, электрон вернулся на отправную орбиталь. Один раз из десяти мы обнаружим совокупность {электрон на нижней орбитали + выпущенный фотон} и девять раз из десяти обнаружим совокупность {электрон на верхней орбитали + отсутствие фотона}.

- Теперь порассуждаем о частицах не как корпускулах, а как волнах (= мы не стремимся ничего обнаружить). Совокупность {электрон + выпущенный фотон} образует одну «систему вероятности». Большая часть этой волны (девять десятых) соответствует электрону на верхней орбитали, но маленькая часть (одна десятая) соответствует совокупности {электрон на нижней орбитали + выпущенный фотон}.

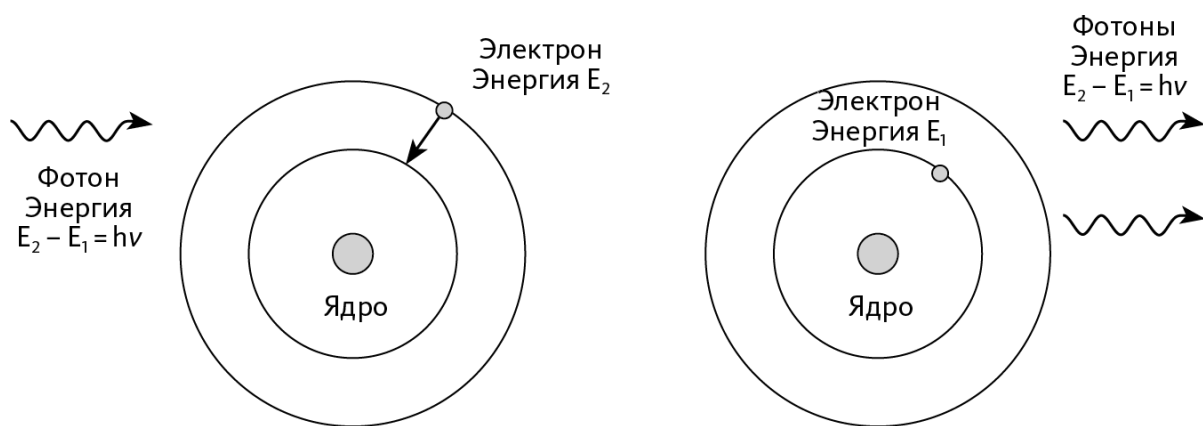
Таким образом, в качестве волны электрон находится одновременно на верхней и нижней орбитали, но не в равной степени. Плюс к этому, мы видим, что фотон и электрон не могут быть отделены друг от друга как независимые частицы: только пара {фотон + электрон} имеет смысл в качестве единой волны. Только в момент обнаружения фотон и электрон отделяются друг от друга, и каждый начинает жить своей жизнью...

Благодаря электромагнитной силе электрон постоянно излучает «волну вероятности присутствия (или обнаружения) фотона». Это значит, что вероятность обнаружить фотон все больше по мере того, как идет время: именно это мы наблюдаем.



ЛАЗЕРЫ

Вместо того чтобы позволить электрону спонтанно вернуться к нижней орбитали, можно изменить процесс, дестабилизовав электрон с помощью электромагнитной волны. Если разница энергии между отправной орбиталью и орбиталью прибытия – это E , предположим, что фотон, который собираются послать к атому, должен обладать именно энергией E : итак, мы производим «вынужденное излучение» (см. **рис. ниже**).



Принцип вынужденного излучения

В конечном счете фотон энергии E эмитирован атомом благодаря снятию возбуждения и присоединился к падающему фотону энергии E , который позволил реализовать эту вынужденную эмиссию: теперь есть два фотона одинаковой энергии, то есть одной длины волны, которые распространяются в одном направлении. Эти фотоны могут сами снять возбуждение других атомов, и общее число фотонов энергии E тогда увеличивается экспоненциально.

Таким образом, электромагнитная волна большой амплитуды быстро развивается, являясь наложением всех фотонов и обладая определенной длиной волны. Остается только поместить ее в зеркальную полость, чья длина от одного края до другого и обратно является многократным отражением длины волны: излучение становится больше с каждым отражением так же, как волны некоторой длины усиливаются в духовых инструментах (→ **рис. 11.3**, глава о звуке).

В конце концов свет, выходящий из лазера, созданный таким образом, имеет следующие свойства:

- Это «монохромная волна», потому что у нее определенная длина (= всего один цвет). Он позволяет, к примеру, проигрывать компакт-диски: он состоит из чередующихся «бугров» и «впадин», которые таким образом формируют бинарный код. Разница высоты между бугром и углублением составляет четверть длины волны: когда лазерный луч отражается на бугре, полученная волна усиливается, как на **рис. 11.3**. Когда он отражается в углублении, полученная волна, наоборот, исчезает, как на **рис. 11.2**. В конечном итоге полученный свет либо слишком слабый, либо слишком сильный, в зависимости от того, отражается ли луч от бугра или от впадины: это формирует бинарный код, который легко можно конвертировать в электрическую форму.

- Лазерный луч очень четко направлен, поскольку все фотоны распространяются в одном направлении. Свет не рассеивается по всему пространству, что позволяет ему распространяться на большие дистанции. Например, это позволило с точностью измерить расстояние от Земли до Луны благодаря измерению длительности пути туда и обратно лазерного пучка, отправленного нашим спутником (для этого космонавты установили зеркало на поверхности Луны, чтобы свет мог отразиться).

- Лазерный луч очень сильный благодаря процессу усиления внутри полости. Между тем, когда свет поглощается веществом, он отдает ему свою энергию в тепловой форме (заряды приведены в движение электромагнитной волной, что приводит к вибрации атомов). Таким образом, лазер используется для сварки или резки материалов, а также для лечения близорукости, «подрезая» роговицу глаза...

Много частиц, одна волна

В конечном итоге это явление открывает новый взгляд на природу: мы убеждаемся, что элементарные частицы сами составляют единое целое, единую волну до того момента, пока мы не попытаемся их обнаружить.

Проведем аналогию с деревьями в лесу: многие из них связаны корнями, которые связали их друг с другом. То есть каждое дерево нельзя считать независимым живым существом: с помощью этих связей весь лес является единым живым существом... В каком-то смысле

деревья являются отдельными «корпускулами» в воздухе, но формируют единую «волну» на земле...

Когда волна превращается в точечную частицу?

Роль измерения

Мы сказали, что «электрон-волна» превращается в «электрон-корпускулу», когда его пытаются обнаружить (то же касается и фотона). Что означает это «обнаружение» на практике? Другими словами, какие конкретные физические процессы приводят к уничтожению волны и ее концентрации в точечную частицу?

Квантовая физика придерживается простого ответа: уничтожение волны происходит тогда, когда некий оператор измеряет физическую величину, свойственную частице (например, ее положение). Волна *никогда* не может быть визуализирована, поскольку всякое измерение (любое наблюдение) приведет к ее мгновенному исчезновению.

Речь идет об опытной констатации факта, но наше любопытство до конца не удовлетворено, и изначальный вопрос все еще стоит: в чем состоит особенность измерения, которая объяснила бы уничтожение волны?

Кот Шрёдингера

Чтобы лучше понять широту проблемы, возьмем пример со знаменитым «котом Шрёдингера». Представим, что мы поместили кота в закрытую непрозрачную коробку. Внутри мы также поместили радиоактивный источник: в любой момент тот имеет некоторую вероятность эмитировать частицу в виде спонтанного излучения атома. Разница в том, что эта излученная частица способна убить кота...

Как в случае со спонтанным излучением, совокупность {радиоактивный источник + излученная частица} подчиняется единой вероятности. Квантовая физика в данном случае оговаривает, что, поскольку никаких измерений не было, эта совокупность остается в форме волны.

Это значит, что вопрос, была ли частица излучена или нет, не имеет смысла: частица одновременно «излучена» и «не излучена». Можно только сказать, что чем дольше идет время, тем больше вероятность, что частица была излучена.

Если само понятие излученной или неизлученной частицы не имеет смысла, это значит, что понятие живого или мертвого кота также не имеет смысла! Частица одновременно излучена и не излучена, следовательно, кот одновременно и жив и мертв...

Если нам вздумается открыть коробку, мы увидим либо живого, либо мертвого кота, потому что в данном случае мы совершаем измерение (наблюдение), которое уничтожает волну. Чем больше мы ждем, прежде чем открыть коробку, тем больше вероятность, что частица была излучена, следовательно, больше вероятность, что кот будет мертв...

В данном примере у нас есть искушение сказать, что если мы обнаружим кота мертвым, значит, он был мертв еще до того, как открыли коробку. Квантовая физика начала XX в. утверждает, что это не так: кот был и жив и мертв одновременно...

Столь шокирующее заявление вызвало множество споров. Некоторые физики считают, что истина по определению непостижима, поскольку ее можно установить лишь измерениями. Идея о том, что кот одновременно и жив и мертв, не представляет никакой проблемы, поскольку она ускользает от всякого прямого наблюдения (мы можем обнаружить кота только живого или мертвого, поскольку наблюдение уничтожает волну). Все, чего физики требуют от теории, – соответствовать опыту, что вполне можно сказать о квантовой физике.

Однако этот мысленный эксперимент смутил многих физиков: сам кот наблюдает сцену изнутри, он знает, жив он или мертв, и, таким образом, осуществляет нечто вроде измерения. Квантовая физика времен Шрёдингера создает ощущение, что волну уничтожает Сознание, что по меньшей мере забавно.

На протяжении XX в. были разработаны разные теории для разрешения этой проблемы с измерением, то есть для того, чтобы уточнить, как и почему волна превращается в частицу.

В 1970 г. среди прочих была выдвинута теория декогеренции, которая понравилась многим физикам элегантностью своего концепта. Начиная с 1996 года опыты начали подтверждать эту теорию, которая сегодня признана большинством научного сообщества.

Феномен декогеренции

Теория декогеренции утверждает, что нет необходимости вводить дополнительный постулат, связанный с измерением, чтобы объяснить, что волна исчезает и превращается в частицу: это взаимодействие с окружающей средой, которое мало-помалу неотвратно стремится уничтожить волну. Измерение не представляет никакой особенности, объясняющей превращение в частицу: когда мы используем измерительный прибор, то лишь повышаем взаимодействие волны с окружающей средой. Переход волны в частицу, который кажется мгновенным, на самом деле постепенный, но осуществляется за очень короткий промежуток времени.

Чтобы понять, как волна может таким образом исчезнуть при контакте с окружающей средой, мы опять вспомним опыт с акустической волной, запертой в полости, подобной музыкальному инструменту (глава 12). Стенки создают внутри многократное отражение: полученная волна является результатом наложения всех этих волн. В зависимости от размера полости, фазы этих многочисленных волн в той или иной степени не совпадают друг с другом. В частности, в полостях определенных размеров волны оказываются в противофазе: они гасят друг друга. Из-за этого феномена мы пришли к заключению, что в полости могли существовать только волны определенной длины – те, чья длина соответствует $\lambda = 2a/n$ (где a – длина полости и n – общее число волн).

Подобное разрушение волны именно то, что нужно квантовой физике, чтобы объяснить переход от волны к частице. Когда частица-волна взаимодействует с окружающей средой, она подвергается многократным отражениям, которые приводят к фазовым смещениям между отраженными волнами. Разница с музыкальным инструментом в том, что длина полости не зафиксирована: окружающая среда подвержена сильному волнению. Так, все фазовые смещения представлены на уровне отраженных волн. Это значит, что они гасятся 2 к 2, у каждой волны есть противоположная ей по фазе. За короткое время взаимодействие с окружающей средой уничтожает излученную волну.

Между тем энергия изначальной волны должна сохраняться: на практике она оказывается сконцентрированной в единственной точке, вместо того чтобы распределиться в пространстве. Иными словами, частица-волна только что превратилась в частицу-корпускулу.

Эти отражения происходят также внутри систем, содержащих большое число элементарных частиц: простая пыль может содержать 10^{16} атомов, которые, в свою очередь, состоят из электронов и нуклонов, которые образуют столько же взаимодействующих волн. Так, чем больше такая система, тем быстрее волны гасят друг друга и тем сложнее наблюдать их волновую природу. Именно по этой причине на микроскопическом уровне вся материя кажется корпускулярной и подчиняющейся законам старой доброй классической физики.

Наконец, необходимо уточнить, что наблюдатель сам является частью окружающей среды и провоцирует декогеренцию: на самом деле, когда мы видим молекулярное скопление, это значит, что существует электромагнитное взаимодействие между зарядами этих молекул и теми, что находятся в глубине наших глаз. Таким образом, даже если это скопление находится в полном вакууме, остается взаимодействие с нашей собственной сенсорной системой. Это объясняет главное утверждение квантовой физики: простой факт наблюдения за частицей уничтожает волну и превращает ее в корпускулу. Теория декогеренции тем не менее указывает, что это наблюдение не является необходимым для уничтожения волны: инертная окружающая среда дает тот же эффект даже без наблюдателя и датчика.

Поэтому необязательно размышлять, обладает сознанием кот Шрёдингера или нет: речь идет о гигантском скоплении молекул, и любая радиоактивная частица, которая ее достигает, переходит от волны к корпускуле за долю секунды. Согласно теории декогеренции, кот всегда жив ИЛИ мертв, независимо от того, откроем мы коробку или нет, просто из-за своего макроскопического масштаба.

Эта теория также отличается от «традиционной» квантовой физики начала XX в. в том смысле, что она предсказывает постепенное, а не мгновенное разрушение волн. Однако это предсказание можно проверить, протестировав волновую природу частиц на очень коротком отрезке времени. Первые измерения были проделаны в 1996 г. Экспериментальное подтверждение вкупе с элегантностью теории (больше никаких мыслей о таинственном вмешательстве во время измерения!) объясняет одобрение большинства физиков. Следует, однако, отметить, что теория не объясняет второй великой тайны, связанной с измерением: почему частица-волна концентрируется в частицу-корпускулу в одном месте, а не в другом? Даже сегодня этот «выбор» выглядит абсолютно произвольным.

5. Туннельный эффект

Волновая природа материи позволяет ей преодолевать барьеры, непреодолимые с точки зрения классической физики. Чтобы это понять, возьмем пример с изолированным электроном, посланным в определенном направлении. Предположим, что он приближается к двум отрицательным зарядам, расположенным по обе стороны его пути (→ **рис. 23.7.а**): приближаясь, он испытывает электростатическое отталкивание, которое его тормозит.

Классическая точка зрения

С точки зрения классической физики, где электрон является простой частицей, существует два разных возможных случая:

- Первый случай: электрон обладает достаточно высокой скоростью, чтобы достичь уровня двух зарядов, несмотря на торможение. Как только этот уровень пройден, ускорение возникает снова, поскольку два заряда оказываются позади. Так, если электрон обладает энергией выше определенного значения, он может преодолеть «барьер», созданный двумя зарядами.

- Второй случай: скорость электрона низка, он тормозит, а затем останавливается, не достигнув двух зарядов. Из-за электростатического отталкивания он устремляется в противоположную сторону. Таким образом, обладая энергией, значение которой ниже определенного уровня, электрон не может преодолеть барьер, и происходит «отражение».

Результат двойственный: в зависимости от силы энергии электрон либо преодолевает барьер, либо «отскакивает».

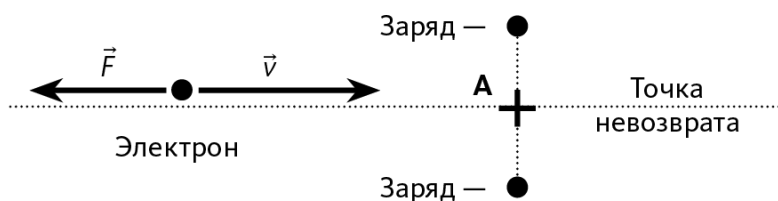
Точка зрения квантовой физики

Рассмотрим теперь точку зрения квантовой физики, которая отражает реальность. Электрон является волной. Он был послан в конкретном направлении, что означает, что волна не рассеивается по всему пространству, а остается узконаправленной. На **рис. 23.7.b** мы представили электрон в виде перемещающегося облака. Теперь мы можем повторить предыдущие рассуждения, но с облаком вместо точечной частицы. Центр облака соответствует максимуму вероятности присутствия частицы: именно здесь находилась бы частица с точки зрения классической физики.

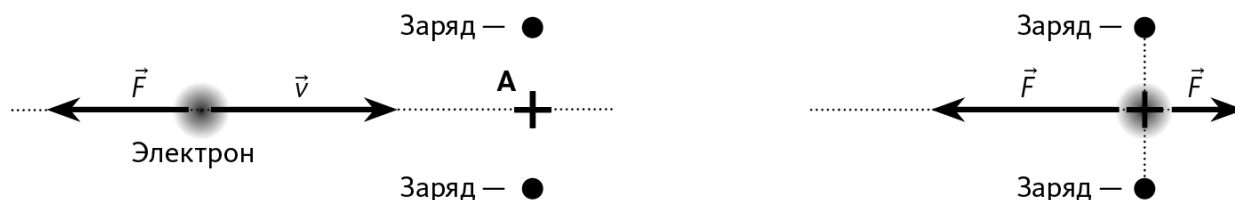
Электрон в качестве облака также претерпевает электростатическое отталкивание двух отрицательных зарядов. Предположим, что электрон обладает энергией, которой не хватает для преодоления барьера, то есть он останавливается как раз перед тем, как пройти мимо двух отрицательных зарядов.

Но электрон это волна, то есть небольшая часть волны оказывается по ту сторону барьера (→ **рис. 23.7.b**). Эта часть волны ускоряется вправо, в то время как остаток волны ускоряется влево и является, таким образом, отраженным.

Таким образом, электрон разделился надвое: основная часть волны отскочила от барьера, но другая его пересекла и продолжила путь с другой стороны. То есть *электрон находится сразу по одну и по другую сторону барьера*. Пока мы не стремимся его обнаружить, электрон является волной, поделенной на две разные части: каждая часть распространяется в противоположном направлении, а между ними барьер. Энергия электрона сохранилась, но разделилась на две части волны.



(a) Классическая точка зрения



(b) Точка зрения квантовой физики

Рис. 23.7 – Туннельный эффект

(a) – мы рассматриваем электрон как точечную частицу. Если его скорость слишком мала, чтобы достичь точки A, электростатическое отталкивание заставит его двигаться влево: барьер не будет пройден.

(b) – мы рассматриваем электрон таким, каким он является на самом деле, то есть волной. На схеме справа электрон тормозит под действием отрицательного заряда и останавливается, не достигнув точки A. Мы видим, что часть волны находится с другой стороны от точки A, а значит, ускоряется вправо: волна разделилась на две части, которые получили ускорение в противоположных направлениях.

Если мы попытаемся обнаружить электрон, у нас есть небольшой шанс найти его справа от барьера, хотя с точки зрения классической физики ему и не хватило энергии, чтобы его пересечь.

А теперь попытаемся обнаружить электрон, чтобы узнать, где он находится. Волна представляет собой вероятность присутствия электрона, то есть у нас большой шанс обнаружить электрон слева от барьера, перемещающимся влево. Но у нас также есть небольшой шанс найти его справа от барьера, продолжаящим свой путь вправо. Как только мы его обнаружим, волна полностью исчезнет, и вся энергия сконцентрируется в той точке, где мы обнаружили электрон.

Электрон обнаружен, и мы разбили первоначальную волну: новая волна начинает формироваться там, где мы обнаружили электрон, – и до следующего обнаружения. Таким образом, если электрон был обнаружен справа от барьера, он всегда останется с этой стороны, даже если будет обнаружен снова 10 секунд спустя. Электрону удалось полностью преодолеть барьер, хотя у него не было для этого достаточной энергии с точки зрения классической физики.

Последствия туннельного эффекта

Такое преодоление непреодолимого барьера в классической физике называется «туннельным эффектом». Он подчеркивает всю необычность микромира. Здесь также возможны два разных взгляда на событие:

- или мы считаем, что электрон распределился по обе стороны барьера до тех пор, пока его не обнаружат, и он мгновенно сконцентрируется с одной или с другой стороны;
- или мы считаем, что волна-носитель находится с обеих сторон, но электрон, как частица, находится по одну или по другую сторону барьера.

Необходимо, однако, отметить, что отталкивание отрицательных зарядов испытывает вся волна целиком. Часть волны, расположенная слева от барьера, испытывает отталкивание влево,

тогда как часть, расположенная справа, ускоряется вправо. Это демонстрирует, что заряд электрона распределен по всей волне.

Первая точка зрения, где электрон является облаком до того, как становится точечной частицей, когда его обнаруживают, кажется, таким образом, более обоснованной. Однако из этого следуют уже упомянутые странности.

Предположим, к примеру, что мы ждали несколько лет, прежде чем попытаться обнаружить электрон в предыдущем опыте. Электрон, по-прежнему распределенный в двух частях волны, удалился на большое расстояние: левая часть волны преодолела миллиарды километров влево, правая часть – миллиарды километров вправо. То есть *электрон находится сразу в двух местах*, между которыми пустота.

Теперь предположим, что мы пытаемся его обнаружить. Если просто обнаружить электрон в определенном месте, то вторая половина волны, расположенная за миллиарды километров, исчезнет тоже! Как эта часть волны узнает о том, что кто-то пытался обнаружить электрон на расстоянии миллиардов километров? Дистанция, которая разделяет две части волны, выглядит совершенно неважной при трансформации электрона в точечную частицу.

6. Неопределенность и индетерминизм

Классическая точка зрения

В классической физике формула $m\vec{a} = \vec{F}$; управляет всей эволюцией Вселенной, где $\vec{F}$ является суммой двух фундаментальных сил. Благодаря ей знание местоположения и скорости всех частиц Вселенной позволяет предсказать будущее с полной уверенностью: и действительно, это позволяет знать силу, приложенную к каждой частице, и из этого вывести их ускорение. Это позволяет вычислить новую скорость и местоположение в следующий момент и так далее. Таким образом, возможность точно знать местоположение и скорость лежат в основе детерминизма классической физики.

Как измерить две эти величины? В дальнейшем мы возьмем пример изолированной частицы, которая перемещается в пространстве с определенной скоростью. Сначала мы будем придерживаться точки зрения классической физики.

Измерение местоположения делается очень просто: достаточно использовать линейку... Измерение скорости дело более сложное: где скорость, там и движение, а где движение, там изменение времени. Таким образом, немедленно измерить скорость не получится: надо измерить изменение местоположения за два последовательных мгновения.

Если у нас достаточно точные измерительные приборы, можно выбрать два последовательных момента, настолько близких, насколько мы захотим. Так мы сможем узнать скорость частицы, с которой она преодолевает настолько малое расстояние, насколько мы этого хотим.

В конце концов, можно сразу узнать местоположение и скорость частицы с такой точностью, какой мы хотим (только неточность измерительных приборов может быть причиной неуверенности в измерениях).

Точка зрения квантовой физики

Посмотрим теперь на точку зрения квантовой физики, то есть на реальные вещи. Частица, которая перемещается, на этот раз является облаком, которое сконцентрируется в одной точке, как только мы попытаемся определить ее местоположение. Скорость частицы соответствует скорости облака.

Предположим, что облако имеет приблизительный диаметр 1 нанометр, а скорость – 1 нанометр в секунду (это та скорость, которую мы пытаемся измерить). Чтобы измерить скорость, можно произвести измерения в двух местах за два последовательных момента.

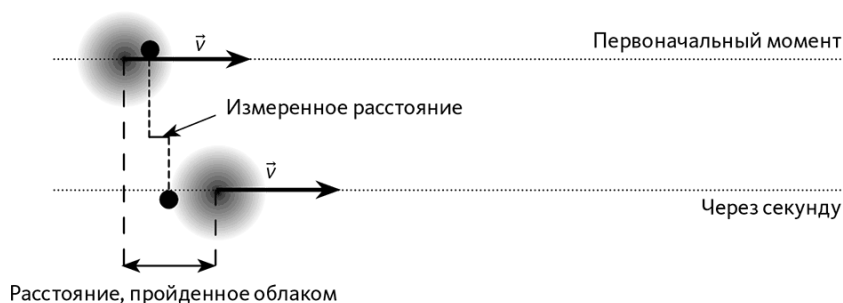
Рис. 23.8.a дает пример двух измерений с интервалом в секунду: каждый раз электрон найден в произвольном месте облака. Предположим, что во время первого измерения электрон находится в передней части облака, а во время второго – в задней: за одну секунду он преодолел

как будто очень маленькую дистанцию. Скорость, измеренная таким способом, абсолютно не согласуется с реальной скоростью облака.

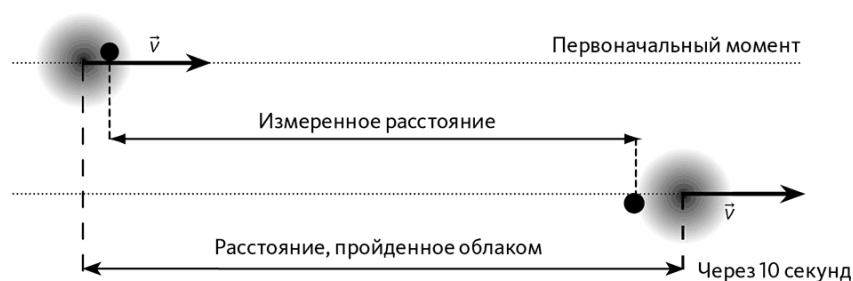
Как снизить неопределенность измерения, чтобы получить скорость, наиболее близкую к реальной? Просто увеличив временной интервал между двумя измерениями: **рис. 23.8.b** показывает два измерения за 10 секунд интервала. За это время облако прошло большое расстояние. Таким образом, местоположение электрона в облаке на момент обнаружения мало влияет на измерение пройденной дистанции. Из этого можно с большой точностью вывести скорость облака.

Проблема в том, что это дает лишь среднюю скорость в *определенном интервале позиций*. Это не дает абсолютно никакой информации о скорости частицы в определенном месте.

В конце концов, у нас есть выбор. Или мы определяем скорость на коротком интервале, то есть получаем точную информацию о местоположении, но в этом случае неопределенность скорости получается огромной ($\rightarrow$ **рис. 23.8.a**). Или мы с большой точностью измеряем скорость, и в этом случае интервал позиций должен быть очень большим, тогда сильно возрастает неопределенность местоположения ($\rightarrow$ **рис. 23.8.b**). *Не существует способа измерить сразу скорость и местоположение с высокой точностью.* Увеличение точности одной величины автоматически снижает точность другой.



(a) Измерение скорости за короткий промежуток времени



(b) Измерение скорости за длинный промежуток времени

Рис. 23.8 – Неопределенность скорости и местоположения

Электрон перемещается слева направо. Черная точка представляет собой обнаружение электрона в определенный момент.

(a) – ошибка, допущенная в измерении скорости, значительная, потому что измерения производились на небольшой пройденной дистанции.

(b) – измерение скорости произошло с гораздо меньшей степенью неопределенности благодаря большему интервалу времени. В то же время мы получаем лишь среднюю скорость между двумя интервалами: у нас уже нет информации о скорости в определенном месте. Таким образом, неопределенность местоположения увеличивается, если мы пытаемся снизить неопределенность скорости.

Вернер Гейзенберг вывел уравнение, объединяющее две неопределенности: если Δx представляет собой неопределенность местоположения, а Δv неопределенность скорости, мы получаем $m\Delta v \cdot \Delta x \geq h/4\pi$ (для низких скоростей относительно скорости света).

Мы видим, что неопределенностью измерения скорости и местоположения управляет постоянная Планка. Это не должно удивлять: вспомним, что именно она определяет длину волны $\lambda = h/mv$, а значит, и размер облака. Чем больше облако, тем больше неопределенность.

Влияние на детерминизм

Можно подумать, что эта неопределенность связана с невозможностью сделать измерение и у частицы есть точные местоположение и скорость, даже если они неизмеряемы. На самом деле необходимо понять, что *само понятие пары местоположение – скорость для частицы не имеет никакого смысла*. Если рассматривать частицу как волну, ее точное местоположение определить невозможно, поскольку она рассеяна в пространстве. Если рассматривать частицу как точечную корпускулу, невозможно определить ее скорость, поскольку это точечное расположение имеет смысл только во время мгновенного обнаружения (когда проходит время, частица вновь становится волной).

В итоге мы только что по-другому заговорили об индетерминизме законов природы: неопределенность местоположения и скорости вызвано не неточностью измерительных приборов, она присуща фундаментальным законам квантовой физики. Само понятие пары местоположение – скорость, которое имело бы определенное значение, не имеет смысла. Сегодняшнее состояние Вселенной неопределимо по своей сути, ее будущее непредсказуемо.



НЕРАВЕНСТВО ВРЕМЯ – ЭНЕРГИЯ

Неравенство, обнаруженное между неопределенностью в скорости и местоположении, включает в себе еще одно. Разница местоположений Δx напрямую связана с интервалом времени Δt . Кроме того, скорость частицы напрямую связана с ее энергией, то есть неопределенность скорости Δv связана с неопределенностью энергии ΔE . Из этого можно вывести следующее неравенство $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$.

По сути, невозможно измерить энергию частицы в определенный момент времени. Само понятие пары время – энергия, обладающей определенным значением, не имеет никакого смысла.

Квантовый вакуум

Принцип неопределенности Гейзенберга придает одно замечательное свойство самому вакууму.

Представим детектор частиц, чья разрешающая способность энергомасс-анализатора по энергии составляет 10 МэВ (МэВ – единица энергии, адаптированная для уровня частиц). Это значит, что этот детектор может выдавать значения, кратные 10 МэВ (10 МэВ, 20 МэВ, 30 МэВ... но не 15 МэВ). В частности, с таким детектором невозможно обнаружить электрон, обладающий только 1 МэВ, – детектор показал бы просто «0».

Чтобы обнаружить электрон, необходима бóльшая разрешающая способность, то есть меньшая неопределенность по энергии: неравенство Гейзенберга $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$ показывает, что для такого измерения нужен больший промежуток времени. Если точнее, необходимо, чтобы $\Delta t > h/4\pi\Delta E$. Предположим, что продолжительность жизни электрона

меньше этого срока: становится невозможно обнаружить его, какой бы датчик ни использовался. Таким образом, электрон невидим, и все происходит так, как будто его не существует: пространство кажется пустым.

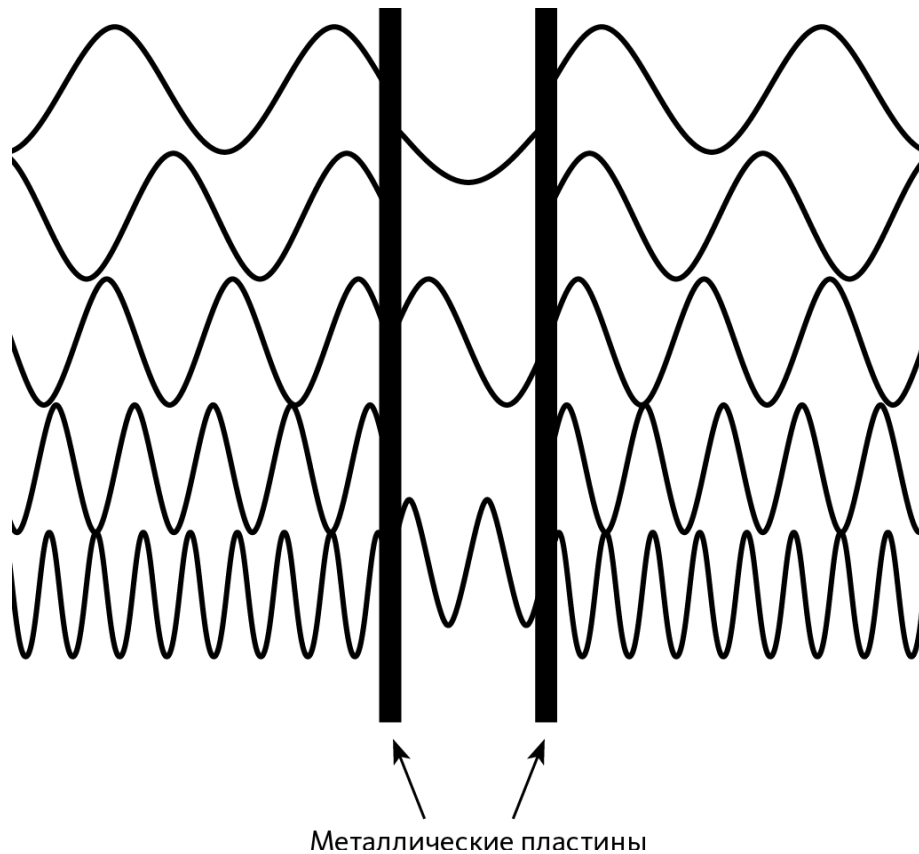


Рис. 23.9 – Селекция волн в полости

Мы представили виртуальные частицы снаружи и внутри полости в виде волн. Внутри могут существовать только волны, длина которых кратна двойной длине полости ($\lambda = 2a/n$): следовательно, виртуальных частиц гораздо больше снаружи, чем внутри, что повышает давление.

Этот факт затрагивает важный вопрос. Предположим, что мы создали абсолютный вакуум в некоей камере, убрав любые частицы (в том числе материю и свет). Действительно ли камера пуста или в ней есть частицы, которые невозможно обнаружить? Второе предположение согласуется с квантовой физикой: всегда существует вероятность присутствия частиц с малой продолжительностью жизни. Чем короче их существование, тем большей энергией они могут обладать, ускользая от детектора. Таким образом, не исключено, что даже абсолютный вакуум кишит неустойчивыми частицами, которые называют виртуальными.

Как проверить эту гипотезу? Мы могли бы сказать, что это невозможно, потому что эти виртуальные частицы невозможно обнаружить по определению. Но как часто бывает в физике, нет нужды обнаруживать их напрямую, чтобы констатировать их присутствие: их существование вызывает явления, которые могут быть измерены.

Наиболее впечатляющим из этих явлений является эффект Казимира. Возьмем две металлические пластины, параллельные друг другу и помещенные в абсолютный вакуум на очень маленьком расстоянии друг от друга. Представим, что на самом деле вакуум полон виртуальных частиц, которые распространяются в виде волн. Когда эти волны достигают металлической поверхности, они отражаются, «отскакивают» и летят в противоположную сторону. Как любая другая частица, они толкают металлические пластинки во время отскока, то есть на пластины оказывается определенное давление.

Поскольку виртуальные частицы представлены как внутри, так и снаружи, мы могли бы из этого заключить, что силы компенсируют друг друга. Но не следует забывать, что две пластины образуют полость, внутри которой могут существовать только волны определенной длины. Таким образом, внутри полости может существовать гораздо меньше волн, чем снаружи. Следует ожидать, что столкновения частиц с пластинами будут более многочисленны с внешней

стороны, чем с внутренней. Следовательно, пластины должны приближаться друг к другу под действием этих ударов: пластины подвержены воздействию некой силы, даже когда помещены в абсолютный вакуум! В каком-то смысле абсолютный вакуум «еще более пуст» в пространстве между пластинами, чем за ними, что и провоцирует такое «притяжение». Более того, чем меньше расстояние между пластинами, тем меньше виртуальных частиц может там находиться, тем больше сила, приложенная к пластинам.

Эффект Казимира был предсказан физиком Хендриком Казимиром в 1948 г., а первое экспериментальное подтверждение получил в 1978 г. Этот опыт позволил подтвердить, что вакуум, который выглядит «абсолютно пустым», наполнен неопределяемыми частицами с очень кратким сроком существования.



ОГРОМНОЕ ВЛИЯНИЕ МАЛЮСЕНЬКИХ ЧАСТИЦ

Помимо эффекта Казимира существование этих частиц подтверждается и другими феноменами, которые мы рассмотрим в этой книге позднее. Скажем о двух из них.

Во Вселенной космический вакуум полон виртуальных частиц. Из-за их столкновения вся эта масса образует как бы газ под давлением, который стремится расшириться. Сам вакуум также должен быть подвержен чему-то вроде «отталкивающей силы», которая стремится расширить Вселенную. Между тем мы действительно обнаруживаем «отталкивающую силу вакуума», названную темной энергией, которая ускоряет расширение Вселенной (глава 27). На самом деле вычисления показывают, что виртуальные частицы далеко не способны объяснить наблюдаемое расширение; однако мы видим, что явления на микроскопическом уровне могут иметь реальные последствия в масштабе Вселенной.

Второе влияние, еще более важное, состоит в проявлении фундаментальных сил. Мы видели, что гравитация и электростатическая сила уменьшаются пропорционально квадрату расстояния в связи с тем, что пространство является трехмерным (глава 2). Однако с двумя другими фундаментальными силами все обстоит не так. Причина этого в том, что эти две силы действуют между очень близкими друг к другу частицами. Например, сильное взаимодействие происходит даже внутри протонов (глава 28). На таких микроскопических расстояниях «квантовая смесь», состоящая из виртуальных частиц, оказывает решающее влияние на взаимодействие, которое действует на «классический» распад, связанный с тремя измерениями пространства.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Частица материи ведет себя как волна, пока ее не обнаружат. Тогда она концентрируется в одной точке с вероятностью, которую определяет волна.
- Длина волны частицы нерелятивистской материи связана с постоянной Планка через выражение $\lambda = h/mv$ (где m – масса частицы, а v – ее скорость). Это, в частности, объясняет малый размер ядра атома относительно размера окружающих его электронов.
- Уравнение Шрёдингера заменяет второй закон Ньютона фундаментальным законом физики, который позволяет не только определить движение волн-частиц, но и их форму. В нашем масштабе волны выглядят точками, и тогда уравнение Шрёдингера отождествляется с вторым законом Ньютона.
- Из-за электростатической замкнутости ядра электрон, будучи волной, может принимать в атоме лишь строго определенные формы, называемые атомными орбиталями. Каждая форма соответствует определенной энергии.
- Когда электрон атома переходит к орбитали более низкой энергии, излучается фотон, выравнивающий разницу энергий. Таким образом, происходит излучение только волн определенной длины, что образует спектр излучения, состоящий из световых полос.
- Фотон поглощается атомом, если обладает достаточной энергией для того, чтобы отправить электрон на более энергетически высокую орбиталь. То есть поглощаются только волны определенной длины, что образует спектр поглощения, состоящий из темных полос.

- Благодаря своей волновой природе частица может преодолеть зону отталкивания, даже если она не обладает достаточной энергией с точки зрения классической физики. Это называется туннельным эффектом.

- Невозможно знать с большой точностью одновременно скорость частицы и ее местоположение: любое точное измерение одной из двух величин обязательно влечет за собой неопределенность другой величины. Эта неопределенность объясняет отсутствие детерминизма в законах Вселенной.

- Квантовая неопределенность позволяет вакууму быть заселенным частицами, не поддающимися обнаружению, которые называют «виртуальными частицами» и срок существования которых очень краток. Существование таких частиц, в свою очередь, приводит к явлениям, которые возможно измерить, например эффект Казимира.

24. Химические реакции

Волновая природа электронов в атоме и молекуле дает ключ к пониманию научной области, долго остававшейся во власти знахарей и шарлатанов, – химии. Квантовая физика позволяет понять свойства различных элементов (водорода, углерода, азота, кислорода...), общий обзор которых дает периодическая система. Таким образом, мы сможем объяснить, почему образуются молекулы, и подробно рассмотрим исключительные физико-химические свойства молекулы воды. Мы поговорим о тепловых аспектах химии: например, о том, почему температура человеческого тела составляет 37 °C и как потребленная пища позволяет поддерживать эту температуру. Мы также узнаем, что такое огонь, как он возникает и как сохраняется. Наконец, мы определим, что такое окислитель и восстановитель, их роль в батарейках, а также что такое щелочь и кислота.

1. Электронная структура атомов

Занятие атомных орбиталей

Необходимость классификации атомов

Химические реакции состоят в разъединении атомов молекул и объединении их в новые молекулы, при этом меняются свойства веществ, участвующих в реакции. Чтобы лучше понять, почему и как происходит химическая реакция, необходимо подробно рассмотреть электроны атомов, потому что именно они взаимодействуют между собой и меняют структуры молекул.

Количество электронов, которое содержит каждый атом, очень важно. Чтобы в этом разобраться, необходимо расположить атомы по возрастанию количества электронов. Для нейтрального атома это означает также количество протонов в ядре (равное количество положительных и отрицательных зарядов), что называется атомным числом.

Если расставить элементы по возрастанию атомного числа, первым будет водород (один протон, один электрон), затем гелий (два протона) и так далее до урана (92 протона). Можно создавать атомы с числом протонов больше, чем у урана, но они не устойчивы, и в природе их не существует.

Затем необходимо рассмотреть формы облаков электронов внутри атома, которые также будут управлять химическими реакциями. Уравнение Шрёдингера позволяет узнать форму волн. На **рис. 24.1** мы изобразили разные возможные геометрические формы. Они обозначены буквами s, p, d (еще бывает f, но здесь мы ее не показываем). Через мгновение мы вернемся к этим буквам.

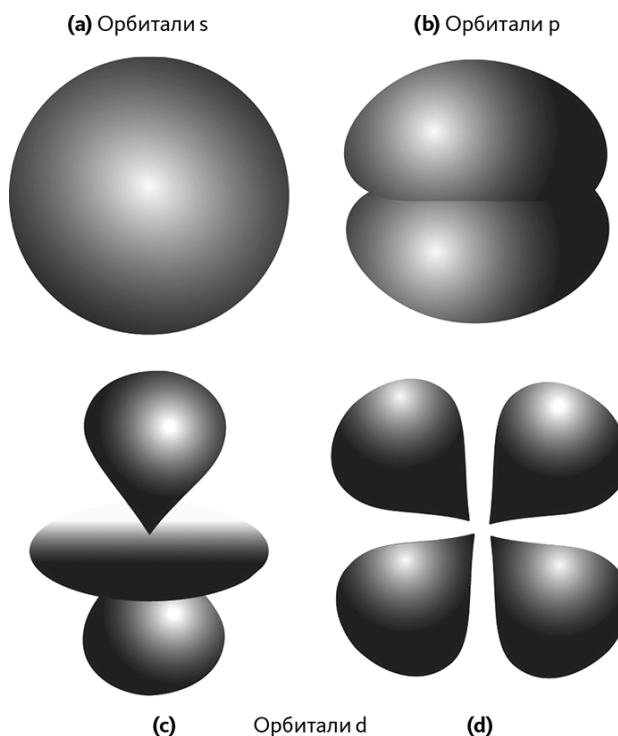


Рис. 24.1 – Формы различных орбиталей

Отметим, что буква d обозначает много очень разных орбиталей. Они собраны под одной буквой, потому что формам (c) соответствуют формы (d) одинаковой энергии.

Распределение электронов в орбиталях

Наконец, среди всех возможных орбиталей необходимо знать, какие из них выбирают электроны. Вот несколько простых правил:

- В изолированном атоме электрон всегда стремится выбрать свободную атомную орбиталь меньшей энергии. На самом деле в изолированном атоме электрон не может приобрести энергию (она должна поступить извне), но всегда может ее потерять (излучив фотон). В итоге он может лишь спуститься на более слабую орбиталь. И только достигнув этой орбитали, он укрепляется: спуститься еще ниже он уже не может и перестает эмитировать излучения.

- Кроме того, два электрона не могут накладываться друг на друга (принцип исключения Паули). Другими словами, они не могут занимать одну и ту же атомную орбиталь. Таким образом, два разных электрона занимают две различные атомные орбитали. Электрон в первую очередь стремится к энергетически более слабой орбитали, но если она уже занята, он вынужден идти к более сильной.

Энергия орбиталей

Итак, теперь мы знаем, как распределяются электроны в атоме в зависимости от орбиталей. Уравнение Шрёдингера дает нам прекрасные пояснения относительно энергии орбиталей:

- Две орбитали расположены очень близко к ядру и относятся к типу s (**→ рис. 24.1**): именно они обладают самой слабой энергией. То есть электроны в первую очередь стремятся к ним. Например, в атоме гелия два единственных электрона выбирают именно эти две орбитали. Они обозначены числом $n = 1$ (так обозначается энергетический уровень $n = 1$). Орбитали называют «1s», чтобы сразу обозначить уровень и тип орбитали.

- Следующая орбиталь значительно дальше от ядра, ее энергия гораздо выше. В этой зоне находятся 8 орбиталей с похожей энергией: 2 орбитали типа s и 6 типа p. У шести орбиталей типа p одинаковая энергия: по этой причине они объединены под одной буквой.

• Все эти орбитали обозначаются $n = 2$, то есть здесь мы различаем орбитали типа 2s и 2p. Например, неон, у которого 10 электронов, имеет 2 электрона на орбиталях $n = 1$ и 8 других дальше от ядра на орбиталях $n = 2$.

• Еще дальше от ядра сосредоточены 18 других орбиталей похожей энергии, обозначенные $n=3$. Среди них 2 типа s, 6 типа p и 10 типа d. Эти десять орбиталей типа d имеют одинаковую энергию, поэтому их обозначили одной буквой, несмотря на их различные формы (→ рис. 24.1). Уточним, что энергия орбиталей 3d значительно выше энергии орбиталей 3s и 3p, то есть здесь наблюдается значительный энергетический скачок между 8 орбиталями 3s и 3p, с одной стороны, и 10 орбиталями 3d, с другой стороны.

• Наконец, еще дальше от ядра находятся 32 другие орбитали с похожей энергией, обозначенные числом $n = 4$, типов s, p, d и f. Мы резюмируем описание разных возможных орбиталей в рамке ниже.

Валентные электроны

В химических реакциях участвуют самые легковозбудимые электроны: эти электроны наиболее удалены от ядра и меньше с ним связаны. Их называют валентными электронами: они принадлежат к наиболее удаленным от ядра орбиталям, то есть тем, у которых самое высокое число n .

Приведем несколько примеров. У углерода 6 электронов: 2 на орбиталях $n = 1$ и 4 на орбиталях $n = 2$. То есть углерод имеет 4 валентных электрона.

У кремния 14 электронов: 2 на уровне $n = 1$, 8 на $n = 2$ и 4 на $n = 3$. Таким образом, у кремния 4 валентных электрона, как и у углерода. Значит, он должен обладать похожими с углеродом химическими свойствами: именно это подтверждают опыты.



РАЗНЫЕ ОРБИТАЛИ

Начиная с орбиталей наиболее близких к ядру, мы видим:

Уровень n	Тип орбитали	Число орбиталей	
1	s	2	2 орбитали $n = 1$
2	s	2	8 орбиталей $n = 2$
	p	6	
3	s	2	18 орбиталей $n = 3$
	p	6	
	d	10	
4	s	2	32 орбитали $n = 4$
	p	6	
	d	10	
	f	14	

Отметим, что вышеуказанные орбитали не классифицированы в точном энергетическом порядке, – например, энергия орбиталей 3d выше, чем энергия орбиталей 4s.

Рис. 24.2 – Периодическая система элементов

Отметим, что начиная с шестого ряда появляется орбиталь типа f: здесь понадобились бы 32 группы, а это было бы очень много. Поэтому 15 элементов вынесены под таблицу в строку «лантаноиды». То же самое в седьмом ряду (строка под таблицей «актиноиды»).

Чтение периодической таблицы

По этой таблице можно легко узнать количество валентных электронов. Например, у углерода 4 валентных электрона, и мы видим его в четвертой группе (**→ рис. 24.2**). Кремний расположен сразу под ним, и сразу понятно, что у него такое же количество электронов. Два элемента одной группы гомологичны: у них похожие химические свойства, потому что они имеют одинаковое число валентных электронов на одних типах орбиталей.

В первой группе расположены щелочные элементы, во второй щелочно-земельные металлы, в предпоследней галогены, и в последней инертные газы. Ряды также объединяются в «периоды», поскольку химические свойства элементов в каждом новом ряду периодически повторяются.

2. Свойства атомов

Экранирующий эффект

Принцип

Электроны в атоме не только испытывают на себе влияние ядра, но влияют друг на друга.

Для примера возьмем литий Li, который содержит 3 электрона: два на уровне $n = 1$ и 1 на уровне $n = 2$, который является единственным валентным электроном (**→ рис. 24.3.a**). Рассмотрим этот последний электрон: он находится значительно дальше от ядра, чем 2 других. То есть он видит положительно заряженное ядро, вокруг которого находятся 2 отрицательно заряженных облака (2 электрона $n = 1$). Эти 2 электрона создают экранирующий эффект: заряд ядра, который чувствует валентный электрон, очень слаб, потому что его отчасти компенсируют заряды двух других электронов.

Это значит, что валентный электрон лития менее связан с ядром: он может легко покинуть атом. В самом деле, опыты показывают, что литий легко становится ионом Li^+ (из-за потери валентного электрона).

Теперь возьмем пример фтора F, который содержит 9 электронов: 2 на уровне $n = 1$ и 7 на уровне $n = 2$ (**→ рис. 24.3.b**). Мы видим, что ему не хватает одного электрона, чтобы заполнить уровень $n = 2$ (в котором 8 орбиталей).

Рассмотрим точку зрения одного валентного электрона: он видит только 2 электрона, расположенные близко к ядру. 6 других электронов, расположенных на уровне $n = 2$, едва экранируют ядро.

В ядре содержится 9 протонов, и его экранируют только 2 электрона: таким образом, положительный заряд, который чувствует валентный электрон, довольно сильный. То есть валентный электрон сильно притягивается к ядру и не стремится покинуть атом: образование иона F^+ невозможно.

С другой стороны, представим, что мимо пролетает дополнительный электрон: высокий заряд ядра притягивает его к атому, пока он не оседет на орбитали уровня $n = 2$. Таким образом, мы легко получаем ион F^- .

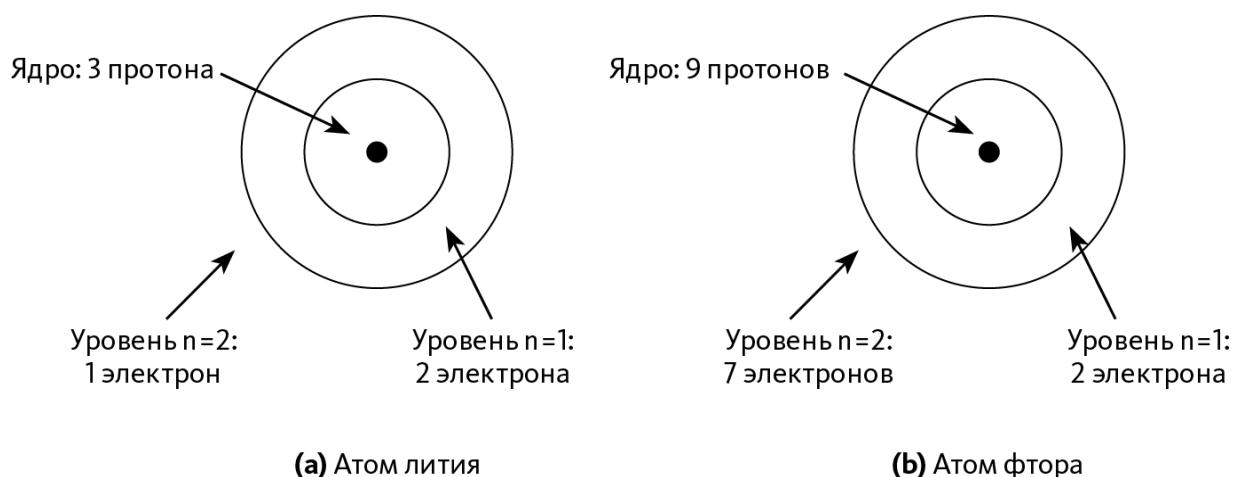


Рис. 24.3 – Атомы лития и фтора

Чтобы было понятнее, мы представили орбитали в форме орбит, а не облаков: на этой схеме каждый уровень n представлен орбитой, расположенной на некотором расстоянии от ядра, и содержит несколько орбиталей. Валентные электроны принадлежат уровню $n = 2$. Экранирование ядра у лития и фтора похоже, потому что в том и другом случае связано с двумя электронами $n = 1$. Зато заряд ядра фтора гораздо больше, чем у лития: валентные электроны сильнее привязаны к атому, чем в литии.

Таким образом, литий легко теряет валентный электрон, а фтор легко принимает лишний электрон из-за притяжения ядра.

Обобщение

Посмотрим на периодическую систему ($\rightarrow$ рис. 24.2): литий находится слева и стремится потерять один электрон. Фтор расположен справа и стремится приобрести электрон. На самом деле из-за экранирующего эффекта все атомы, расположенные в таблице слева, имеют тенденцию терять электроны, все атомы справа имеют тенденцию приобретать электроны (или притягивать их к себе).

Пойдем немного дальше: литий, теряя электрон, остается всего с двумя электронами, как и гелий (инертный газ в последней группе). Фтор приобретает электрон, и их становится 10, как у неона (также инертный газ из последней группы). Все элементы стремятся окружить себя таким количеством электронов, как у ближайшего инертного газа. При таком расположении экранирующий эффект больше не способствует ни притягиванию новых электронов, ни их отталкиванию.

Устойчивость инертных газов

Чтобы в этом убедиться, возьмем для примера неон, инертный газ, имеющий 2 электрона на уровне $n=1$ и 8 на уровне $n=2$. Таким образом, у него 8 валентных электронов ($\rightarrow$ рис. 24.4). С точки зрения валентного электрона только 2 других электрона сильно экранируют ядро, как и у всех элементов этого периодического ряда. Но у ядра есть 10 протонов, то есть оно обладает сильным положительным зарядом. Во всем ряду это самый сильный заряд, и неон никак не может потерять электрон благодаря сильному притяжению ядра.

Представим, что мы, наоборот, стремимся добавить ему электрон. Для нового электрона нет места на уровне $n = 2$, значит, ему придется перейти на уровень $n=3$. Это значит, что перед ним будет 10 электронов, расположенных ближе к ядру и дающих экранирующий эффект, то есть вновь прибывший электрон почти не почувствует заряда ядра. Дополнительный электрон не способен оставаться в атоме из-за недостатка притягивающей силы: таким образом, неон не имеет тенденции приобретать лишний электрон.

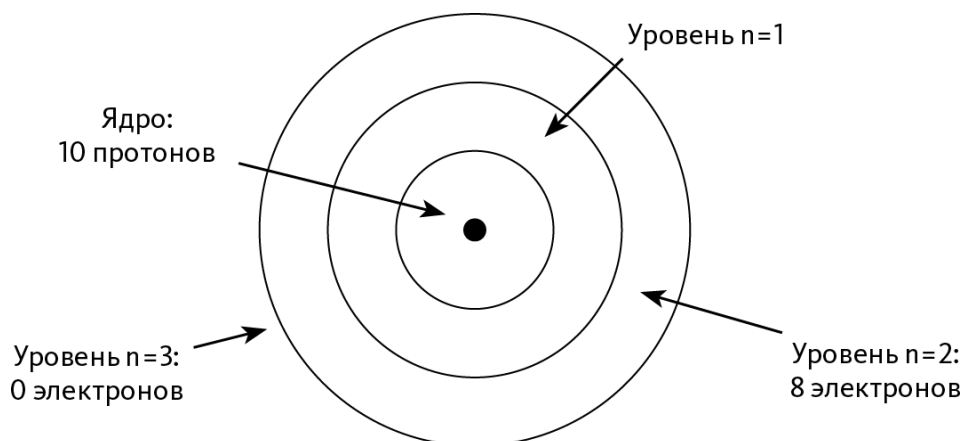


Рис. 24.4 – Атом неона

Валентные электроны принадлежат уровню $n = 2$: их 8. Только 2 электрона находятся близко к ядру и экранируют. Таким образом, положительный заряд довольно силен, что крепко привязывает электроны к атому.

Потенциальный дополнительный электрон пришел на уровень $n = 3$: под ним оказались бы 10 электронов, которые полностью загородили бы от него ядро. Этот дополнительный электрон не смог бы удержаться из-за недостатка притягивающей силы.

В итоге неон не может ни легко терять, ни приобретать электроны.

В итоге, как всем инертным газам, «неону хорошо таким, какой он есть», у него нет стремления приобретать или терять электроны. Такой же структуры, как у инертных газов, стремятся достичь все другие периодические элементы.

Мимоходом заметим, что инертные газы, будучи чрезвычайно устойчивыми, не имеют тенденции вступать в химические реакции: благодаря этой инертности их очень трудно обнаружить. Именно поэтому они также имеют название «редкие газы»: они кажутся редкими, потому что очень незаметны, однако их в природе отнюдь не меньше, чем других элементов. Например, аргон является третьей по величине составляющей воздуха после азота и двухатомного кислорода.

Правило октета

Ознакомление

Посмотрим на инертные газы в периодической системе (→ рис. 24.2): неон и аргон имеют по 8 валентных электронов, потому что расположены в восьмой группе. Все элементы, имеющие соседнее атомное число, стремятся окружить себя восемью электронами: это правило октета.

Однако некоторые из них являются элементами, наиболее часто встречающимися во Вселенной, и именно они наиболее часто вступают в химические реакции. Речь идет об углероде, азоте, кислороде, а также фторе, натрии, магнии, алюминии, кремнии, фосфоре, сере, хлоре, калии и кальции. Таким образом, правило октета играет важную роль в химии.

Что касается гелия, у него 2 валентных электрона. Единственный распространенный элемент, близкий к гелию, – это водород, который стремится окружить себя двумя электронами, – это правило дуэта.

Тяжелые элементы

Для более тяжелых элементов системы (начиная со скандия, чей атомный номер 21) понятие валентного электрона уже не так уместно, потому что все верхние орбитали имеют очень близкую друг другу энергию, поэтому разница между электронами внутренними

и периферическими более искусственна. Никакое правило, подобное правилу октета, здесь не действует.

Зато все эти элементы, имея много протонов и электронов, являются объемными: электроны заполняют орбитали даже на большом расстоянии от ядра. Следовательно, эти электроны легко оторвать, поскольку электростатическое притяжение ослаблено из-за большого расстояния до ядра. Таким образом, элементы, расположенные в нижней части таблицы, имеют тенденцию легче терять электроны, чем те элементы, что расположены выше. То есть многие из них образуют положительно заряженные ионы.

В частности, элементы, занимающие 10 групп, расположенных в центре таблицы, называются переходными металлами. Обнаружено, что многие среди них довольно легко теряют 2 электрона: так, часто встречаются ионы Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} ... Это легко понять, если взглянуть на расположение и энергию орбиталей.

Как мы видели, 2 орбитали 4s отличаются значительным средним расстоянием до ядра, в то время как их энергия слабее, чем у орбиталей 3d. Орбитали 4s, таким образом, заполняются электронами раньше, чем 3d (из-за более слабой энергии), хотя они расположены дальше. Их удаленность от ядра делает электроны орбиталей 4s очень чувствительными к окружающей среде: на практике те самые два электрона легко оторвать. Что образует ионы с *двойным* положительным зарядом.

Можно, однако, образовать Fe^{3+} или Mn^{4+} , что показывает, что никакое определенное правило не может быть тут приложено: близость энергетически более сильных орбиталей позволяет формировать большое разнообразие относительно устойчивых, положительных ионов у переходных металлов.

3. Образование и свойства молекул

Устойчивость молекул

Выше мы объяснили, почему некоторые элементы стремятся образовать ионы, чтобы иметь такое же число валентных электронов, как у ближайшего инертного газа. Но кроме образования ионов существует другой способ соответствовать правилу дуэта или октета.

В частности, очень трудно сформировать ион, несущий двойной отрицательный заряд: действительно, из-за электростатического отталкивания электрон никогда не приблизится к отрицательному иону, чтобы добавить ему отрицательный заряд. Так, ион O^{2-} образуется с большим трудом, хотя это и позволяет кислороду окружить себя восемью электронами.

Чтобы соответствовать правилу октета, эти элементы, расположенные в правой верхней части таблицы, предпочитают объединять свои электроны с электронами другого атома, соединяясь с ним.

Продолжим пример с кислородом: у него 6 валентных электронов, то есть ему не хватает двух, чтобы соответствовать правилу октета. Между тем один атом водорода содержит один электрон. Предположим, что атом кислорода «приклеивается» к двум атомам водорода: электроны двух атомов водорода оказываются в окружении кислорода, который, таким образом, окружен восемью электронами. Правило октета выполняется (→ **рис. 24.5**): кислород, соединенный с двумя атомами водорода, устойчив, а в одиночку нет: так формируется молекула воды H_2O . Отметим, что водород также удовлетворен такой ситуацией: когда водород соединяется с кислородом, один из электронов кислорода прибавляется к окружению водорода. Таким образом, водород окружен двумя электронами, что соответствует правилу дуэта.

Стремление получить такую же структуру, как у ближайшего инертного газа, объясняет образование молекул и их устойчивость. Отметим глубокое влияние экранирующего эффекта, механизмы которого описаны в предыдущем параграфе.

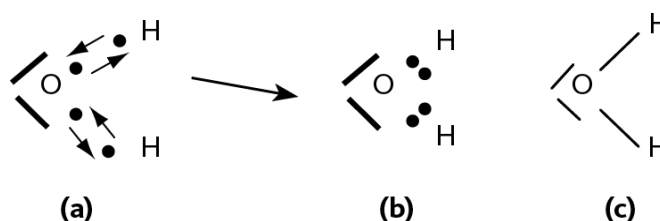


Рис. 24.5 – Образование молекулы воды

На схеме мы изобразили каждый атом, окруженный валентными электронами: каждая точка представляет электрон, каждый штрих представляет 2 электрона. Это так называемая структура Льюиса.

Итак, кислород окружен 6 электронами, а у водорода 1 электрон (а). Соединяясь друг с другом, атомы получают дополнительные электроны: кислород приобретает 8 электронов, а водород 2 электрона (b). Правило октета и правило дуэта подтверждаются.

На практике молекулу воды изображают, как указано в части (c): каждая пара электронов (b) была заменена штрихом, который изображает «связь», возникшую между кислородом и водородом.

Необыкновенная молекула: H₂O

Полярность молекулы воды

Те же механизмы позволяют понять многие химические реакции между молекулами. Для этого мы обобщим все, что было сказано о свойствах различных элементов:

- элементы, расположенные в правой стороне таблицы, имеют тенденцию притягивать электроны, а те, что расположены слева, имеют тенденцию их терять;
- элементы, расположенные внизу, имеют тенденцию терять больше электронов, чем те, что расположены наверху (образование положительных ионов).

Говорят, что элементы, расположенные справа вверху, очень «электроотрицательные»: они стремятся притянуть к себе электроны и стать отрицательно заряженными.

Эти свойства оказывают интересное влияние на молекулы. Возьмем пример с водой H₂O: в этой молекуле кислород сильно притягивает электроны, сильнее, чем водород (потому что кислород расположен в таблице справа вверху). Это значит, что электроны связей ближе к кислороду, чем к водороду. На самом деле, облака, состоящие из электронов, меняются в направлении ядра кислорода. В молекуле воды кислород оказывается отрицательно заряженным, а водород положительно заряженным (→ рис. 24.6).

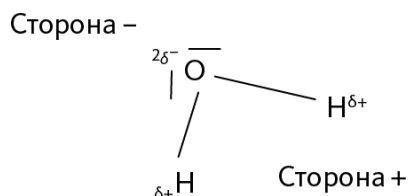


Рис. 24.6 – Полярность молекулы воды

Заряды, которые несет каждый атом, обозначены δ⁺ и δ⁻

Поскольку молекула воды изогнута (предположим это), это значит, что у нее есть положительная и отрицательная сторона: такую молекулу называют полярной. Мы уже видели некоторые последствия этого в главе 11: две полярные молекулы сильно притягиваются, что объясняет устойчивость жидкой воды, так же как, кроме прочего, феномен поверхностного давления.

Растворение и ионизация

Существует другое важнейшее следствие полярности воды. Возьмем пример со столовой солью NaCl, которую положим в воду. Периодическая система поможет нам узнать, что натрий Na стремится отталкивать электроны (он находится в левой части таблицы), тогда как хлор стремится их притягивать (он справа). Таким образом, в молекуле NaCl Na заряжен положительно, а Cl отрицательно.

Оказавшись в воде, соль вступает в реакцию с молекулами H_2O . Из-за электростатического притяжения в воде Na притягивается к атому кислорода, в то время как Cl притягивается к водороду (→ **рис. 24.7**). Многочисленные молекулы воды окружают хлор с одной стороны и натрий с другой. Молекулы NaCl оказываются разъединены и окружены молекулами воды H_2O : соль растворилась. Песчинки твердого тела исчезли, поскольку объединения NaCl уже не скреплены друг с другом.

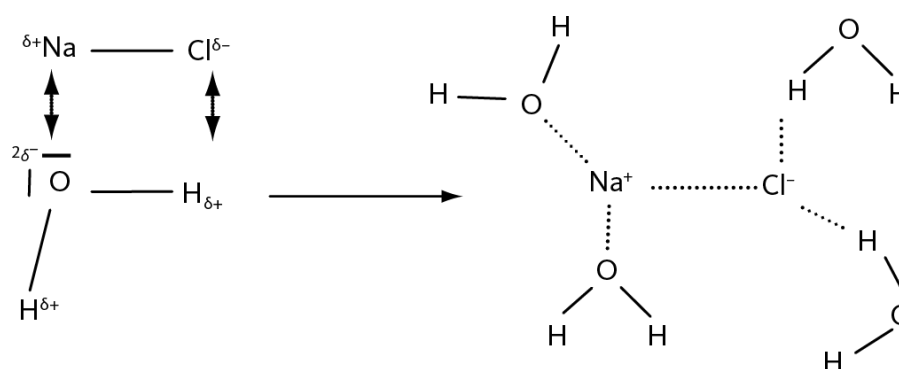


Рис. 24.7 – Растворение соли

В молекуле воды кислород несет отрицательный заряд, а водород положительный, потому что кислород стремится притянуть к себе электроны связи. Также в NaCl (столовая соль) натрий несет положительный заряд, а хлор отрицательный. NaCl и H_2O притягиваются благодаря действию электростатической силы. Связи, созданные с молекулами воды, ослабляют связи между Na и Cl, пока не разобьют их. Полученные ионы Na^+ и Cl^- , окруженные молекулами воды, больше не могут соединиться.

Более того, связь между Cl и Na разрушилась под воздействием окружающих молекул H_2O . В конечном итоге это может разрушить связь NaCl, чтобы создать Na^+ и Cl^- : произошла ионизация. Если бы эти два иона были одни, они притянулись бы друг к другу, поскольку имеют противоположные заряды, пока не сформировали бы новые молекулы NaCl. Но они окружены массой молекул воды, которые препятствуют этому восстановлению.

Роль воды в химии и биологии

Таким образом, из-за полярности молекулы H_2O вода способствует растворению многих веществ, так же как и их ионизации. Между тем после растворения эти вещества могут реагировать между собой гораздо эффективнее.



РАСТИТЕЛЬНОЕ МАСЛО И СПИРТ

Растительное масло является совокупностью молекул, составленных из длинной аполлярной цепи атомов углерода и водорода, — эти молекулы не могут электростатически притягиваться к молекулам воды. Это объясняет, почему масло «плавает» на поверхности воды, не смешиваясь

с ней, что может представлять определенную трудность при приготовлении соусов... Говорят, что вода и масло представляют собой две различные фазы.

В свою очередь, этанол является спиртом, составленным из полярных молекул, которые могут склеиваться с молекулами воды: как и соль, этанол полностью растворим в воде. Смесь вода-этанол составляет единую фазу: к счастью, иначе, открывая бутылку вина, первые пили бы чистый спирт (первую фазу), а следующие довольствовались бы виноградным соком, оставшимся в бутылке (вторая фаза)...

Возьмем пример: первичная атмосфера Земли состояла в основном из углекислого газа CO_2 . Океаны содержали элемент кальций в виде Ca^{2+} реакция с CO_2 и H_2O сформировала известняк CaCO_3 .

Если бы CO_2 не растворялся в воде, реакция прошла бы *только на поверхности*, там, где есть контакт CO_2 и Ca^{2+} . Но на практике часть CO_2 растворилась в воде (именно благодаря этому свойству мы производим газированные напитки). Таким образом, реакция между CO_2 и Ca^{2+} смогла произойти во всем океане, а не только на поверхности. Без этого феномена, успешно образующего известняк, CO_2 преобладал бы по-прежнему, и температура на Земле была бы невыносимой.

Так, растворяя самые разные вещества, вода позволяет им вступать в контакт в полном объеме, что ускоряет химические реакции. Это позволяет развивать разнообразные и сложные химические процессы, в частности при создании живых организмов. По этой причине жизнь, которая характеризуется чрезвычайно сложной химией, нуждается в жидкой воде, чтобы начаться и продолжаться. В том числе и поэтому наше тело большей частью состоит из воды.

Мы всегда может придумать другую полярную жидкость, которая сыграла бы ту же самую роль; но вода состоит из элементов, наиболее распространенных во Вселенной (H и O), и самых простых молекул, какие только бывают. Именно поэтому появление жизни при отсутствии жидкой воды кажется маловероятным.

Окислители, восстановители и батарейки

Реакция между окислителем и восстановителем

Продолжим обзор важного влияния воды на химические свойства веществ, сосредоточившись теперь на химии в водном растворе.

Окислителем называют вещество, способное легко отнять электрон. Мы видели, что элементы, расположенные справа сверху таблицы, к этому особенно расположены. В частности, слово «окислитель» произошло от слова «кислород». В качестве распространенного окислителя можно взять двухатомный кислород.

Восстановителем называют вещество, способное легко отдавать электрон. Мы видели, что это, в частности, касается элементов слева внизу таблицы. Например, все «переходные металлы» хорошие восстановители. В качестве примера среди многих других можно назвать железо.

Восстановитель хочет отдать электрон, а окислитель хочет его забрать: хороший восстановитель охотно прореагирует с хорошим окислителем. По этой причине железный гвоздь реагирует на присутствие двухатомного кислорода, образуя «ржавчину» (если добавить воду, реакция ускорится). В ржавчине Fe_2O_3 железо потеряло 3 электрона, а кислород приобрел 2.

Конструкция батарейки

Теперь предположим, что мы соединили окислитель с восстановителем *с помощью вещества-проводника*, например медной проволоки (→ **рис. 24.8**). Свободные электроны могут перемещаться по меди: окислитель, таким образом, может взять один из этих свободных электронов, создав в веществе положительный заряд. Что касается восстановителя, он склонен отдавать электрон, что компенсирует положительный заряд.

В конечном итоге восстановитель отдал электрон окислителю с помощью проводника. Если медную проволоку поместить в два разных раствора, содержащие по отдельности сильно

концентрированный окислитель и восстановитель, множество электронов могут поменяться местами при помощи медной проволоки (→ **рис. 24.8**).

По мере того как восстановитель отдает электроны, раствор слева должен был бы стать положительно заряженным, что предотвратило бы отток новых электронов. Также приток электронов к окислителю должен был бы дать раствору отрицательный заряд. Именно поэтому необходимо соединить два раствора с помощью содержащего ионы электролита (так называемого солевого моста): отрицательные ионы электролита устремляются влево, компенсируя положительный заряд; положительные ионы устремляются вправо, нейтрализуя отрицательный заряд. Реакции будут, таким образом, продолжаться, и ток может циркулировать в созданной цепи.

Совокупность двух растворов и солевого моста образует батарейку: благодаря химическим реакциям есть «отрицательный полюс» со стороны восстановителя (который стремится отдать электроны) и «положительный полюс» со стороны окислителя (который стремится забрать электроны).

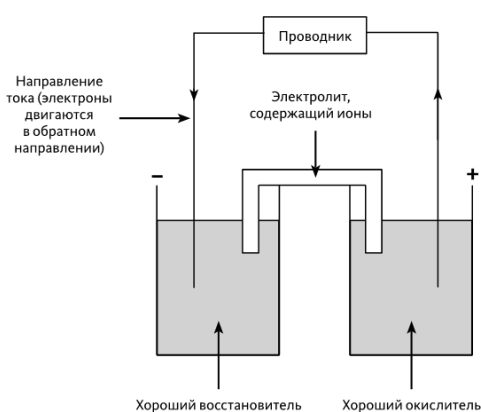


Рис. 24.8 – Принцип батарейки



ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Тенденция забирать или терять электроны также может объяснить некоторые физические (а не химические) свойства веществ. Так, вещество, которое легко теряет электроны, чаще всего является хорошим проводником, потому что потерянные электроны свободно перемещаются в веществе. Хорошая проводимость свойственна металлам: становится понятно, что металлы расположены слева внизу таблицы.

Скорость и энергия реакции

Температура и скорость реакции

Во время образования ржавчины Fe_2O_3 гораздо устойчивее соединения Fe и O_2 . Если ждать достаточно долго, целостность железа разрушается, и образуется ржавчина.

Между тем происходящая реакция не выглядит особенно бурной, потому что протекает она очень медленно. Таким образом, скорость реакции не связана с «силой» окислителя или восстановителя. Проблема здесь в том, что реакция протекает на границе соприкосновения гвоздя и воды, содержащей растворенный двухатомный кислород, то есть в ней участвует не весь объем раствора. Чтобы увеличить скорость реакции, простейшее средство – повысить температуру: молекулы будут в среднем двигаться быстрее, и их столкновения станут чаще. Между тем именно во время их столкновений, когда молекулы приближаются друг к другу, происходит реакция.

Именно поэтому необходим холодильник: снижая температуру, он замедляет химические реакции. А развитие бактерий на пище происходит благодаря химическим реакциям (не будем забывать, что сама Жизнь является лишь сложной формой химии...): бактерии, как и Человек, строятся благодаря химическим реакциям.

Это также объясняет необходимость поддерживать в нашем теле температуру выше температуры окружающей среды (37 °C): это значительно повышает химическую активность внутри нашего тела, наше ежедневное развитие и повседневную деятельность.

Энергия, освобожденная реакцией

Кроме того, химические реакции сами могут менять температуру окружающей среды. Молекулы обладают «микроскопической потенциальной энергией» благодаря электростатической силе, действующей на заряды. Когда молекулы меняют атомы и свою структуру, эта энергия может меняться. Если потенциальная энергия уменьшается, значит, увеличивается кинетическая энергия молекул (на практике электростатическая сила придает скорости зарядам, содержащимся в молекулах). Атомы молекул начинают вибрировать быстрее, и эта кинетическая энергия, таким образом, передается посредством столкновений: молекулы перемещаются быстрее, а значит, температура повышается. Такие химические реакции называются экзотермическими.

В конечном итоге именно благодаря химическим реакциям человеческое тело может поддерживать в себе температуру 37 °C. Химические реакции поддерживают высокую температуру, что позволяет увеличить скорость химических реакций. Таким образом, в энергетическом плане химические реакции поддерживают сами себя...



ЭНТАЛЬПИЯ

Существует ситуация, когда снижение потенциальной энергии во время химической реакции не переходит в повышение энергии кинетической: так происходит, когда вещества, образованные реакцией, занимают больше места, чем изначальные вещества. Образованные молекулы должны «расчистить себе место», расталкивая другие: мы видели в главе 11, что это «расширение» сопровождалось охлаждением. Энергия, освобожденная реакцией, потом используется для этого расширения, а не для повышения температуры.

Между тем чаще всего в химии интересна только *тепловая* энергия: в общей энергии, освобожденной реакцией, энергия, служащая для расширения пространства, отбрасывается. В данном случае вместо того, чтобы обращать внимание на внутреннюю энергию U (учитывающую всю микроскопическую энергию), предпочитают иметь дело с «энтальпией» H , обозначенной $H = U + PV$ (где P – давление, а V – объем). Можно показать, что если внутренняя энергия во время расширения уменьшается под воздействием атмосферного давления, энтальпия, напротив, остается постоянной (в $H = U + PV$, U уменьшается, но V увеличивается, поэтому H остается постоянной). Таким образом, использование энтальпии позволяет принимать во внимание только образование тепловой энергии во время реакции, оставляя в стороне энергию, связанную с расширением.

Пламя и взрывы

В некоторых случаях процесс повышения температуры, вызванный химическими реакциями, может выйти из-под контроля. Возьмем реакцию между H_2 и O_2 , образующими молекулу H_2O , которая является экзотермической. Реакция не спонтанна, потому что ей нужна энергия, чтобы начаться: в самом деле, чтобы превратиться в H_2O , атомы H и O проходят промежуточные неустойчивые стадии, которые сложно создать (высокая потенциальная энергия).

Мы подносим спичку: благодаря высокой температуре она передает необходимую энергию, чтобы вызвать реакцию. Будучи высокоэкзотермической, эта реакция создает больше энергии, чем необходимо для ее осуществления, то есть она еще сильнее повышает температуру. Таким

образом, начавшись, реакция образует избыток энергии, которая не только служит для поддержания реакции, но и нагревает окружающее пространство.

Именно по этой причине, когда древесина «занялась», она продолжает гореть сама по себе (см. врезку ниже). Но в случае с $\text{H}_2 + \text{O}_2$ все идет дальше: повышение температуры такое быстрое и мощное, что в месте реакции это создает аномально повышенное давление (давление P пропорционально температуре T : $P = nkT$). В каком-то смысле благодаря своей высокой скорости молекулы резко расталкивают воздух вокруг себя. Вследствие подобного быстрого расширения зоны высокого давления происходит взрыв. Все химические взрывы основаны на этом принципе...



ОГОНЬ

Реакция горения древесины – прекрасный пример самоподдерживающейся экзотермической реакции между окислителем (двухатомный кислород воздуха) и восстановителем (деревом). Освобожденная кинетическая энергия сопровождается значительным повышением температуры.

Между тем мы видели, что тело с очень высокой температурой начинает излучать свет, – именно по этой причине светит солнце. Так же и здесь, пыль и газы, находящиеся вблизи действия реакции, излучают свет благодаря повысившейся температуре: это и есть пламя.

Кроме того, химические реакции задействуют валентные электроны: во время реакции они могут переходить на более высокую орбиталь (образование возбужденных атомов). Мы видели, что потом они спонтанно вновь спускались на нижнюю орбиталь, излучая фотон.

Это вторая причина, по которой пламя излучает свет: в отличие от предыдущей, эта причина не связана с повышением температуры окружающей среды, а является более прямым следствием освобожденной энергии реакции, которая «возбуждает» атомы.

В конечном итоге мы убеждаемся, что огонь есть не что иное, как газы и пыль твердых веществ с очень высокой температурой, которые излучают свет благодаря энергии, выделенной при химических реакциях.

Кислоты и щелочи

Завершим этот небольшой обзор, кратко изложив понятие «кислоты» и «щелочи». Кислота является веществом, стремящимся отдавать протон (который также обозначается H^+ , поскольку водород, утративший свой единственный электрон, является протоном...). Щелочь – вещество, способное забирать протон.

Если реакции между кислотами и щелочами лучше проходят в воде, это потому, что молекула H_2O служит посредником при передаче протонов: кислоте и щелочи необязательно вступать в реакцию напрямую, чтобы реакция произошла.

В самом деле, H_2O способна забрать протон у кислоты, чтобы образовать $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O}$, а также способна отдать протон щелочи, образовав мимоходом OH^- . Протон H^+ может таким образом переходить от одной молекулы воды к другой, пока наконец не перейдет от кислоты к щелочи.

Элементы, расположенные в левой части периодической таблицы, легко теряют электроны (это восстановители): таким образом, можно понять, что они легко освобождают группы OH^- (щелочи). Также элементы, расположенные в правой части таблицы, которые легко принимают электроны (окислители), легко освобождают протоны OH^+ (кислоты).

Самая распространенная сильная щелочь – это сода NaOH на базе натрия (расположенного в левой части таблицы). Очень распространенная сильная кислота – соляная HCl , на базе хлора (расположенного в правой части таблицы). Таким образом, сода и соляная кислота бурно реагируют между собой.

Обобщающий синтез химических свойств

Подведем итоги: богатое разнообразие химии связано с существованием атомных орбиталей, средним расстоянием до ядра и определенной энергией в соответствии с законами квантовой физики. Экранирующий эффект делает остальное, чтобы объяснить взаимодействие на уровне

валентных электронов, которые участвуют в переформировании молекул. Теоретически законы квантовой физики могли бы объяснить все наблюдаемые химические реакции. Но на практике вычисления чрезвычайно сложны: большое число валентных электронов оказывают друг на друга взаимное влияние, внутри атома и между разными атомами молекул, одновременно испытывая на себе влияние атомных ядер. Поэтому для того, чтобы узнать, в какой степени данная реакция является полной или частичной, с какой скоростью она происходит, необходимо идти опытным путем: характеристики каждой реакции заносятся в специальные таблицы в книгах. В будущем развитие информационных технологий наверняка позволит вычислить эти различные значения теоретически.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Электроны атомов – это «облака», которые могут принимать лишь определенные формы, называемые атомными орбиталями. Каждой орбитали присуща своя энергия и среднее расстояние до ядра.
- Два разных электрона не могут занимать одну и ту же орбиталь и занимают в первую очередь орбиталь с наиболее слабой энергией. Электроны, расположенные «с внешней стороны», называются валентными: именно они вступают в химические реакции.
- В периодической системе элементы расположены по числу возрастания протонов. В одной колонке расположены элементы с одинаковым числом валентных электронов: их химические свойства похожи. Колонки называются группами, строки называются периодами.
- С точки зрения валентных электронов, электроны, расположенные ближе к ядру, экранируют его заряд. Это объясняет тенденцию элементов терять или приобретать электроны, чтобы повысить их число до числа валентных электронов ближайшего инертного газа.
- В частности, многие элементы, среди которых очень распространенные, такие как углерод, азот и кислород, стремятся окружить себя восемью электронами: это правило октета. Это в том числе объясняет образование молекул.
- Электроотрицательность представляет собой свойство притягивать электроны в молекуле. Наиболее электроотрицательные элементы расположены в верхней правой части таблицы.
- Наиболее электроотрицательные элементы стремятся принести в молекулу отрицательный заряд. Молекулы, имеющие отрицательный и положительный заряды по обеим сторонам, называют полярными.
- Полярность молекул воды способствует растворению многих веществ: распределяя эти вещества по всему раствору, жидкая вода в большой степени способствует химическим реакциям, что объясняет ее важность в появлении и развитии жизни.
- Тенденция приобретать или терять электроны объясняет также реакции между окислителями и восстановителями и, более косвенно, между кислотами и щелочами. Это также объясняет проводимость металлов.
- Высокая температура увеличивает скорость химических реакций за счет увеличения количества столкновений молекул. Это объясняет важность того факта, что температура человеческого тела составляет 37 °C, и роль холодильника.
- Переформирование молекул во время химической реакции меняет их потенциальную электростатическую энергию: когда энергия высвобождается в тепловой форме, это называется экзотермической реакцией. Это объясняет некоторые феномены реакции горения: пламя и взрыв.

25. Спин и его применение

Помимо заряда и массы элементарные частицы характеризуются третьей величиной чисто квантового происхождения – спином. Мы увидим, что это понятие можно уподобить существованию постоянного вращения частиц вокруг своей оси, что объясняет некоторые факты большого масштаба, такие как намагничивание материалов или поляризация света. Использование спина в технологиях будущего ждет широкий размах: в этой главе мы затронем область, предшествующую появлению квантовой информатики.

1. Основополагающее вращение

Постоянная Планка: момент импульса

Каждый из двух разделов современной физики, теория относительности и квантовая физика, построены вокруг фундаментальных констант: скорости света c и постоянной Планка h .

Безусловный характер этих констант – факт, подтвержденный опытом, а не теоретическое предсказание. Это даже выглядит удивительным по отношению к традициям классической физики. Возьмем пример со скоростью света. Сначала было определено понятие пространства (единица измерения – метр) и понятие времени (единица измерения – секунда), а *потом* понятие скорости – расстояния, пройденного за единицу времени. У скорости даже нет собственной единицы измерения, поскольку она выражается в метрах в секунду: это подтверждает идею, что речь идет о побочном продукте пространства и времени, как если бы речь шла о концепте менее фундаментальном. Между тем относительность полностью меняет данную парадигму: в следующей главе мы увидим, что расстояние, как и время, зависят от системы отсчета, а следовательно, являются понятиями относительными. Зато существует предельная непреодолимая скорость, которая всегда одна и та же для всех систем отсчета, а значит, является абсолютной. Из этого следует, что свет всегда распространяется с такой скоростью в вакууме, какой бы ни была система отсчета. В том, что природа ставит таким образом на пьедестал понятие света гораздо выше понятия пространства и времени, есть нечто интригующее для нашего классического мировоззрения.

То же самое с постоянной Планка. Какой физической величине она соответствует? Вопрос немного сложнее, чем в случае со скоростью света. Чтобы на него ответить, мы можем воспользоваться связью энергии с частицей: $E = h\nu$ (где ν – частота колебаний волны-частицы). Мы видели, что понятие энергии представляет собой движение или потенциальность движения. То есть это «эффективная» кинетическая энергия или потенциальная: с определением $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ мы констатируем, что энергия выражается в $\text{кг} \cdot (\text{м/с})^2$. Так, постоянная Планка $h = E/V = E \cdot T$ (вводится понятие периода T колебания волны) выражается в $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$.

Это немного сложная единица: если скорость света вводила в игру понятие расстояния и времени, постоянная Планка также вводит понятие массы. Между тем это довольно известная величина в классической физике: речь идет о моменте импульса (глава 6).

Кинетический момент был введен, когда мы изучали свойства объекта, вращающегося вокруг своей оси. В частности, если объект с массой m описывает окружность со скоростью v вокруг оси, расположенной на расстоянии l , его момент импульса по определению равен $mv l$. Таким образом, момент импульса выражается в $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$, как постоянная Планка.

Вот довольно неожиданный результат: на самом фундаментальном уровне природа представляется квантовой в отношении момента импульса. Как будто вращение вокруг своей оси является основополагающим свойством в микроскопическом масштабе, свойством частиц. Если постоянная Планка исторически была введена, чтобы представить квантование энергии ($E = h\nu$), она выглядит менее фундаментальной, поскольку зависит от частоты ν : можно получить любую энергию E , заставив измениться частоту ν частицы-волны. Напротив, постоянная h , взятая отдельно, представляет собой безупречный момент импульса, независимый от всякого другого физического параметра. Это предполагает, что можно получить фотон или электрон любой энергии, но не любого момента импульса. Понятие момента импульса, столь нелогичное, выглядит величиной, от которой происходят все остальные.

Эти несколько абстрактные рассуждения предполагают, что все частицы должны были бы характеризоваться чем-то вроде пожизненного «фундаментального вращения», которое мы назовем «спин» (в переводе с английского «вращаться»). Опыты подтверждают это предположение.

Спин фотона

Фотон – это электромагнитная волна, но мы видели, что такие волны характеризовались их состоянием поляризации (глава 20). Если электрические и магнитные поля колеблются вдоль фиксированной оси, речь идет о прямолинейной поляризации. Если они вращаются вокруг оси, речь идет о круговой поляризации. Наконец, эллиптическая поляризация является промежуточным звеном между прямолинейной и круговой.

Мы видели, что любую волну можно увидеть как наложение волн или прямолинейных, или круговых. Так, фотон, неделимая электромагнитная волна, должен характеризоваться состоянием поляризации: или круговой, или прямолинейной. В первом случае это значит, что фотон, перемещаясь, вращается вокруг своей оси, порождая вращение своего электромагнитного поля. Иными словами, он должен обладать присущим ему моментом импульса. Во втором случае фотон всегда должен ориентироваться на одну ось.

Опыт позволяет легко определить, какая из гипотез верна: в самом деле, мы видели, что поглощение прямолинейной волны поляризатором зависит от угла ее наклона. И напротив, круговая волна поглощается одинаково, независимо от направления поляризатора, поскольку электрическое поле ликвидирует все направления во время своего кругового вращения.

Опыт неоспоримый: фотон поляризуется круговым способом, а это означает, что, передвигаясь, он вращается вокруг своей оси. Значит, он обладает собственным моментом импульса, который можно измерить: он равен $h/2\pi$. Эта величина так важна, что физики обозначают ее $\hbar$: по определению $\hbar = h/2\pi$. То есть все фотоны Вселенной обладают одним и тем же собственным моментом импульса, равным $\hbar$, какова бы ни была их частота и энергия. Это настолько фундаментальная величина, что физики сделали из нее характеризующую величину спина, то есть фотон обладает спином, равным 1. Другими словами, спин, равный 1, соответствует кинетическому моменту, равному $\hbar$.

Можно задаться вопросом, как фотону удастся всегда сохранять один и тот же спин, тогда как частота его колебания может меняться. В случае с круговой поляризацией электромагнитное поле вращается вокруг оси, а частота соответствует числу оборотов в секунду. Если удвоить частоту, это означает, что фотон вращается вдвое быстрее вокруг своей оси: его спин должен был бы увеличиться.

Однако момент импульса зависит не только от скорости вращения: в частности, мы видели, что он был равен $mv\ell$ в случае с объектом, совершающим круговое движение. Если скорость вращения увеличивается, момент импульса может остаться постоянным при условии, что радиус r пройденного круга уменьшается.

Представим фотон в виде вращающейся сферы: если частота увеличивается, это значит, что сфера быстрее вращается вокруг своей оси, то есть радиус сферы уменьшается, поскольку спин должен быть равен 1. Нужно признать, что такие «сферические фотоны» естественным образом сжимаются, когда их стараются заставить вращаться быстрее.

Необходимо, однако, понимать пределы такого изображения фотона в форме сферы. Понятие частоты колебания имеет смысл только для фотона в форме волны, тогда как наша сферическая модель соответствует фотону-корпускуле. Между тем фотон существует либо как волна, либо как корпускула, но никогда и то и другое одновременно: в этом состоит тонкость корпускулярно-волнового дуализма.

Здесь мы поднимаем сложные вопросы понятия реальности, к которым мы уже привыкли благодаря квантовой физике: некоторые квантовые явления не имеют классических аналогов, и использовать классическую картинку (например, сферического объекта) здесь нельзя. И все-таки это неизбежная необходимость, если мы хотим выйти за пределы математической абстракции, чтобы представить себе, что происходит на микроскопическом уровне. В этом смысле изображение «фотона-волны», который превращается в «фотон – сферическую вращающуюся корпускулу» в момент его обнаружения, остается, без сомнения, наиболее соответствующим тому, что происходит на самом деле.

Спин электрона

Аналогии между фотоном и электроном позволили Луи де Бройлю догадаться о волновой природе электронов: как и фотон, электрон является волной (облаком), которая превращается в корпускулу, когда его пытаются обнаружить. Поскольку фотоны-корпускулы обладают собственным моментом импульса (спином), естественно предположить, что электроны могут тоже его иметь.

Возьмем один электрон в атоме: мы видели, что, будучи волной, он был одновременно повсюду, как облако. Мы также видели, что этот электрон может переходить с одной орбитали на другую, излучая или поглощая фотон. На практике такую смену орбиталей позволяет

электромагнитная сила; но излучение волны возможно лишь при условии, что электрон вращается вокруг ядра. Иначе говоря, он должен обладать моментом импульса, который называется орбитальным моментом.

Напомним, что понятие траектории не имеет никакого смысла для электрона-корпускулы, то есть этот орбитальный момент относится к электрону-волне. В каком-то смысле вокруг ядра вращается электронное облако.

Напрашивается вывод: орбитальный момент электрона никак не связан со спином, поскольку соответствует движению электрона вокруг ядра, а не вокруг своей оси. Ничто не указывает на то, что электрон обладает собственным моментом импульса: для этого нужно было бы, чтобы электроны-корпускулы вращались вокруг своей оси. Представим электрон в его атоме: пока не стремятся обнаружить его местоположение, он является «вращающимся облаком», которое занимает все пространство атома. Как только мы хотим узнать, где он находится, электрон становится частицей, расположенной в определенном месте атома. Если у него есть спин, тогда эта частица должна продолжить вращаться вокруг своей оси: обнаружение исказило его орбитальный момент, уничтожив волну, но не исказило его собственный момент импульса, который сохраняется даже после превращения в частицу.

Как узнать, обладает ли электрон спином? Тот факт, что он ведет себя как заряженная частица, значительно все упрощает: в самом деле, всякая заряженная вращающаяся сфера создает магнитное поле, которое легко обнаружить. Другими словами, электрон, обладающий спином, должен вести себя как маленький магнит.

Опыт был проведен в 1925 г. Штерном и Герлахом: они послали атомы серебра к магнитам. Идея была проста: если атомы серебра сами являются маленькими магнитами, они должны отклониться в присутствии другого магнита (два одинаковых полюса отталкиваются, два полюса с противоположным знаком притягиваются).

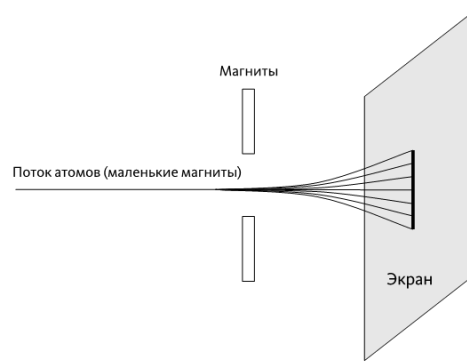
Штерн и Герлах обнаружили, что половина атомов серебра отклонилась вверх, а половина вниз. Иными словами, атомы серебра повели себя именно как маленькие магниты: половина с северным полюсом направились вверх, другая половина с северным полюсом направились вниз.

Орбитальный момент не может объяснить наблюдаемое отклонение: у электронов наверняка должен быть дополнительный, присущий им кинетический момент, который равен $\hbar/2$. Иными словами, опыт показывает, что электроны действительно имеют спин, равный $1/2$, то есть наполовину меньше, чем у фотона.

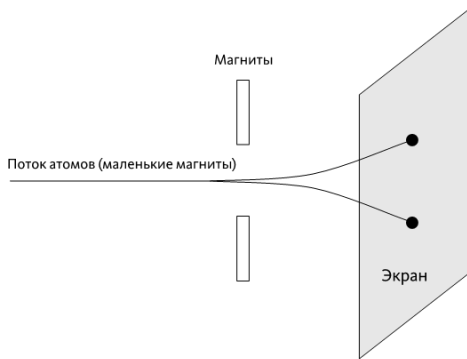
Именно это свойство электронов вращаться вокруг своей оси позволяет объяснить существование магнитов: электроны-корпускулы являются малюсенькими магнитами, что объясняет, почему некоторые атомы (называемые парамагнетиками) также являются маленькими магнитами и, соответственно, некоторые вещества (ферромагнетики) образуют большие магниты. В главе 14 мы говорили, что способность некоторых веществ намагничиваться происходит из-за движения заряженных частиц внутри атомов. Мы видим, что в основном речь идет о вращении электронов вокруг собственной оси.

Удивительные свойства спина

Опыт Штерна и Герлаха не только позволил открыть существование спина электрона. Он также выявил некоторые поразительные факты относительно природы спина, стоящие в одном ряду с другими удивительными свойствами квантовой физики, которые мы уже описывали. Идея проста: представим электроны-корпускулы в виде маленьких вращающихся сфер. У оси вращения нет никаких причин быть направленной в какую-то определенную сторону: следовательно, каждый электрон должен иметь свою ось вращения. У некоторых северный полюс должен быть направлен вверх, у других вниз, у третьих вправо, у четвертых влево, у пятых по диагонали и т. д. Что же должно произойти во время опыта Штерна и Герлаха (→ **рис. 25.1**)? Электроны, чей северный полюс направлен вверх, должны отклониться вверх из-за действия магнитной силы. Электроны с северным полюсом, направленным вниз, должны отклониться вниз. Те, чей полюс направлен вправо или влево, не должны отклоняться. Электроны с диагональным северным полюсом представляют собой промежуточный этап: чем больше полюс электрона-магнита отклонен от вертикали, тем меньше отклоняется электрон.



(1) С точки зрения классической физики



(2) С точки зрения квантовой физики

Рис. 25.1 – Отклонение электронов под действием магнитов

Из-за спина электронов атомы серебра ведут себя как маленькие магниты, ориентированные каждый в свою сторону. С точки зрения классической физики (1), каждый атом должен был бы отклониться в определенную сторону согласно направлению своей оси север – юг, вызвав на экране появление вертикальной черты. На практике мы наблюдаем лишь две точки на экране (2), как если бы все атомы были направлены вертикально (половина вверх, половина вниз).

В итоге, сложив вместе все электроны, мы должны получить очень разные углы отклонения, и на экране должна появиться вертикальная прямая, соответствующая всем этим точкам касания. Между тем Штерн и Герлах наблюдали лишь две точки на экране – одну сверху, другую снизу. В этом опыте все происходит так, как если бы все электроны-магниты были вертикальными: у половины северный полюс направлен вверх, у другой половины вниз. В частности, нет ни одного горизонтального электрона-магнита, поскольку нет ни одного центрального пятна, соответствующего отсутствию отклонения.

Есть еще нечто более странное: направим теперь эти электроны между полюсами горизонтального магнита. Поскольку все эти электроны являются вертикальными магнитами, ни один из них не должен отклониться под действием этого горизонтального магнита. Между тем мы, напротив, наблюдаем, что все они отклонились: половина направо, половина налево. Это значит, что на этот раз все электроны-магниты горизонтальны, хотя они те же самые, что и раньше. Перед нами настоящий парадокс: вертикальные или горизонтальные электроны-магниты? Опыт показывает, что они и те и другие сразу!

Вывод по меньшей мере странный: электроны вращаются во всех направлениях одновременно! Мы видим, что изображение электрона-корпускулы в виде вращающейся сферы становится еще более проблематичным: как можно себе представить сферу, обладающую одновременно бесконечным числом осей вращения? Более того, мы видим, что в момент измерения это множество осей вращения внезапно принимает определенную структуру и выбирает некое предпочтительное направление вращения.

Этот факт не такой уж новый: мы уже видели подобное в опыте Юнга. Пока мы не стремимся обнаружить местоположение электрона, он находится одновременно всюду (если это волна), объясняя феномен интерференции. Но как только мы пытаемся его обнаружить, он мгновенно концентрируется в определенной точке пространства (это частица). Аналогично пока мы не стремимся обнаружить спин электрона, он вращается во всех направлениях сразу. Но как только мы его измеряем, он мгновенно принимает определенное направление вращения.

Это открывает новые аспекты корпускулярно-волнового дуализма: он касается не только местоположения (рассеяние в пространстве в виде волны или локальной концентрации в виде частицы), но также других физических величин. Так, электрон вращается сразу во всех направлениях (аналог волны), пока спин не будет измерен (аналог частицы).

Более того, эти два типа корпускулярно-волновой трансформации не зависят друг от друга: если электрон концентрируется в частицу, когда речь идет о местоположении, он может оставаться в форме волны, когда речь идет о спине. В конечном итоге обе трансформации являются примером непредсказуемого характера природы: невозможно предсказать, в каком месте будет обнаружен электрон, так же как невозможно предсказать, в какую сторону он будет вращаться. В одной и той же физической ситуации электрон будет вращаться влево, а в другой – вправо. Нет никаких физических причин, чтобы объяснить этот выбор.



ФЕРМИОНЫ И БОЗОНЫ

Спин фотона равен 1, в то время как спин электрона равен $\frac{1}{2}$. А как обстоит дело с другими частицами? Теория в соответствии с опытом предусматривает, что спин может быть только целым (как у фотона) или полуцелым (как у электрона). Это побудило физиков разделить элементарные частицы на две категории:

- Фермионы, обладающие полуцелым спином, то есть электрон является фермионом.
- Бозоны, обладающие целым спином: фотон, следовательно, является бозоном.

Подобное разделение отнюдь не искусственное: в самом деле, поведение частиц весьма различается в зависимости от того, бозон это или фермион. Это разграничение также связано с дихотомией, которая выглядит более логичной:

• Бозоны являются элементарными частицами взаимодействия. Например, гравитон, связанный с силой притяжения, и фотон, связанный с электромагнитной силой, являются бозонами. Таким образом, бозоны, в частности, являются элементарными частицами света.

• Фермионы являются элементарными частицами материи: атомы состоят из электронов, протонов и нейтронов – все они являются фермионами.

К понятию бозонов и фермионов мы вернемся в главе 28.

То же самое касается фотона: мы видели, что фотоны являются круговыми поляризованными волнами. Если мы пытаемся измерить эту поляризацию, у нас один шанс из двух увидеть, что фотон вращается влево, а также один шанс из двух увидеть его вращение вправо. Между тем до измерения фотон вращается в двух направлениях сразу. Более того, фотон не обладает никаким секретом, объясняющим, какое направление вращения он выберет, вправо или влево: в каком-то смысле в момент измерения информация «возникает из ниоткуда».

2. Квантовая информатика

Спинтроника

Как показывает их название, электроны являются ключевыми элементарными частицами электроники: их перемещение в материалах-проводниках или полупроводниках под действием электромагнитной силы позволяет переносить энергию и информацию. В частности, в главе 18 мы описывали принцип и преимущество перехода к цифровым технологиям: кодировка информации в виде последовательности нулей или единиц позволяет полностью сохранять ее в присутствии помех и легко производить операции с ней.

Мы объяснили, что на практике эта кодировка может осуществляться благодаря последовательной подаче напряжения: например, единице будет соответствовать 15V, а нулю 0

V. И все же объем информации, который можно передать, ограничен тем, что напряжение не может мгновенно перейти от 15V к 0V из-за явления электромагнитной индукции: переход от 0 к 1 не может происходить слишком быстро. В *пространственном* измерении напряжение также не может вдруг измениться с 15V до 0V, что на этот раз ограничивает *плотность* накопленной информации.

Если мы хотим продолжать увеличивать информационный потенциал, необходимо найти средство обойти эти временные и пространственные пределы: нужно искать другие средства передачи информации, которые заменят электрическое напряжение.

Здесь-то и вмешиваются электроны. Опыт Штерна и Герлаха показывает, что электроны можно легко поделить на две части: электроны, которые отклоняются вверх (которые можно назвать up), и те, которые отклоняются вниз (down). Применительно к спине эти две категории вращаются в противоположных направлениях: можно сказать, что у электронов up спин $+1/2$, а у электронов down спин $-1/2$.

Эта двойная популяция электронов идеальна для бинарного кодирования: например, 0 будет соответствовать электрону down, а 1 электрону up. Кроме того, поскольку электроны уже являются базой электроники, использование их спина не является переворотом в необходимых технологиях: по отношению к классическим системам достаточно суметь разделить популяции up и down (простым воздействием магнитного поля) и осуществить операции по повороту спина. Можно, таким образом, создать череду спинов по своему выбору, чтобы кодировать нужную информацию. В конечном итоге бинарная кодировка цифровой информации – удобный случай, предоставленный природой на самом элементарном уровне...

Теоретическая плотность, которой можно достичь, колоссальна: действительно, в том, что касается спина, каждый электрон соответствует некой информации. Другими словами, электрон = 1 биту информации. 8 электронов соответствуют, таким образом, байту. Если использовать свободные электроны (те, которые способны перемещаться), их плотность в таком металле, как медь, составляет примерно 10^{29} электронов / м³: это соответствует 10 миллиардам гигабайтов в 1 мм³!



МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЕ

В ожидании, пока информацию спина можно будет обрабатывать на его элементарном уровне, «спинтроника» пока использует его более глобальным способом. Поскольку из своего спина электроны являются маленькими магнитами, их перемещение искажается в намагниченной среде: там электроны передвигаются более или менее легко согласно направлению (up или down) их спина. Другими словами, электрический ток (а значит, и сопротивление материала) очень зависит от ориентации спина электронов: в данном случае говорят о магнетосопротивлении. В конечном итоге дешифровка спина электронов делается с помощью классического сопротивления: это общее измерение спина, которое делается на всем токе, а не на отдельном электроне. За открытие феномена «гигантского магнетосопротивления», сделанное в 1988 г., француз Альбер Ферт в 2007 г. получил Нобелевскую премию. В 1997 г. началось первое коммерческое применение спинтроники в головке считывания жестких дисков. У этой молодой дисциплины впереди, без сомнения, блестящее будущее.

Квантовые компьютеры

В опыте Штерна и Герлаха все атомы серебра идентичны на момент их эмиссии. Однако, когда они проходят рядом с магнитом, половина атомов отклоняется вверх (то есть спин равен $1/2$), а другие отклоняются вниз (спин равен $-1/2$). То есть акт измерения создает информацию, которой раньше не существовало: до магнита заданный атом серебра имеет 50 % шансов быть отклоненным вверх и 50 % быть отклоненным вниз. Выбор up или down принадлежит природе, и на момент измерения он случаен: таково главное свойство квантовой физики, которое мы уже констатировали в опыте Юнга (глава 23). В конечном итоге до измерения величина спина еще не определилась: спин остается в форме волны, пока его не измерили.

Состояние атома серебра до измерения может, таким образом, быть записано в следующей форме: «половина up, половина down» или «50 % up, 50 % down». Интересная возможность квантовой физики состоит в том, что она позволяет существовать частице, которая необязательно находится в равновесии: например, «75 % up, 25 % down». В этом случае, если мы хотим измерить ее спин, у нас 75 % шансов обнаружить, что спин $+1/2$, и 25 % шансов, что спин $-1/2$.

Мы уже говорили о способности, сравнимой с туннельным эффектом (глава 23): пока частица существует в виде волны, она может оказаться одновременно по правую и по левую сторону барьера, но не в равной степени. Можно, например, на 75 % обнаружить частицу слева от барьера и на 25 % справа: все зависит от размера барьера.

Вернемся к спину электрона: во время обнаружения можно получить лишь два значения ($+1/2$ или $-1/2$), что соответствует одному биту информации (0 или 1). Но пока спин остается в виде волны, информация, которую он содержит, гораздо объемнее: электрон «75 % up, 25 % down» не такой, как электрон «50 % up, 50 % down» или «10 % up, 90 % down». То есть существует не только два возможных состояния, а бесконечное количество: спин электрона до измерения соответствует не простому биту информации, а «мультибиту», который называется «кубит» (квантовый бит).

Такое бурное развитие возможностей передачи информации кажется интересным для применения в компьютере. Тем не менее существует ограничение в размере: прочесть эту информацию напрямую невозможно, поскольку всякое измерение уничтожает волну. Предположим, что мы хотим проверить, что электрон составляет «75 % up, 25 % down». Для этого понадобится по меньшей мере сотня измерений: 75 раз отмерить up и 25 down, что позволит точно оценить первоначальное состояние электрона. В этом примере в 100 раз больше информации о каждом электроны, но нужно 100 электронов, чтобы ее прочесть: в смысле плотности информации мы не далеко продвинулись...

Зато ничто не мешает проделать манипуляции над спином *до измерения*, то есть вслепую: спины тогда пребывают в форме волны, что умножает возможности измерения.

Пример квантового подсчета

Чтобы понять, как это можно сделать, приведем простой пример: возьмем датчик, способный измерять состояние поляризации фотона (прямолинейную, правую круговую, левую круговую...). Представим два фотона с круговой поляризацией, но неизвестно, левой или правой. Мы хотим задать компьютеру следующий вопрос: «Одинакова ли поляризация у обоих фотонов?»

С обычным компьютером необходимо проделать два измерения: одно на каждый фотон. Если один из фотонов «левый», а другой «правый», ответ компьютера будет «Нет». Если они оба правые или оба левые, компьютер ответит «Да».

Преимущество квантового компьютера в том, что он может найти ответ за одно измерение: достаточно наложить фотоны друг на друга, чтобы они еще пребывали в форме волны. Если один из них «круговой правый», а другой «круговой левый», мы видели, что полученная волна была прямолинейной. Если оба «круговые левые», волна останется «круговой левой». То же самое, если оба «круговые правые». Другими словами, если компьютер определяет прямолинейную поляризацию, значит, оба фотона вращаются в противоположных направлениях, и он может ответить «Нет». Если компьютер определяет круговую поляризацию, он может ответить «Да».

В этом примере квантовый компьютер действует вдвое быстрее, чем обычный компьютер, поскольку тот должен произвести измерение дважды. Отметим, что он не может прочесть дополнительную информацию: по одному измерению «Нет» он знает лишь, что оба фотона имеют противоположную поляризацию, но не знает, какой из них левый, какой правый. Что до классического компьютера и его двух измерений, он смог определить состояние каждого из двух фотонов, но это значит, что он произвел бесполезные действия: вопрос состоял только в том, одинаковы ли состояния поляризации фотонов. Преимущество квантового компьютера в способности избежать бесполезных операций и сразу ответить на поставленный вопрос. Эта простая возможность чрезвычайно ценится в информатике.



БОРЬБА С ДЕКОГЕРЕНЦИЕЙ

Квантовая информатика основана на операциях, которые производятся с волнами, а не частицами. Между тем мы видели, что из-за явления декогеренции взаимодействие с окружающей средой может уничтожить волну и превратить ее в частицы. Таким образом, вся трудность в том, чтобы суметь произвести операцию до того, как частица-волна превратилась в корпускулу.

Случается, что окружающая среда особенно хаотична в микромасштабе, даже если это происходит только из-за теплового волнения: превращение электрона в частицу происходит быстро. Таким образом, операции должны производиться в очень кратком временном интервале.

Надежда на то, что возможно напрямую манипулировать квантовыми волнами через компьютер, не лишена основания. За последние годы наблюдался быстрый прогресс: в частности, Нобелевской премии за 2012 год был удостоен француз Серж Арош за работу по контролю над декогеренцией.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Спин соответствует собственному моменту импульса частиц, художественно уподобляемому вращению частиц вокруг своей оси.
- Спин фотона равен 1 и связан с поляризацией света. Спин электрона равен $\frac{1}{2}$ и объясняет намагничивание веществ.
- В том, что касается местоположения, спин имеет корпускулярно-волновую природу: частица обладает всеми возможными спинами сразу, пока не будет измерена. Выбор спина в момент измерения случаен.
- Направление спина электрона составляет бит фундаментальной информации, что открывает многочисленные возможности применения в цифровой электронике.
- Будучи волной, спин представляет кубит информации, что гораздо больше обычного бита. Эта информация не может быть использована напрямую, но она позволяет производить более эффективные операции: это составляет основу развития квантовых компьютеров.

Часть 6

Теория относительности и ядерная физика

Неисчерпаемая энергия

26. Основы теории относительности

Изложив основы квантовой физики, мы можем приступить к другой важной дисциплине современной физики – теории относительности Альберта Эйнштейна. Мы рассмотрим парадоксы, присущие классической физике, которые заставили пересмотреть то, что считалось незыблемым: безусловную природу расстояния и протекание времени. Как и квантовая физика, теория относительности предлагает новые концептуальные рамки, охватывающие классическую физику и еще более совершенствующие фундаментальные законы природы. Мы рассмотрим некоторые удивительные и нелогичные явления, которые происходят, когда мы пытаемся приблизиться к скорости света, и объясним, почему скорость света нельзя преодолеть. Наконец, мы расскажем о появлении самой известной физической формулы $E = mc^2$, поясним ее значение и смысл.

1. Проблемы, которые предстоит решить

Парадоксы электромагнетизма

Как и квантовая физика, теория относительности обязана своим появлением парадоксам классической физики и опытам, которые невозможно объяснить с помощью известных законов.

Эти парадоксы опять-таки связаны с электромагнетизмом. Напомним три силы, связанные с электромагнетизмом, о которых мы говорили:

- электростатическая сила связана с взаимодействием двух зарядов, каким бы ни было их движение;
- напряженность магнитного поля возникает при взаимодействии движущихся зарядов и пропорциональна скорости этих зарядов;
- сила электромагнитной индукции связана с изменением магнитного поля. Речь идет о силе «электрического» типа, которая действует на стационарные и движущиеся заряды.

Когда мы говорили об этих силах, мы старательно избегали понятия «система отсчета», хотя оно является основополагающим, когда мы рассматриваем движение частиц. Между тем напряженность магнитного поля зависит от скорости частиц, то есть она зависит от системы отсчета, в которой происходит действие, что немедленно поднимает несколько важных вопросов.

Приведем пример, чтобы лучше вникнуть в задачу: представим движущийся электрон, который перемещается параллельно прямолинейной проволоке. Пропускаем по проволоке электрический ток. Вопрос: какова траектория электрона?

Представим систему отсчета проволоки, относительно которой перемещается электрон (→ **рис. 26.1.а**). Мы можем представить ее инерциальной, не сделав большой ошибки. В этой системе отсчета скорость электрона не является нулевой: поскольку он перемещается перпендикулярно магнитному полю проволоки, на него действует напряженность магнитного поля, которая заставляет его отклониться от первоначальной траектории. Таким образом, можно предсказать, что электрон будет двигаться по дуге.

Теперь возьмем систему отсчета, сопровождающую первоначальное движение электрона (→ **рис. 26.1.б**): в этой новой системе отсчета начальная скорость электрона равна нулю, а проволока перемещается «назад». Здесь также идет речь об инерциальной системе отсчета. Поскольку электрон неподвижен, на него не может действовать напряженность магнитного поля: в этой системе отсчета напряженность магнитного поля равна нулю!

Мы могли бы рассудить, что в новой системе отсчета действует другая электрическая сила. Но проволока не заряжена: на электрон не действует электростатическая сила. С другой стороны, магнитное поле в этой системе отсчета остается постоянным (окружающая среда электрона с течением времени не меняется): следовательно, сила электромагнитной индукции не действует.

В итоге в этой системе отсчета классическая физика диктует нам, что *на электрон не действует никакая сила, он остается неподвижным*.

Таким образом, мы получили два совершенно противоречивых результата:

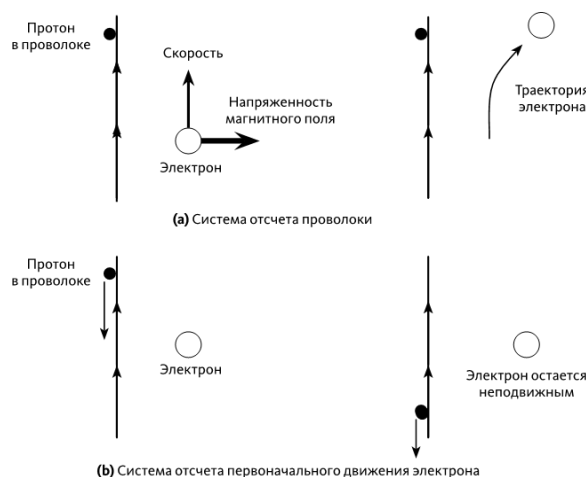


Рис. 26.1 – Траектория электрона в разных системах отсчета

В системе отсчета проволоки (а) первоначальная траектория электрона параллельна проволоке. Электрический ток создает магнитное поле в каждой точке пространства: напряженность магнитного поля действует на движущийся электрон, удаляя его от проволоки.

В системе отсчета, сопровождающей первоначальное движение электрона (б), скорость электрона равна нулю, а проволока движется назад. Напряженность магнитного поля, действующая на электрон, равна нулю (электрон неподвижен). Кроме того, у проволоки нет

заряда: электростатическая сила не действует. Наконец, магнитное поле остается постоянным во время перемещения проволоки назад, то есть сила электромагнитной индукции равна нулю.

В этой системе отсчета электрон неподвижен и его расстояние до проволоки не меняется: это противоречит выводу части (а) и экспериментальным наблюдениям.

- в инерциальной системе отсчета проволоки траектория электрона дугообразна и он удаляется от проволоки;
- в инерциальной системе прямолинейного поступательного движения по отношению к первой системе отсчета электрон остается неподвижен и его расстояние до проволоки не меняется.

Между тем, если электрон удаляется от проволоки в одной из систем отсчета, он должен удаляться и в другой! В том виде, в каком мы ее представили, электромагнитная сила содержит фундаментальное противоречие!

Если провести опыт, мы заметим, что электрон действительно отклонился: это значит, что «что-то не сходится», когда мы переходим от одной инерциальной системы отсчета к другой. На первый взгляд такое проявление сил, каким мы его изобразили, не действует во всех инерциальных системах отсчета.

Удивительное постоянство скорости света

Влияние источника света на скорость света

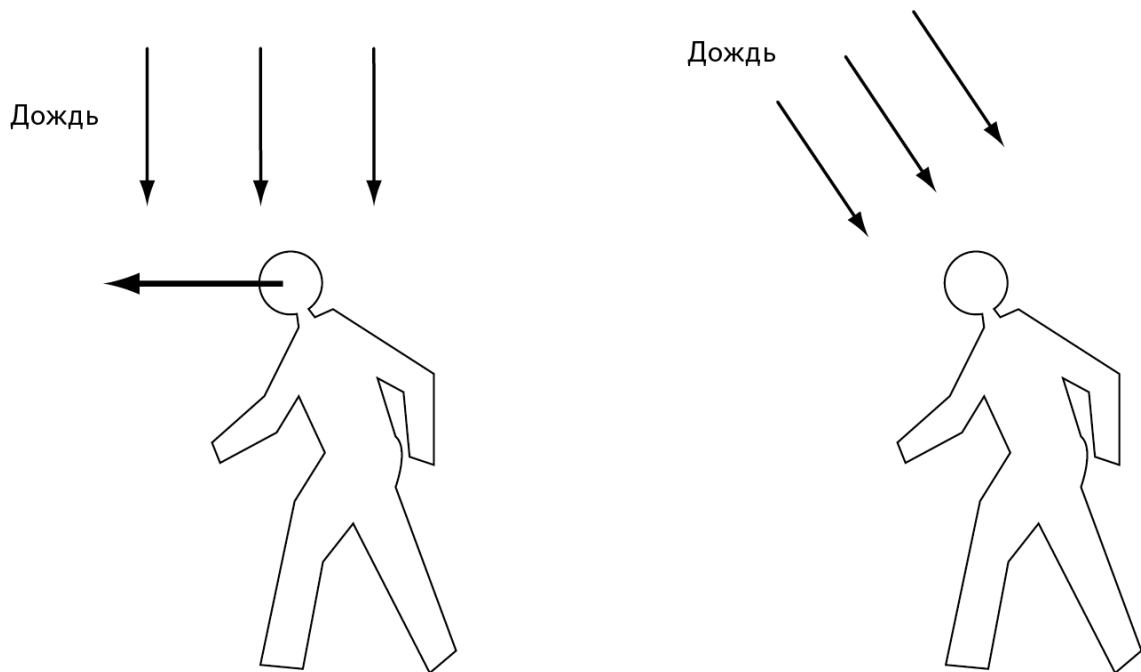
Что касается любопытных экспериментов, о которых мы говорили, они связаны с распространением света. Идея проста: если вы двигаетесь со скоростью 5 км/ч в поезде, скорость которого 10 км/ч, это значит, что ваша скорость относительно рельс 15 км/ч. Точно так же, если вы направите пучок света вперед со скоростью 300 000 км/с в ракете, скорость которой 200 000 км/с, внешний наблюдатель должен был бы увидеть, что свет движется со скоростью 500 000 км/с. Скорость света должна была бы зависеть от системы отсчета, в которой излучается свет, как и всякая другая скорость.

Первые наблюдения на эту тему были сделаны в 1725 г. английским астрономом Бредли. Чтобы понять их, рассмотрим пример: если дождь падает на землю вертикально, а вы бежите, вода бьет вам в лицо. В вашей системе отсчета дождь выглядит падающим не вертикально, а наискосок: угол падения зависит только от вашей скорости и скорости дождя.

Точно так же каждая звезда в небе изливает на Солнечную систему свой свет. Но поскольку Земля вращается вокруг Солнца, этот световой дождь в течение лет падает на нее не всегда под одним и тем же углом. Если свет звезды поступает «с одной стороны» в январе, в июле он будет поступать «с другой стороны». Разница угла наблюдения позволяет вычислить скорость света, зная скорость вращения Земли вокруг Солнца.

Поскольку в то время скорость Земли не была известна, пришлось немного подождать, прежде чем вычислить, что скорость света равна 300 000 км/с. Зато сразу же был установлен факт первостепенной важности: свет поступает в Солнечную систему с одинаковой скоростью, *какой бы ни была излучающая его звезда*.

Между тем некоторые звезды приближаются к нам, другие удаляются: если звезда приближается со скоростью 100 км/с, а свет излучается со скоростью 300 000 км/с относительно звезды, то до нас свет должен был бы долетать со скоростью 300 100 км/с. И наоборот – если звезда удаляется. Наблюдения, напротив, показывают, что свет достигает Солнечной системы всегда с одинаковой скоростью, *какова бы ни была скорость излучающего его тела*.



(a) Система отсчета земли

(b) Система отсчета пешехода

Рис. 26.2 – Угол наклона дождя относительно идущего пешехода

В системе отсчета земли (а) дождь падает вертикально, а пешеход перемещается влево.

С точки зрения пешехода (b), дождь падает наискосок. Угол отклонения от вертикали зависит от скорости пешехода и скорости дождя.

Теория эфира

В XIX в. возникла идея: поскольку свет является волной, возможно, ему нужна опора, чтобы распространяться (так же как звук не может распространяться в вакууме, поскольку он представляет собой чередование зон высокого и низкого давления). Таким образом, была выдвинута гипотеза, что межзвездный вакуум заполнен невидимой текучей средой, эфиром. Согласно этой теории, свет всегда распространяется с одинаковой скоростью *относительно эфира*: таким образом, скорость света не зависит от скорости излучающего тела, что объясняло наблюдения.

Но Земля вращается вокруг Солнца и, следовательно, должна перемещаться относительно эфира: если скорость света всегда постоянна относительно эфира, значит, она должна меняться относительно Земли в течение года.

Довольно точный эксперимент провели Майкельсон и Морли в 1887 г.: они вычислили, что скорость света была одинаковой, независимо от направления наблюдения в течение года. Таким образом, скорость света 300 000 км/с является неоспоримой константой: она остается неизменной, независимо от скорости излучающего тела и скорости тела рецептора.

Иными словами, скорость света не зависит от системы отсчета. Специальная система отсчета эфира, в которой свет распространяется со скоростью 300 000 км/с, становится бесполезной. Свет распространяется с такой скоростью во всех системах отсчета.

Поразительные последствия...

Надо хорошо понимать, какое волнение вызвал такой результат. Бросьте мяч со скоростью 5 км/ч в поезде, движущемся со скоростью 100 км/ч. Заявить, что скорость мяча не зависит от системы отсчета, означает, что мяч катится со скоростью 5 км/ч относительно рельс, но это

абсурд. Человек, в чью сторону движется мяч, видит его перемещение со скоростью не 5, а 105 км/ч!

Между тем, если мы заменим мяч фотоном, именно такой результат мы и наблюдаем, каким бы абсурдным он ни казался. Представим, что вы движетесь со скоростью 200 000 км/с относительно Земли и при этом посылаете вперед луч света: вы увидите, как свет движется вперед со скоростью 300 000 км/с. Но землянин тоже увидит луч, двигающийся со скоростью 300 000 км/с, а не 500 000 км/с!

Внимательный читатель отметит связь между теоретическим парадоксом, содержащимся в напряженности магнитного поля, и результатом опыта, который мы только что описали: в обоих случаях возникает серьезная концептуальная проблема, когда мы переходим от одной инерциальной системы отсчета к другой. В обоих случаях это касается законов электромагнетизма (не будем забывать, что свет является электромагнитной волной).

Именно на неизменности скорости света в режиме системы отсчета основана теория относительности Эйнштейна. Скорость света c , одинаковая повсюду, становится фундаментальной константой наряду с постоянной Планка h . Если постоянная Планка является якорем квантовой физики, скорость света – якорь теории относительности...

2. Время и пространство: относительные понятия

Последствия постоянства скорости света

Очевидный парадокс

Чтобы лучше понять фантастические последствия скорости света, не зависящей от системы отсчета, представим себе мир, где свет распространялся бы со скоростью не 300 000 км/с, а 50 км/с независимо от системы отсчета. Благодаря этому релятивистские явления будут происходить в нашем масштабе, и их будет легче понять.

Представим прямолинейную дорогу: у края дороги стоит пешеход, а по дороге едет машина со скоростью 40 м/с. Пешеход и автомобилист являются наблюдателями в двух разных системах отсчета. Представим, что мы включили секундомер в момент, когда машина поравнялась с пешеходом. В этот момент грузовик, едущий с той же скоростью в 50 м позади, посылает луч света, который перемещается со скоростью 50 м/с ($\rightarrow$ рис. 26.3). Вопрос: за какое время луч достигнет машины и пешехода?

Пешеход неподвижен: источник света в 50 м от него, скорость света 50 м/с, свету понадобится секунда, чтобы достичь пешехода.

Машина едет в ту же сторону, куда направлен свет, то есть луч затратит столько же времени, за которое он дойдет до пешехода. Машина движется со скоростью 40 м/с, а свет 50 м/с. То есть свет приближается на 10 м с каждой секундой: ему понадобится 5 секунд, чтобы достичь машины.

Но мы сказали, что скорость света не зависит от системы отсчета. Она составляет 50 м/с относительно дороги и *в то же время* 50 м/с относительно движущейся машины... В этой системе отсчета, если источник света изначально расположен в 50 м от машины, ему должна понадобится секунда, чтобы достичь машины.

Возникает парадокс: за сколько секунд свет долетит до машины, 1 или 5?



Рис. 26.3 – Луч света, догоняющий машину

Относительность времени и пространства

Чтобы примирить обе точки зрения, существует три способа:

- либо время протекает не с одинаковой скоростью с точки зрения пешехода и машины: в этом случае для автомобилиста прошла лишь секунда, в то время как для пешехода их прошло 5;
- либо расстояние между вспышкой и машиной не одинаково в двух системах отсчета: если вспышка находится в 250 м с точки зрения автомобилиста, ей понадобится 5 секунд, чтобы его достичь, в соответствии с ощущением пешехода; но автомобилист ощущает дистанцию в 250 м, тогда как пешеход ощущает ее в 50 м;
- либо время и расстояние меняются в зависимости от системы отсчета. С одной стороны, расстояние до вспышки больше с точки зрения автомобилиста, с другой стороны, расстояние до вспышки меньше для пешехода.

На практике верна именно третья гипотеза, и сейчас мы поймем почему. У Эйнштейна хватило гения допустить эту относительность времени и пространства: утверждение, что прошло 5 секунд или расстояние между объектами равно 50 м, не имеет смысла, если не уточнить, в какой системе отсчета.

Расширение времени и сокращение длины

Время и протяженность, тесно связанные понятия

Чтобы понять, почему время и расстояние обязательно должны изменяться вместе, рассмотрим машину, едущую со скоростью 40 м/с относительно дороги. Представим, что дорога размечена столбиками каждые 40 м. В системе отсчета дороги машина преодолевает 10 столбиков каждые 10 секунд (→ **рис. 26.4.a**).

Теперь переместимся в систему отсчета машины: представим, что в этой системе отсчета отрезки времени меньше, как подсказывает предыдущий опыт. Это значит, что между 10 столбиками пройдет меньше 10 секунд. Поскольку дорога проносится со скоростью 40 м/с, это значит, что 10 столбиков ближе друг к другу: при данной скорости понадобится меньше времени, чтобы их проехать, если они ближе друг к другу (→ **рис. 26.4.b**).

Таким образом, если время зависит от системы отсчета, расстояния должны также зависеть от системы отсчета. Рассмотрим подробнее связь между ними.

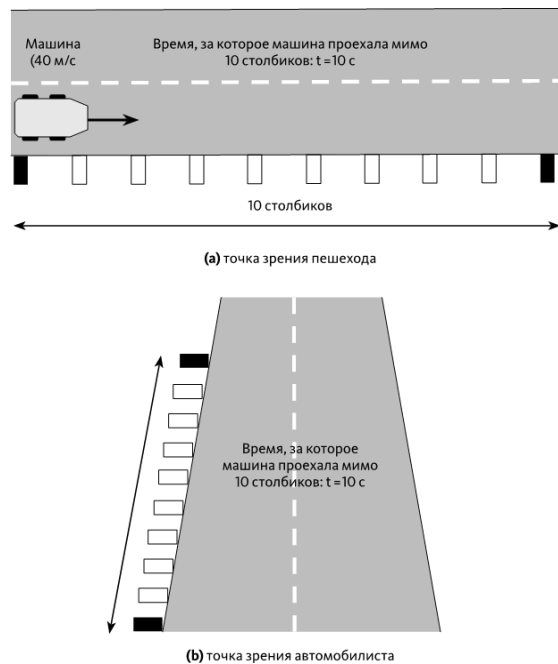


Рис. 26.4 – Относительность времени и расстояния

Действительное время, расширенное время

Представим, что автомобилист смотрит на часы каждый раз, когда проезжает мимо столбика. Назовем «событие 1» встречу со столбиком № 0 и «событие 2» встречу со столбиком № 10. Необходимо понимать, что с точки зрения водителя машина не движется, а столбики двигаются ему навстречу.

По определению, действительное время – это время, разделяющее два события, которые происходят в одном месте. Здесь автомобилист всегда находится в одном и том же месте, поскольку двигаются столбики: таким образом, событие 2 происходит в том же месте, что и событие 1. Время, которое автомобилист измеряет между 10 столбиками, является действительным временем, которое мы обозначим T_p .

В первом опыте мы убедились, что в машине времени протекло меньше, чем в системе отсчета дороги. С точки зрения пешехода, чтобы преодолеть 10 столбиков, машине понадобится больше времени, чем T_p . Обозначим T это наблюдаемое время: отношение между T и T_p обозначим γ («гамма»). Таким образом, по определению γ : $T = \gamma T_p$.

Отметим, что с точки зрения пешехода, измеренное время T не является действительным временем, потому что во время событий 1 и 2 машина находится в разных местах.

Действительная длина, сжатая длина

Уточним теперь расстояние между 10 столбиками. По определению, действительное расстояние – это расстояние между двумя *неподвижными* точками. С точки зрения пешехода, столбики неподвижны: для него расстояние между 10 столбиками является действительным расстоянием, которое мы назовем L_p . Вернемся к точке зрения автомобилиста: поскольку для него протекает в γ раз меньше времени для преодоления 10 столбиков, это значит, что 10 столбиков в γ раз ближе друг к другу. Если мы обозначим это расстояние L , то получим: $L = L_p / \gamma$.

Отметим, что с точки зрения автомобилиста, дистанция L не является действительным расстоянием, поскольку столбики не являются неподвижными в его системе отсчета.

Обобщение

Запомним: Время, разделяющее два события, является минимальным в системе отсчета, в котором эти события происходят в одном и том же месте (действительное время). В любой другой системе отсчета время является *расширенным* на некоторый коэффициент γ : $T = \gamma T_p$

Расстояние между двумя точками является максимальным в системе отсчета, где эти две точки неподвижны (действительное расстояние). В любой другой системе отсчета расстояние оказывается сжатым на некоторый коэффициент γ : $L = L_p/\gamma$.

Коэффициент расширения времени и сжатия длины идентичен (это γ).

Уточним также, что сжатие расстояния происходит только *в направлении движения системы отсчета*: при поперечном движении расстояние не меняется.

Коэффициент сжатия и расширения

Остается определить, насколько время расширяется, а расстояние сжимается, то есть определить значение коэффициента γ . Можно вывести следующее выражение: где c – скорость света и v – относительная скорость между двумя системами отсчета.

Умозаключения, позволяющие вывести это выражение, содержатся в *рамке ниже*. Предупреждаем читателя, что если расчеты и не сложны, то сам ход рассуждений довольно непрост.

КОЭФФИЦИЕНТ γ

Чтобы найти выражение γ , мы остановимся на примере вспышки и машин.

Предположим, что две машины едут друг за другом со скоростью 40 м/с относительно дороги. Более того, с точки зрения пешехода у края дороги, эти машины расположены на расстоянии 50 м друг от друга. Представим, что первая машина синяя, а вторая красная (см. схему ниже).

Представим, что в тот момент, когда красная машина проезжает мимо красного столбика, она включает фару: луч света перемещается со скоростью $c = 50$ м/с независимо от системы отсчета. В этот момент синяя машина находится на 50 м впереди красной с точки зрения пешехода. Предположим, что синяя машина проезжает мимо синего столбика. Назовем начальным моментом момент, когда синяя машина проезжает мимо синего столбика.

Сравним время, за которое луч фары достигает синей машины в двух системах отсчета: дороги и машин. Это позволит вывести коэффициент γ . С точки зрения пешехода на дороге, первоначальное расстояние между фарой и синей машиной $d = 50$ м. Кроме того, свет приближается со скоростью c к машине, идущей со скоростью v , то есть он приближается с относительной скоростью $(c - v)$, а время, за которое свет догонит машину, равно $t = d/(c - v)$.

Теперь возьмем точку зрения синей машины, более сложную. В этой системе отсчета машины неподвижны: расстояние d' между двумя машинами, измеренное автомобилистом, является действительным расстоянием. То есть оно в γ раз больше расстояния d , измеренного пешеходом: $d' = \gamma d$.

Представим, что автомобилист смотрит через заднее стекло: он видит красную машину на расстоянии d' , то есть более 50 м позади него.

Где он видит красный столбик в начальный момент? Столбики неподвижны в системе отсчета дороги. С точки зрения пешехода, красный столбик находится на расстоянии $d = 50$ м позади синей машины: это действительное расстояние. А с точки зрения автомобилиста, это расстояние, сжатое на коэффициент γ : $l' = d/\gamma$. Автомобилист видит красный столбик меньше чем за 50 м позади себя.

Так, красная машина находится на расстоянии $d' = \gamma d$ от синей машины, тогда как красный столбик находится на расстоянии $l' = d/\gamma$. Другими словами, в системе отсчета машин красная машина еще не проехала красный столбик! То есть с точки зрения автомобилиста, фара еще не включилась, хотя, с точки зрения пешехода, она только что была включена!

Какое время необходимо, чтобы свет фары достиг автомобилиста, с его точки зрения? Сначала нужно, чтобы красная машина проехала красный столбик (время t'_1), потом – чтобы свет дошел до синей машины (время t'_2).

Расстояние между двумя машинами равно γd , а начальное расстояние от красного столбика до синей машины равно d/γ . Таким образом, начальное расстояние от красной машины до красного столбика равно $\gamma d - d/\gamma$ (см. схему).

То есть чтобы преодолеть это расстояние, красной машине понадобится время

$$t'_1 = \frac{\gamma d - \frac{d}{\gamma}}{v}.$$

Когда красная машина поравнялась с красным столбиком, она включает фару. В этот момент обе машины находятся на расстоянии γd , как и вначале (машины едут с одинаковой скоростью). Таким образом, свету фары понадобится время $t'_2 = \frac{\gamma d}{c}$, чтобы достичь синей машины.

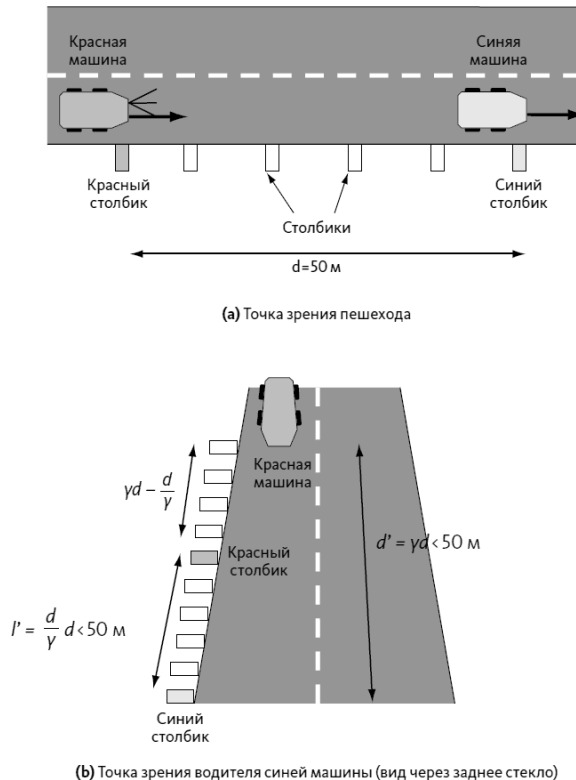
В конечном итоге общее время, прошедшее в системе отсчета машин, составляет:

$$t' = t'_1 + t'_2 = \frac{\gamma d - \frac{d}{\gamma}}{v} + \frac{\gamma d}{c}.$$

Рассчитанное время представляет собой время, разделяющее два события: с одной стороны, синяя машина поравнялась с синим столбиком, с другой стороны, свет фары достиг синей машины. Эти два события происходят с синей машиной: следовательно, они происходят в одном и том же месте в системе отсчета машины. Так, рассчитанное время t' является действительным временем, а значит, время t , с точки зрения пешехода, растянуто в γ раз: $t = \gamma t'$. В конечном итоге мы нашли $t = d/(c - v)$, и только что мы нашли $t = \gamma t' = (\gamma^2 d - d)/v + (\gamma^2 d)/c$.

Сократив выражение, получаем:

$$g = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$



Отметим, что c , конечно, составляет 300 000 км/с, а не 50 м/с, как мы указали в примере. Для скоростей v ниже $c = 300\,000$ км/с мы видим, что $\gamma \approx 1$: в масштабе традиционных скоростей коэффициента расширения или сжатия не существует. Это объясняет, что подобное явление выглядит странным, потому что мы не привыкли наблюдать его в повседневной жизни.

Необходимо понять, что расширение времени и сжатие расстояния не являются простой оптической иллюзией. Возьмем, например, ракету длиной 100 м, которая летит со скоростью, близкой к скорости света. Предположим, что коэффициент γ равен 2. Это значит, что землянин, который видит ракету, измеряет ее длину $100/2 = 50$ м.

Представим, что на пути ракеты землянин установил две временные перегородки: та, что спереди, закрыта, та, что сзади, открыта и расположена на расстоянии 50 м позади первой. Землянин закрывает заднюю перегородку сразу после прохождения через нее ракеты: ракета оказывается в коробке длиной 50 м. Но длина неподвижной ракеты составляет 100 м. Чтобы быть заключенной в коробке меньшего размера, избежав повреждений, ее размер должен был действительно уменьшиться в системе отсчета землянина (см. также врезку выше)...

НЕКОТОРЫЕ ЛОЖНЫЕ ПАРАДОКСЫ

- Представим ракету, которая движется со скоростью, близкой к скорости света, $\gamma = 2$. Если длина неподвижной ракеты 100 м, с точки зрения наблюдающего за ней землянина, она будет составлять 50 м (коэффициент сжатия 2). Таким образом, землянин сможет закрыть ее (на мгновение!) в неподвижной коробке в 50 м длиной: для этого он опустит заднюю створку, когда ракета войдет в коробку, и через мгновение поднимет переднюю створку, чтобы она могла выйти.

Но взглянем на это глазами пассажира ракеты: для него ракета неподвижна, и ее длина 100 м. Коробка же, напротив, перемещается со скоростью, близкой к скорости света, и ее размеры сжаты с коэффициентом $\gamma = 2$ относительно неподвижной коробки, то есть ее длина 25 м.

Каким же образом ракета длиной в 100 м может уместиться в коробке 25 м? На самом деле, с точки зрения пассажира, ракета действительно не влезает в коробку. На практике пассажир увидит, как передняя створка откроется раньше, чем задняя опустится: с его точки зрения, коробка так и не будет закрыта, в то время как землянин видит ее закрытой. Это позволяет ракете пройти препятствие без столкновения.

- Предположим, что эта ракета движется к звезде. С точки зрения землянина, ракета летит со скоростью, близкой к скорости света. Но с точки зрения пассажира, это Земля удаляется с такой скоростью, а ракета стоит на месте.

Таким образом, нет никаких причин для того, чтобы время текло быстрее в одной системе отсчета, чем оно течет в другой, могли бы подумать мы...

Но вспомним, что расширение времени на коэффициент γ происходит относительно действительного времени, которое разделяет два события, *происходящие в одном месте*. Рассмотрим два следующих события: старт ракеты с Земли (событие 1) и прибытие ракеты на звезду (событие 2). Оба этих события происходят с ракетой: следовательно, они происходят в одном месте в системе отсчета ракеты, а не системе отсчета Земли. Действительное время T_p – это время пассажира, а расширенное время коэффициента γ – время землянина. Таким образом, с точки зрения пассажира, между стартом и прибытием ракеты протекло вдвое меньше времени, чем с точки зрения землянина. На Земле пройдет 100 лет, а в ракете только 50.

Если бы мы хотели прийти к обратному заключению, нужно было бы рассмотреть два последовательных события, *происходящие на Земле*. Например, два новогодних праздника, следующие друг за другом с интервалом в год, с точки зрения землянина: с точки зрения ракеты, между ними пройдет два года. Все, что касается ракеты, выглядит замедленным с точки зрения землянина, все, что касается Земли, кажется замедленным с точки зрения пассажира ракеты.

- Наконец, предположим, что космонавт, достигнув далекой звезды, возвращается на Землю. Сколько времени прошло на Земле между стартом ракеты (событие 1) и ее возвращением на Землю (событие 2)? Оба этих события происходят в одном месте, с точки зрения землянина (поскольку они происходят на Земле) и с точки зрения космонавта (поскольку оба они касаются ракеты). Таким образом, речь идет о действительном времени в двух системах отсчета: истекшее время должно бы быть одинаковым... Но это вовсе не так!

Причина в том, что мы рассматриваем сжатие расстояния и расширение времени в системах отсчета, движущихся с постоянной скоростью (по величине и направлению) относительно инерциальной системы отсчета. Следовательно, предыдущие выводы верны только для инерциальной системы отсчета.

Между тем Земля является инерциальной системой отсчета, а ракета нет, потому что ей пришлось придать себе ускорение относительно Земли, а потом повернуть обратно: «симметрия» между двумя системами отсчета нарушена.

Параграф 3 позволит понять, что происходит на самом деле.

Представим также космонавта в этой ракете, который летит к звезде: время полета от Земли до звезды в два раза короче для него, чем для землянина. Если на Земле проходит 100 лет, для космонавта пройдет лишь 50 лет. По прибытии космонавт будет на 50 лет старше, тогда как на Земле пройдет целое столетие (см. также врезку выше)...

3. Непреодолимая скорость

Все более тяжелое ускорение...

Снова возьмем пример с машинами, едущими по прямолинейной дороге в мире, где скорость света равна 50 м/с. До сих пор мы рассматривали машины, которые перемещались с постоянной скоростью относительно дороги. Но предположим, что машина ускоряется с начальной скорости 40 м/с: мы увидим, что происходит в системе отсчета дороги (система 1) и в системе отсчета, которая движется со скоростью 40 м/с относительно дороги (система 2). Обе системы отсчета являются инерциальными.

В системе 2 машина изначально неподвижна (система отсчета, «сопровождающая» машину в движении). Зато она перестанет быть неподвижной, когда начнет ускоряться. Предположим, что это ускорение равно 1 м/с^2 : через секунду скорость машины составляет 1 м/с в системе 2.

Эта секунда является «действительным временем» в системе 2, поскольку машина в нем неподвижна (точнее, приобретенная скорость очень мала). Время, таким образом, расширилось на коэффициент γ , с точки зрения пешехода: когда для водителя проходит секунда, для пешехода проходит γ секунд.

Это значит, что, с точки зрения пешехода, машина приобрела скорость 1 м/с за γ секунд: ускорение, таким образом, выглядит в γ раз меньше, поскольку прошло в γ раз больше времени, чтобы приобрести ту же скорость.

Это значит, что для данной окружающей среды ускорение зависит от данной системы отсчета: оно уменьшается в системах отсчета, где объект движется быстро. Мы записывали дифференциальный закон движения как $\vec{a} = \vec{F}/m$; согласно этому выражению ускорение в γ раз меньше классического ускорения должно выражаться: $\vec{a} = \vec{F}/\gamma m$. На самом деле точная формула немного другая, как уточняется во врезке ниже.

Если скорость объекта низкая, тогда $\gamma \approx 1$ и перед нами классический дифференциальный закон движения. Но введение коэффициента γ позволяет обобщить это выражение для всех скоростей.



НОВЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ

Чем больше скорость приближается к скорости света, тем слабее ускорение для заданной силы, — иначе говоря, скорость становится почти постоянной. С другой стороны, коэффициент γ продолжает расти: на самом деле он стремится к бесконечности, когда скорость приближается к скорости света. Это значит, что при повышенных скоростях сила стремится изменить параметр γ , а не скорость v . Таким образом, точное выражение выглядит следующим образом: $d(\gamma m \vec{v})/dt = \vec{F}$.

Другими словами, сила заставляет меняться произведение $\gamma m \vec{v}$.



ПУТЕШЕСТВИЕ ВО ВРЕМЕНИ

Возьмем тот же пример с космонавтом, который летит к звезде, а потом возвращается на Землю: относительно звезды он сделал разворот в обратную сторону. Предположим, что на Земле прошло 50 лет. Сколько времени прошло с точки зрения космонавта?

Предположим, что фаза разворота ракеты заняла, с точки зрения, космонавта один год. Остаток времени ракета двигалась с постоянной скоростью.

Возьмем точку зрения землянина: речь идет об инерциальной системе отсчета, и, следовательно, мы можем применить результаты, полученные ранее. Для землянина ускорение ракеты было гораздо меньшим, чем для космонавта: понадобилось гораздо больше года для того, чтобы ракета совершила разворот.

Как только ракета возобновила прямолинейное равномерное движение, системы отсчета ракеты и Земли стали одинаковыми (инерциальными). Поскольку нас интересует действительное время в двух этих системах отсчета (ракета улетает с Земли, чтобы потом вернуться на Землю), истекшее время одинаково для ракеты и на Земле в течение этой фазы.

В конечном итоге именно во время фазы ускорения ракеты (разворот) свершилась разница: в общем смысле прошло больше времени с точки зрения землянина, чем с точки зрения космонавта, потому что эта фаза ускорения разрушила симметрию между двумя системами отсчета (инерциальной и не инерциальной).

Поскольку на Земле прошло 50 лет, следовательно, для космонавта прошло меньше 50 лет (предположим, 10 лет): космонавт действительно пережил лишь 10 лет, но, вернувшись на Землю, увидел, что его друзья постарели на 50 лет!

В конечном итоге речь идет ни больше ни меньше, а о путешествии во времени, а не в пространстве, поскольку космонавт вернулся на Землю. Продолжим наши умозаключения дальше: если найти достаточно быстрое средство передвижения, чтобы вернуться назад, можно совершить путешествие за несколько минут, в то время как на Земле пройдет 1000 лет: мы совершили путешествие в будущее.

Заметим, что путешествие в прошлое, разумеется, невозможно...

Скорость света – недостижимый предел

По мере того как объект приближается к скорости света, γ становится очень высоким и стремится к бесконечности: ускорение начинает стремиться к 0. Таким образом, чем больше объект приближается к скорости света, тем окружающая среда становится все более непригодной для ускорения: заданная сила приводит к все более слабому ускорению, вплоть до стремления к 0, когда объект очень близок к скорости света.

Мы видели причину этого: чем ближе скорость объекта к скорости света, тем больше расширяется время относительно времени объекта. Начиная с определенной величины земные годы превратятся для объекта в секунды: с точки зрения пешехода объект кажется утратившим ускорение.

Мы подходим к знаменитому выводу: преодолеть скорость света невозможно. Чем больше мы к ней приближаемся, тем труднее увеличить ускорение хотя бы на миллиметр в секунду.

4. $E = mc^2$

Напоминание о понятии энергии в классической физике

Теперь порассуждаем категориями энергии. Для этого кратко напомним о том, что мы говорили на эту тему в классической физике.

Кинетическая энергия частицы была равна $E_c = \frac{1}{2}mv^2$. Мы определили ее в таком виде, чтобы наилучшим образом соответствовать логике энергии:

- быстро движущийся объект с высокой инерцией обладает высокой энергией: во время столкновения со стеной он произведет большие разрушения;
- высокая температура также соответствует высокой энергии. В действительности, именно температура заставила нас определить кинетическую энергию в виде $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ (а, например, не $E_c = mv$): с этой формулой средняя кинетическая энергия молекул прямо пропорциональна температуре.

Мы определили работу силой в том смысле, что она представляет способность силы заставить измениться кинетическую энергию объекта за данное время. Также мощность силы

соответствует изменению кинетической энергии за единицу времени, которую она смогла придать объекту. Если сила F направлена в сторону перемещения объекта, мы вывели из этого выражение мощности $P = Fv$ (где v – скорость объекта). Поскольку сила F меняет $\frac{1}{2}mv^2$ за единицу времени, мощность $P = Fv$ меняет mv^2 за единицу времени.

Наконец, потенциальная энергия представляет собой просто «потенциальную кинетическую энергию» объекта благодаря присутствию некоторых сил. Понятие потенциальной энергии позволяло общей энергии сохраняться: если кинетическая энергия растет, потенциальная настолько же уменьшается согласно самому определению кинетической потенциальной энергии.

Проблема в том, что не всегда можно определить потенциальную энергию: если нельзя ввести потенциальную энергию, общая энергия не сохраняется.

В частном случае изолированной системы всегда можно определить потенциальную энергию, то есть общая энергия всегда сохраняется.

Энергия массы

Рассмотрим теперь, что это значит в рамках теории относительности, которая обобщает классические случаи.

Сила, приложенная в направлении движения, меняет γmv (а больше не mv) за единицу времени. Чтобы упростить рассуждения, рассмотрим объект, скорость которого очень близка к скорости света: в этом случае $v \approx c$ (скорость становится практически постоянной). Тогда сила заставляет изменить γmc (в этом выражении меняется γ).

Кроме того, сила, действующая в направлении движения, записывается $P = Fv \approx Fc$. Поскольку сила меняет γmc , мощность меняет γmc^2 за единицу времени.

В более общем смысле с помощью вычислений можно продемонстрировать, что какова бы ни была скорость v объекта, общая приложенная мощность равна изменению γmc^2 за единицу времени (даже при низких скоростях).

Таким образом, мощность меняет γmc^2 в рамках теории относительности вместо mv^2 в классическом случае. Между тем в случае низких скоростей теория относительности должна совпадать с классической физикой (иначе это означало бы, что все, что мы говорили до сих пор о классической физике, ложно...).

Совпадают ли γmc^2 и mv^2 при низких скоростях? Для этого нужно вспомнить, что в γmc^2 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$: при низких скоростях мы видим, что формула выглядит очень похоже: $\gamma \approx 1 + v^2/(2c^2)$. В итоге при низких скоростях мы получаем $\gamma mc^2 \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$.

Мы вновь приходим к такой долгожданной классической кинетической энергии, но к которой прибавляется еще одно однородное энергии выражение $E = mc^2$. Этой формулы не было в классической физике, что несколько нам не мешало: на самом деле, частицы обычно обладают определенной массой, и $E = mc^2$ не меняется. Мощность приложенной силы в данном случае лишь меняет $\frac{1}{2}mv^2$, то есть кинетическую энергию частицы.

Роль энергии массы

Но есть ли смысл в этой новой формуле $E = mc^2$? Если она никогда не меняется, ее как бы и не существует... На самом деле опыт показал, что иногда частицы могут превращаться в другие частицы, общая масса которых меньше. Так бывает при ядерных реакциях (об этом мы расскажем подробнее в главе 27).

При отсутствии силы формула $mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$ сохраняется (нет приложенной мощности): если масса уменьшается, тогда уменьшается $E = mc^2$. Это значит, что кинетическая энергия $\frac{1}{2}mv^2$ должна параллельно увеличиваться: и действительно, мы наблюдаем это «рождение» кинетической энергии во время ядерных реакций.

Единственный параметр, способный изменить $E = mc^2$, это масса m (с является фундаментальной константой), поэтому ее называют «энергией массы». Эта энергия весьма значительна: представьте человека весом 80 кг, который внезапно потерял половину своей массы из-за превращения частиц в частицы более легкие. Образовавшаяся при этом кинетическая энергия в 60 000 раз превысила бы мощность ядерной бомбы, сброшенной на Хиросиму. Эта кинетическая энергия передалась бы более легким полученным частицам, и бедняга

в буквальном смысле взорвался бы подобно гигантской ядерной бомбе... Разумеется, частицам необходимы особые условия, чтобы превратиться в более легкие (глава 28)...



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Скорость света является постоянной во всех системах отсчета и равна 300 000 км/с (в вакууме). Таким образом, она становится фундаментальной константой наряду с постоянной Планка.
- Неизменяемость скорости света порождает два важных явления, когда меняется система отсчета. С одной стороны, время расширяется относительно системы отсчета, где события происходят в одном и том же месте. С другой стороны, расстояние сжимается относительно системы отсчета, где две крайние точки неподвижны.
- Расширение времени объясняет, почему нельзя преодолеть скорость света: чем больше мы к ней приближаемся, тем слабее будет ускорение при заданной силе, пока не исчезнет совсем.
- Принимая во внимание релятивистские явления, мощность, определенная в классической физике, меняет теперь не $\frac{1}{2}mv^2$, а γmc^2 . При низких скоростях мы по-прежнему пользуемся формулой $\frac{1}{2}mv^2$, но к которой добавляется элемент mc^2 . Этот элемент по сути является энергией и называется энергией массы.
- Существование энергии массы $E = mc^2$ объясняет, почему при отсутствии приложенной силы потеря массы приводит к увеличению кинетической энергии. Именно это, в частности, происходит при ядерных реакциях.

27. Теория относительности и фундаментальные силы

В предыдущей главе были изложены основы специальной теории относительности. Теперь же мы проанализируем огромный концептуальный вклад, который она внесла в проявление двух фундаментальных сил. В частности, мы увидим, что магнетизм есть не что иное, как релятивистское проявление электростатической силы: величественная система электромагнетизма предстанет еще более связной.

К тому же применение относительности в гравитации позволит перейти к общей теории относительности, которая простирается далеко за пределы специальной (частной) теории относительности. Мы увидим, что пространство-время изогнуто, что приведет к выводу по меньшей мере неожиданному: в данной парадигме силы гравитации не существует. Мы сможем сделать несколько экскурсов в космологию: геометрию и расширение Вселенной, природу темной энергии, которая ускоряет это расширение.

Эта глава венчает собой всю концептуальную красоту законов природы.

1. Магнетизм, проявление релятивизма

Связь между электростатической силой и напряженностью магнитного поля

В начале предыдущей главы мы обнаружили важный парадокс в проявлении напряженности магнитного поля. А еще между электрической силой и напряженностью магнитного поля проявилась явная связь: в обоих случаях речь идет о взаимодействии зарядов. Благодаря теории относительности мы наконец сможем понять происхождение наблюдаемой напряженности магнитного поля.

Опыт 1: неподвижный электрон в присутствии тока

Представим незаряженный электрический провод, по которому проходит ток, и неподалеку поместим электрон. Назовем этот электрон «электрон-тест». Сначала мы будем рассуждать в системе отсчета комнаты: в этой системе отсчета мы предположим, что тестовый электрон изначально неподвижен (→ рис. 27.1).

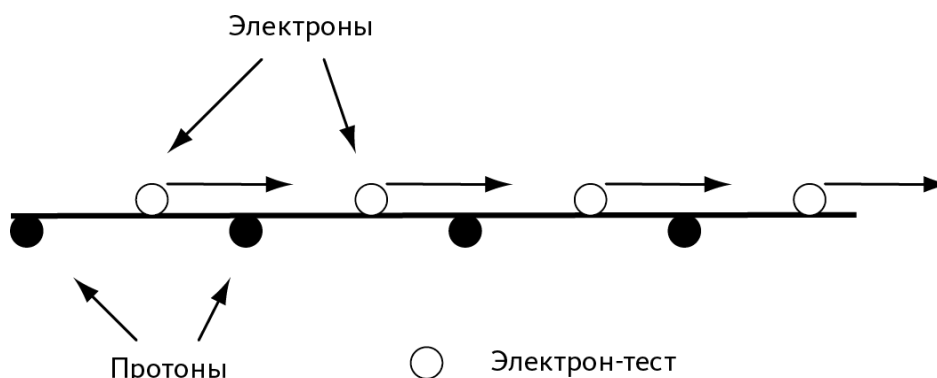


Рис. 27.1 – Провод, по которому проходит электрический ток

Провод не заряжен, а значит, по длине провода сосредоточено равное количество протонов и электронов. Это не мешает, однако, свободным электронам перемещаться, что объясняет присутствие в проводе электрического тока.

Мы можем сразу сделать важное замечание: с точки зрения электрон-теста, протоны в проводе неподвижны, в то время как свободные электроны перемещаются со скоростью v . То есть перед нами пример, похожий на опыт с машинами на дороге: протоны представляют собой стоящие машины, а свободные электроны – машины в движении.

Однако, с точки зрения электрон-теста, наблюдается сжатие длины любого объекта, который перемещается с большой скоростью: свободные электроны выглядят ближе друг к другу в проводе, чем если бы мы наблюдали за ними, «сопровождая» их движение.

Поскольку в системе отсчета комнаты провод не имеет заряда, тем не менее на единицу длины в этой системе отсчета приходится равное количество протонов и электронов: электрон-тест не подвергается воздействию какой-либо силы.

Опыт 2: электрон в движении

Теперь предположим, что мы посылаем электрон-тест с некоторой начальной скоростью в сторону перемещения свободных электронов в проводе (→ **рис. 27.2**).

В системе отсчета электрон-теста свободные электроны двигаются медленнее, поскольку электрон-тест частично «сопровождает» их движение. Кроме того, протоны, которые были неподвижны в системе отсчета комнаты, с точки зрения движущегося электрон-теста, обладают скоростью, направленной «назад» (→ **рис. 27.2.b**)

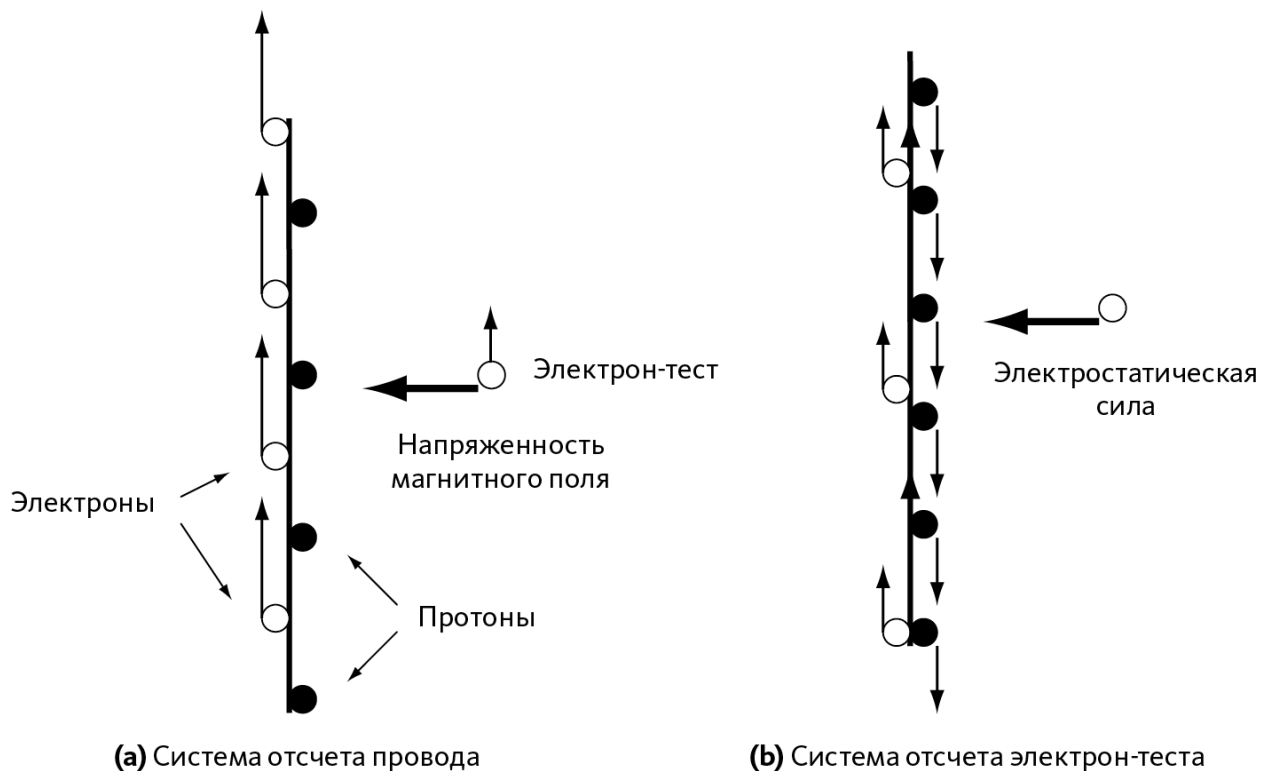


Рис. 27.2 – Напряженность магнитного поля и релятивистский эффект

(а) – точка зрения наблюдателя в комнате: провод неподвижен, следовательно, протоны провода тоже. Свободные электроны провода перемещаются, что создает электрический ток. Поскольку провод не заряжен, число протонов и электронов в проводе одинаково. Классическое проявление напряженности магнитного поля указывает нам, что электрон отклоняется в сторону провода.

(б) – точка зрения электрон-теста: он неподвижен, а провод перемещается назад. Электроны провода в этой системе отсчета перемещаются медленно, а протоны перемещаются назад. Таким образом, электроны находятся дальше друг от друга, а протоны, наоборот, ближе из-за релятивистского эффекта: провод оказывается положительно заряженным. То есть электростатическая сила ускоряет движение электрон-теста к проводу.

Таким образом, приложенная сила одинакова, какой бы ни была система отсчета: напряженность магнитного поля, наблюдаемая в системе отсчета комнаты, является лишь проявлением электростатической силы, которую ощущает электрон-тест при условии принятия во внимание релятивистских эффектов.

Это значит, что явление сжатия длины для свободных электронов уменьшилось и увеличилось для протонов: свободные электроны кажутся дальше друг от друга, чем в системе отсчета комнаты, в то время как протоны кажутся ближе друг к другу. Иными словами, в системе отсчета электрон-теста провод содержит больше протонов, чем электронов, на единицу длины: у провода положительный заряд, в то время как в системе отсчета комнаты заряда у него нет.

Следовательно, электрон-тест притягивается к этому положительному заряду из-за действия электростатической силы: в системе отсчета комнаты мы бы наблюдали, как электрон-тест отклонится от своей траектории в сторону провода, в то время как провод не заряжен.

Между тем о чем же нам говорит напряженность магнитного поля в классической физике? На **рис. 27.2.а** напряженность магнитного поля на уровне электрона направлена в нашу сторону (можно использовать правило правой руки, чтобы это проверить). Направление напряженности магнитного поля всегда можно вывести с помощью правила правой руки: вы можете убедиться, что электрон действительно отклонился к проводу из-за напряженности магнитного поля.

Таким образом, *напряженность магнитного поля в классической физике есть не что иное, как релятивистское проявление электростатической силы. В теории относительности (которая суть лишь обобщение классической физики) напряженность магнитного поля не является фундаментальной силой: одной электростатической силы достаточно, чтобы объяснить все электромагнитные явления.*

Связь между электростатической силой и силой электромагнитной индукции

Классическая точка зрения

Направим теперь электрон перпендикулярно проводу наружу (→ **рис. 27.3**). Классическая физика говорит нам, что электрон-тест отклоняется в направлении перемещения свободных электронов (на **рис. 27.3.a** вверх) под действием напряженности магнитного поля.

Переместимся в систему отсчета, которая сопровождает начальное движение электрон-теста (→ **рис. 27.3.b**): электрон-тест изначально неподвижен в этой системе отсчета, и, следовательно, не может ощущать действие напряженности магнитного поля.

С другой стороны, теперь удаляется провод: когда это происходит, магнитное поле, созданное проводом, уменьшается. Между тем уменьшение магнитного поля приводит к появлению «электромагнитной индукции»: можно проверить, что она равна напряженности магнитного поля, которая действует в системе отсчета комнаты. Иными словами, классическая физика не приводит к парадоксу в этом конкретном случае: одна и та же сила видится то в магнитной форме, то в форме индукции, смотря в какой системе отсчета мы ее рассматриваем.

Но мы сказали, что напряженность магнитного поля является релятивистским проявлением электростатической силы, то есть то же самое должно быть справедливо для силы электромагнитной индукции, поскольку индукция и напряженность магнитного поля суть две грани одной и той же силы. Проверим это с точки зрения теории относительности.

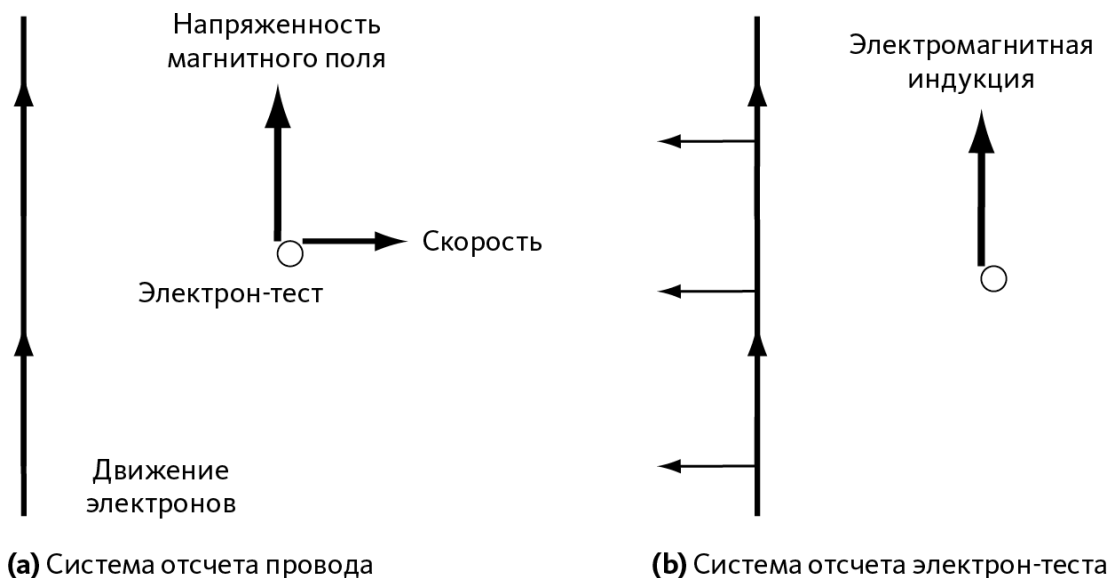


Рис. 27.3 – Напряженность магнитного поля и сила электромагнитной индукции

(a) – точка зрения наблюдателя в комнате: движущийся заряд испытывает действие напряженности магнитного поля со стороны провода, по которому проходит электроток, направленный «вверх».

(b) – точка зрения электрон-теста: на этот раз провод удаляется от электрон-теста, а не наоборот. Магнитное поле уменьшается там, где находится электрон-тест, что вызывает электромагнитную индукцию, направленную вверх.

Таким образом, сила электромагнитной индукции и напряженность магнитного поля выглядят как две грани одной и той же силы.

С точки зрения теории относительности: предварительные размышления об электростатической силе

Чтобы лучше понять, что происходит, мы сделаем обзор свойства, имеющего первостепенную важность в теории относительности. Речь идет о силе, с которой подвижный заряд действует на неподвижный. Электростатическая сила, такая, какой мы ее описали, действительна, если *заряды, создающие эту силу, неподвижны*; между тем релятивистские эффекты могут менять это проявление, если заряды, создающие силу, *подвижны*.

Назовем электроном-источником подвижный заряд, создающий силу, и электрон-тестом – неподвижный заряд, который испытывает ее воздействие (→ **рис. 27.4**). Предположим, что их относительная скорость очень близка к скорости света.

Чтобы определить действующую силу, рассмотрим это через систему отсчета электрона-источника: здесь электростатическая сила выражена традиционно, поскольку заряд, который ее образует, в этой системе отсчета неподвижен.

Рассмотрим два случая: в одном вектор силы направлен в сторону движения (→ **рис. 27.4.a**), в другом он направлен по диагонали к движению (→ **рис. 27.4.b**).

В случае (a) сила стремится увеличить скорость электрона, который уже движется со скоростью, близкой к скорости света. Таким образом, прибавка к скорости ничтожна (на практике сила стремится увеличить коэффициент γ , а не скорость v , которая уже равна c).

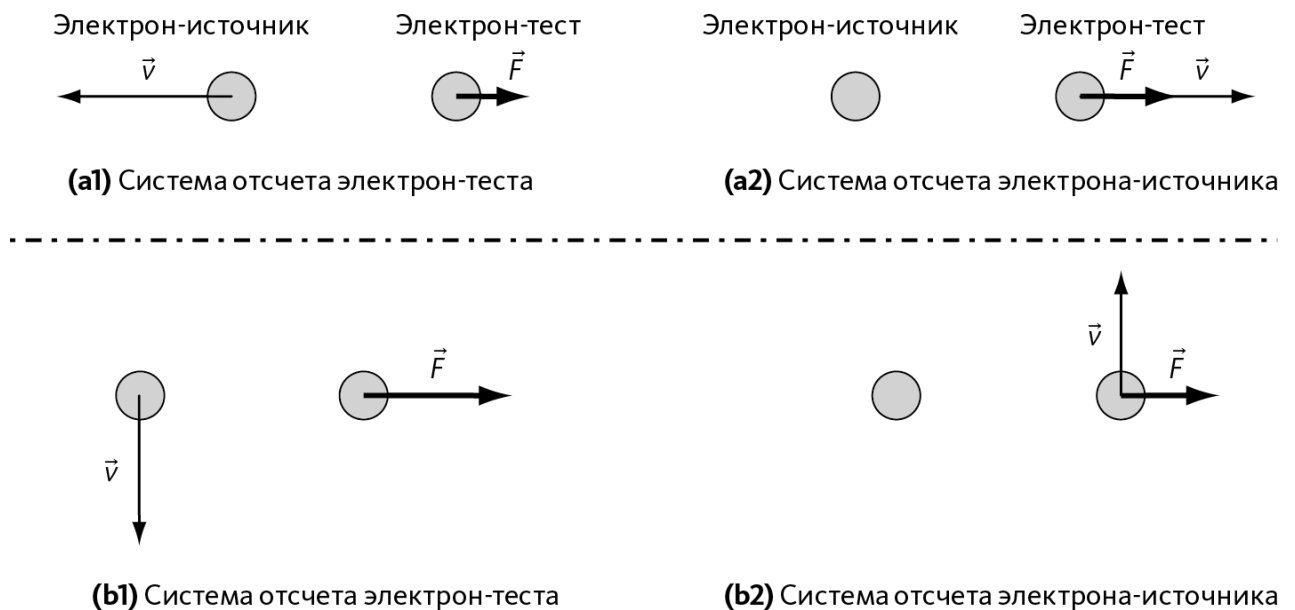


Рис. 27.4 – Сила, действующая на подвижный заряд

(a) – вектор силы совпадает с направлением движения, (b) – вектор силы направлен перпендикулярно движению.

(a2) и (b2) – в системе отсчета электрона-источника сила идентична, потому что применяется ее традиционное проявление (заряд, который ее образует, неподвижен). Зато последствия увеличения горизонтальной скорости очень разные: (a2) – электрон уже движется со скоростью c и уже почти не может ускоряться в этом направлении, в отличие от (b2).

Эта разница означает, что сила в (a1) меньше, чем в (b1) в системе отсчета электрон-теста.

В случае (b) сила стремится разогнать электрон в направлении, где у него нет никакой начальной скорости. Тогда сила стремится увеличить скорость в этом направлении и не старается увеличить коэффициент γ .

Вернемся теперь к начальной системе отсчета (электрон-теста): предыдущие рассуждения позволяют заключить, что повышение скорости, вызванное электростатической силой, выше в случае (b), чем в случае (a), за единицу времени. Между тем в этой системе отсчета применяется «традиционный» закон дифференциального движения, поскольку электрон-тест изначально неподвижен: чем меньше ускорение, тем меньше сила. Это значит, что в этой системе отсчета сила выше в (b), чем в (a) (если точнее, можно показать, что она выше в γ раз).

Запомним, что *электростатическая сила, созданная движущимся зарядом, выше, когда ее вектор направлен перпендикулярно движению, чем когда ее вектор направлен в сторону движения.*

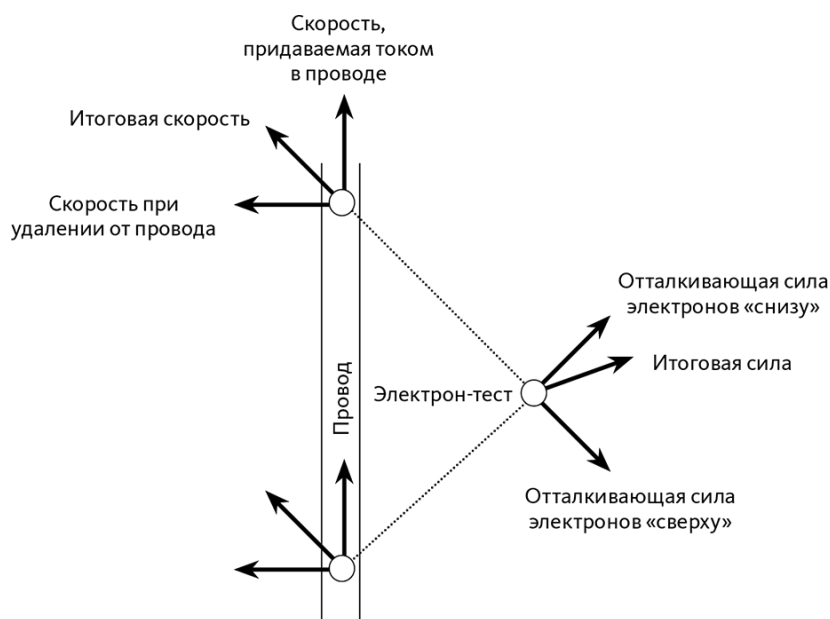
Нарушение симметрии в проводе

Вернемся теперь к примеру с нашим проводом, по которому проходит электрический ток (→ **рис. 27.5**). Рассмотрим это с точки зрения системы отсчета электрон-теста: провод удаляется, в то время как электрон-тест неподвижен. Рассмотрим отдельно движение протонов и электронов в проводе:

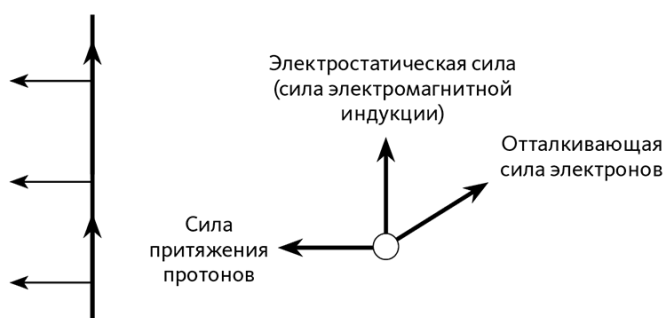
- протоны неподвижны относительно провода, то есть они удаляются вместе с проводом;
- свободные электроны не только удаляются, но еще и перемещаются по проводу.

В отношении электрон-теста их траектория выстраивается «по диагонали» (→ **рис. 27.5.a**).

Перенесемся на уровень электрон-теста и посмотрим на провод в двух разных направлениях, как показано на **рис. 27.5.a**. Если мы смотрим вверх, электроны выглядят удаляющимися. Если мы смотрим вниз, электроны движутся *перпендикулярно* направлению взгляда. Наши предыдущие рассуждения позволяют сделать вывод, что электростатическая сила, исходящая от электронов снизу, больше, чем сила электронов сверху. Таким образом, итоговая отталкивающая сила направлена «вправо вверх» (→ **рис. 27.5.a**). Если мы прибавим притяжение протонов, направленное влево, останется лишь направление вверх (→ **рис. 27.5.b**). Общая сила направлена вверх: именно таков был бы результат действия электромагнитной индукции в классической физике.



(a) Подробная схема сил, вызванных свободными электронами



(b) Общая действующая сила

Рис. 27.5 – Электростатическая сила и релятивистские эффекты

Перед нами система отсчета электрон-теста. Электростатическая сила, исходящая от электронов снизу, больше, чем сила электронов сверху, что связано с тем фактом, что электроны в проводе двигаются «по диагонали» (a). Прибавив притягивающую силу протонов, получаем итоговую силу, направленную вверх, что соответствует электродвижущей силе индукции в классической физике (b).

Таким образом, сила электромагнитной индукции и напряженность магнитного поля являются лишь проявлением электростатической силы, рассмотренным в рамках теории относительности. Если исключить очень маленькие масштабы (атомные ядра), во Вселенной существуют лишь две фундаментальные силы: сила гравитации и электростатическая сила. Электростатическая сила может проявляться в виде напряженности магнитного поля или электромагнитной индукции в зависимости от системы отсчета.

Отражение теории относительности в повседневной жизни

На этом этапе может возникнуть важный вопрос: если релятивистские явления (сжатие длины и расширение времени) проявляются лишь при очень высоких скоростях, почему напряженность магнитного поля проявляется даже при низких скоростях? Поскольку напряженность магнитного поля является релятивистским проявлением электростатической силы, она должна быть смехотворно мала в масштабах традиционных скоростей. И это так и есть! Напряженность магнитного поля ничтожна относительно электростатической силы, релятивистское влияние минимально. Чтобы убедиться в этом, сравним мощность этих двух сил:

- Поместим шар с зарядом 1 кулон на расстоянии 1 м от прямолинейного провода, по которому проходит ток силой 1 ампер. Если мы придаем шару скорость 5 км/с, он ощутит напряженность магнитного поля в 0,001 ньютона.

- Представим теперь, что провод содержит лишь свободные электроны в движении без протонов, которые могли бы нейтрализовать заряд. Предположим, что длина провода 1 м, а диаметр 1 мм. Мощность электростатической силы, которую ощутит на себе шар, будет порядка ста тысяч миллиардов ньютонов.

Другими словами, если напряженность магнитного поля проявляет себя, то только благодаря тому, что материя в основном лишена заряда: заряды протонов и электронов компенсируют друг друга, что гасит электростатическую силу и позволяет проявиться напряженности магнитного поля.

Впрочем, то же самое мы заметили в отношении гравитации: она смехотворно мала по сравнению с электростатической силой, но в крупномасштабном мире она доминирует благодаря тому, что положительные и отрицательные заряды компенсируют друг друга.

На самом деле если напряженность магнитного поля весьма значительна, то только благодаря огромной мощности электростатической силы: даже ничтожное релятивистское проявление электростатической силы остается достаточно большим, чтобы быть заметным в нашем масштабе в виде напряженности магнитного поля. Благодаря этому совсем не обязательно быстро лететь в ракете, чтобы увидеть проявление релятивистских явлений: достаточно взглянуть на действие напряженности магнитного поля в повседневной жизни...

2. Влияние на гравитацию

Гравитационный магнетизм и гравитационные волны

Скрытый магнетизм гравитации

Напряженность магнитного поля является логичным проявлением электростатической силы, если взять в расчет релятивистские эффекты. Между тем гравитация чрезвычайно схожа с электростатической силой: обе они уменьшаются пропорционально квадрату расстояния и в остальном зависят лишь от параметров, свойственных каждому из двух взаимодействующих тел (массы и заряда).

Это значит, что гравитация должна была бы проявляться в виде «напряженности гравитационного магнитного поля» по причине релятивистских эффектов. Почему же такая сила не проявляет себя?

На самом деле выше мы уже говорили о причинах этого: прежде всего сила гравитации смехотворно мала по сравнению с электростатической силой. Что же тогда говорить о силе, представляющей ничтожные релятивистские проявления гравитации?

Массы только накапливаются, не компенсируя друг друга. Так, гравитация никогда не бывает скрытой таким образом, чтобы заставить проявиться магнитные силы.

Гипотетические гравитационные волны

Магнитные явления, связанные с электростатической силой, объясняют также существование электромагнитных волн, которые распространяются в пространстве: мы видели, что речь идет об узком промежутке между электрическими и магнитными колебаниями, которые влияют друг на друга.

Похожие магнитные явления следует связывать с силой гравитации из-за релятивистских эффектов, то есть должны также существовать гравитационные волны. Они должны быть очень похожи на электромагнитные волны, но вместо электростатической силы здесь будет гравитация.

Релятивистские явления существуют благодаря предельной скорости, идентичной во всех системах отсчета скорости света. Но необходимо понимать, что эта скорость присуща не только свету: сжатие длины и расширение времени при приближении к этой скорости влияют на гравитационное взаимодействие, так же как на электростатическое. Так же как электромагнитная волна, гравитационная волна должна обязательно перемещаться со скоростью света c .

Мы видим, что это не является характеристикой электромагнетизма, это универсальная фундаментальная константа, которая влияет на гравитационные явления так же, как и на электростатические.

Как и электромагнитные волны, гравитационные волны переносят энергию. Следовательно, всякая система, излучающая гравитационные волны, должна терять энергию. Возьмем пример: поскольку планеты вращаются вокруг Солнца, они заставляют колебаться гравитационное поле в любой точке пространства с периодом, равным периоду обращения планет. Благодаря гравитационному магнетизму планеты излучают гравитационные волны и теряют энергию: на практике они мало-помалу приближаются к Солнцу исключительно из-за релятивистских эффектов силы гравитации.

Это заключение, кажется, противоречит тому, что мы наблюдаем: за 4,5 миллиарда лет существования планеты Солнечной системы все еще здесь, к счастью для нас! На самом деле расчеты показывают, что время приближения планет к Солнцу гораздо больше возраста Вселенной, то есть оно неизмеримо. Причина опять-таки в слабости гравитации: излученные гравитационные волны переносят смехотворно мало энергии, и Солнечная система, таким образом, теряет ее очень мало.

В свою очередь, в модели электрона, вращающегося вокруг ядра атома, электромагнитные волны переносят много энергии, и электрон, следовательно, должен очень быстро упасть на ядро: именно это позволило нам заключить, что классическая модель была ложной.

Слабая энергия гравитационных волн объясняет, почему мы до сих пор их не обнаружили: только большие гравитационные колебания, произошедшие где-то во Вселенной, такие как столкновение черных дыр, могли бы породить довольно мощные гравитационные волны, которые были бы зафиксированы на Земле. Следовательно, нет ничего удивительного в том, что гравитационные волны по-прежнему остаются за пределами измерений. Вообще-то отсутствие таких волн было бы настоящим сюрпризом; но как все, что касается физики, только эксперимент мог бы это подтвердить или опровергнуть.

Исключенное пространство-время

Помимо сходства существует значительная разница между гравитацией и электростатической силой. Масса тела одновременно соответствует своей гравитационной чувствительности и инерции объекта, в то время как два этих понятия на первый взгляд не имеют ничего общего. Того же самого не скажешь об электростатической силе. Мы уже много говорили об этом в начале книги: именно это подтолкнуло Эйнштейна к тому, чтобы рассматривать гравитацию как «псевдосилу». Эта сила является лишь проявлением искривленности времени и пространства. Теперь мы можем уточнить этот аспект, который составляет основу общей теории относительности.

Гравитация искривляет время

Вспомним наш пример с космонавтом, совершающим путешествие до звезды и обратно на борту ракеты (глава 26, параграф 3). Мы видели, что время протекает не одинаково в разных системах отсчета: например, для путешественника пройдет 10 лет, а для землянина протекут все пятьдесят. В итоге разница в возрасте у молодого путешественника и постаревшего землянина составит 40 лет!

Мы говорили, что разница возникла во время фазы ускорения ракеты (во время ее разворота): когда ракета перемещается с постоянной скоростью, системы отсчета земли и ракеты являются инерциальными и одинаковыми. Зато фазы торможения при прибытии на звезду и ускорения при возвращении длились гораздо меньше с точки зрения космонавта, чем с точки зрения землянина: действительно, во время этих фаз земная система отсчета продолжает оставаться инерциальной, тогда как система отсчета ракеты нет. Мы видим, что нарушение симметрии между двумя системами отсчета приводит к искажению протекшего времени: время течет не одинаково в инерциальной и неинерциальной системах отсчета.

Неинерциальная система отсчета характеризуется присутствием сил инерции: космонавта прижимает к полу, когда ракета набирает скорость или тормозит, из-за силы инерции. Между тем из главы 6 нам известно, что гравитация обладает свойствами, схожими со свойствами силы

инерции: при отсутствии внешнего ориентира пассажир ракеты не может знать, прижат ли он к полу ракеты из-за ускорения или под действием гравитации. Поскольку существование сил инерции (неинерциальная система отсчета), похоже, сопровождается искажением времени, мы имеем право задаться вопросом, не дает ли гравитация такой же эффект.

Чтобы пойти дальше в сравнении сил инерции и гравитации, предположим, что ракета возвращается к Земле не благодаря своим моторам, а благодаря воздействию крупных небесных тел, как показано на схеме ниже.

Будет ли ракета прибегать к помощи гравитации или своих моторов, ее ускорение будет одинаковым. Это ускорение в $\sqrt{2}$ раз меньше с точки зрения землянина, нежели космонавта, с точки зрения землянина проходит больше времени, чем с точки зрения космонавта: разница в возрасте между ними по прибытии ракеты та же, независимо от способа продвижения вперед.

И все же два способа движения имеют важное отличие с точки зрения космонавта. При действующих моторах ракеты космонавта во время ускорения прижимает к полу. В то время как в другом случае космонавт постоянно остается в состоянии невесомости: на самом деле небесное тело придает ракете и пассажиру такое же ускорение (см. главу 2). Вспомним, что по этой же причине астронавты всегда пребывают в состоянии невесомости на космических станциях, летающих по орбите вокруг Земли.

Другими словами, астронавту кажется, что он находится в ракете *без ускорения*, затерянной в межзвездном пространстве, то есть в инерциальной системе отсчета.

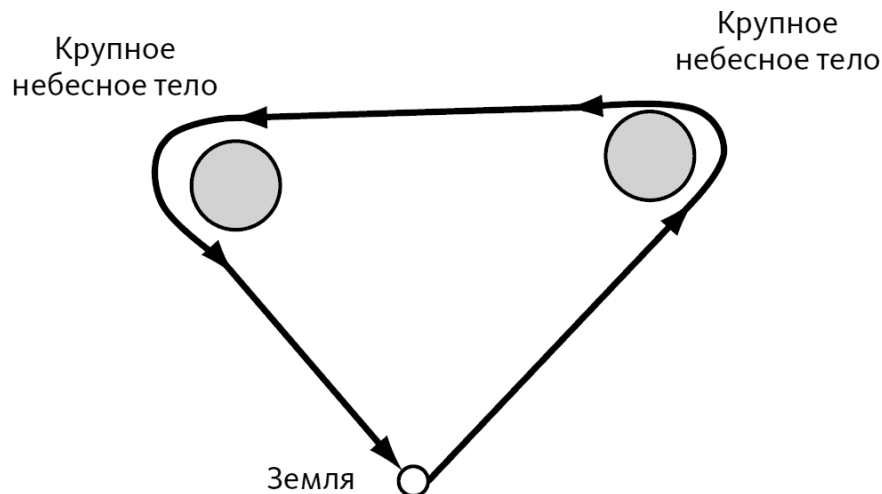


Рис. 27.6 – Пример пути с использованием «гравитационной помощи»

С его точки зрения как объяснить искажение времени? Достаточно допустить, что простое присутствие крупного небесного тела деформирует время относительно землянина. Космонавт может тогда продолжать считать ракету инерциальной системой отсчета, учитывая искажение времени гравитационным полем небесного тела.

Кроме того, тесные связи между пространством и временем заставляют предположить, что небесное тело одновременно искажает и пространство вокруг себя: чуть позже мы это проверим.

Обобщим две точки зрения:

- Землянин представляет пространство плоским. Он видел, что ракета ускоряется в этом плоском пространстве. Из этого он делает вывод, что ракета не является инерциальной системой. Зная о теории относительности, он делает вывод об искажении времени для ракеты.

- Космонавт считает ракету инерциальной системой отсчета, следующей по прямолинейной равномерной траектории в искривленном пространстве-времени. Он предполагает, что причина этого искривления – гравитационное поле крупного небесного тела. С этой точки зрения силы гравитации больше не существует (ракета не испытывает воздействия какой бы то ни было силы): гравитация проявляется только как искривление пространства-времени.

Такая точка зрения представляет собой ядро общей теории относительности. Чем сильнее гравитационное поле, тем больше искажается время. В предыдущем примере чем быстрее летит

ракета, тем выше коэффициент искажения времени γ , тем больше она нуждается в сильном гравитационном поле, чтобы проделать свой вираж.

Также мы видим, что гравитация искажает время, *расширяя* его. Рядом с крупным небесным телом каждая секунда растянута: между двумя событиями – появлением ракеты рядом с массивным небесным телом и возвращением ракеты – проходит меньше времени с точки зрения ракеты, чем с точки зрения землянина, поскольку каждая секунда «больше». Возникает неожиданный результат: космонавт стареет на 10 лет, в то время как землянин стареет на 40.

Другими словами, простое пребывание рядом с массивным небесным телом в течение нескольких дней позволяет совершить путешествие в будущее: космонавту покажется, что прошел лишь год, тогда как на Земле пройдет 1000 лет... Так, в частности, происходит рядом с черными дырами, где гравитационное поле очень сильно.



СЛОЖНЫЕ ЗАДАЧИ GPS И ГАЛИЛЕО

Чтобы определить свое местонахождение на Земле, достаточно, чтобы спутник послал сигнал системе GPS: зная время отправки сигнала со спутника и приема сигнала на GPS, легко определить расстояние до спутника. Прделав ту же операцию с трех спутников, можно рассчитать три параметра местоположения (широту, долготу, высоту), при условии, что известно точное расположение спутников.

Именно здесь вмешиваются релятивистские явления, искажающие этот прекрасный алгоритм: учитывая огромную скорость света (восемь витков вокруг Земли за секунду), время пути занимает доли секунды. Между тем, поскольку спутник летает в космосе, на него гравитационное поле действует не с такой силой, как на Земле: время спутника сжато по сравнению с земным временем, что означает, что его внутренний хронометр отмеряет время более длительными интервалами, чем часы GPS (каждая секунда сжата, следовательно, число отмеренных секунд больше). Этого достаточно, чтобы измерение было неверным: например, микроскопическая ошибка в одну миллионную секунды приведет к искажению результата в 300 м. Чтобы добиться разрешения в 1 м, необходимо принимать во внимание эти релятивистские явления. Что и сделано в американской системе GPS и будущей европейской системе Галилео.

Отметим, что существует также второй релятивистский феномен: поскольку спутник движется по орбите с огромной скоростью, его время растягивается по сравнению с неподвижным GPS. Но этот феномен проявляется слабее, чем действие гравитационного поля.

Гравитация искажает пространство

Каким образом такой сферический объект, как Земля, искажает пространство-время вокруг себя? Чтобы это понять, представим карусель, которая вращается с огромной скоростью. Перенесемся в космос и посмотрим на гигантское вращающееся кольцо, чтобы создать искусственную гравитацию (научная фантастика изобилует примерами космических станций такого типа...): из-за центробежной силы люди внутри прижаты к внешнему краю кольца. Если тщательно рассчитать скорость кольца, можно создать ускорение 10 м/с^2 : тогда человек сможет ходить по кольцу, как по Земле.

Мы снова имеем дело с неинерциальной системой отсчета, несколько отличной от системы ускоряющейся ракеты. То есть здесь тоже следует ожидать искажения пространства-времени. Понять его просто: когда скорость приближается к скорости света, расстояние сжимается в направлении движения. Здесь движение «орторадialное», то есть вдоль кольца: в данном случае уменьшается окружность кольца. Другими словами, кольцо кажется короче с точки зрения того, кто наблюдает за его вращением, чем для того, кто находится внутри. Но радиус кольца не меняется, поскольку в радиальном направлении нет никакого движения. Другими словами, радиус кольца R остается постоянным, в то время как окружность $2\pi R$ уменьшается! Похоже, перед нами настоящий парадокс.

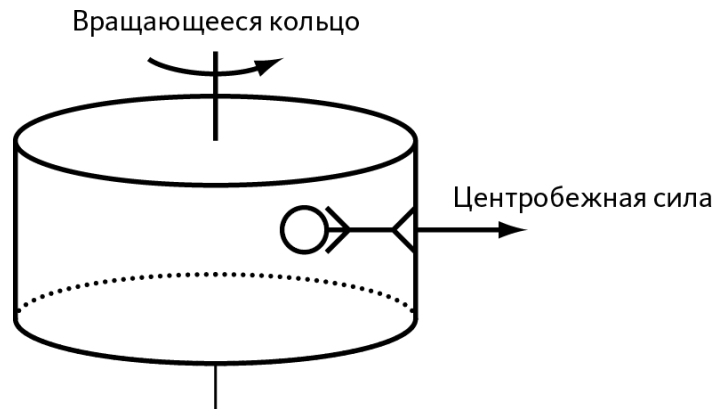


Рис. 27.7 – Устройство с искусственной гравитацией

Существует лишь один способ его понять: необходимо признать, что пространство не является плоским. В самом деле, отношение периметра окружности к его диаметру равно π только в евклидовом пространстве, то есть плоском: значение $2\pi R$ для окружности кольца не верно, если пространство искривлено... **Рис. 27.8** иллюстрирует это: если мы нарисуем окружность на сфере, ее радиус будет больше, а периметр меньше, чем у окружности на плоской поверхности. Именно это мы наблюдаем на нашем космическом кольце: его вращение создает сферическое искривление пространства-времени, объясняющее сжатие окружности при постоянном радиусе.

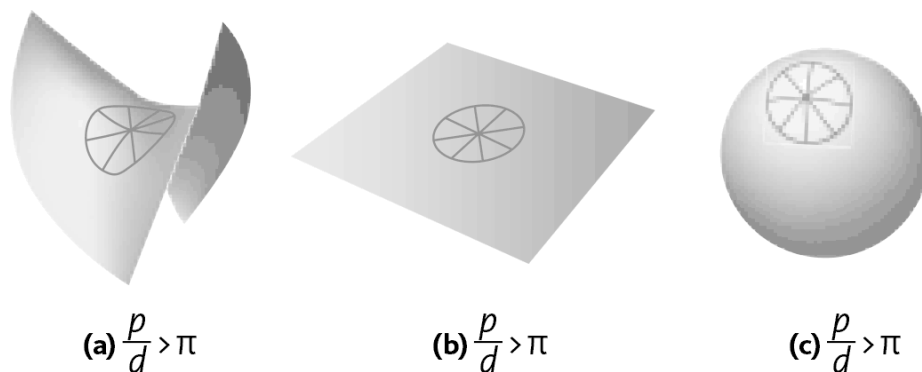


Рис. 27.8 – Иллюстрация трех разных типов геометрии

Отношение периметра окружности p к диаметру d равно π только на плоской поверхности (евклидова геометрия: рис. в центре). На сферической поверхности (рис. справа) периметр меньше, а на «гиперболоидной» поверхности (рис. слева) больше.

Мы также можем представить ситуацию, когда отношение периметра к радиусу окружности больше (а не меньше) π : так бывает, если пространство искривляется на манер лошадиного седла, а не в виде сферы, как показано на **рис. 27.8.а**. Уточним также, что на этих схемах мы изобразили поверхность в двух измерениях, которая искривляется в третьем: не следует забывать, что в реальности Вселенная является трехмерным пространством, которое, следовательно, искривляется в четвертом измерении (что невозможно изобразить).

В итоге вращающаяся система отсчета вызывает искривление пространства-времени настолько, насколько велика скорость ее вращения и чем больше вызванная этим гравитация. Точно так же присутствие массивного материального тела искривляет пространство-время тем больше, чем больше его гравитация. Как мы знаем из главы 4, именно это искажение заставляет отклоняться объекты, проходящие рядом: в искривленном пространстве-времени больше

не нужна гравитация, чтобы объяснить отклонение их траектории. Таким образом, само существование гравитации зависит лишь от точки зрения: это «псевдосила».

Последствия в масштабе Вселенной

Геометрия Вселенной

Деформация пространства и времени была неоднократно подтверждена опытами: теоретическое предсказание Эйнштейна стало реальностью. Последствия этого являются основополагающими повсюду, где материя способна вызывать сильную гравитацию, то есть в основном в той области, которой занимаются астрофизика и космология.

В частности, способность пространства-времени искажаться означает, что сама Вселенная не является плоской. Она может искривляться в другом измерении, отличном от трех космических и временного измерений, то есть в пятом измерении. Такое количество измерений невозможно изобразить наглядно: самое простое представить Вселенную в двух измерениях (забудем про третье пространственное измерение и про время) в виде волнистого листа, что позволит представить ее искривление в пятом измерении.

В таком виде Вселенная похожа на бугристый ковер из-за бесконечного числа массивных тел, которыми она наполнена. Абстрагируемся от всех бугров и рассмотрим общую форму ковра. В масштабе нескольких миллиардов световых лет возможны три вида геометрии: или он полностью плоский, или формой он похож на лошадиное седло, или искривляется в виде сферы (три эти геометрии мы видим на **рис. 27.8**).

В последнем случае это значит, что Вселенная сворачивается так же, как закругляется поверхность Земли, чтобы образовать шар: если мы идем все время прямо, не сворачивая с пути, мы очутимся на месте старта, так же как мы вернемся в начальную точку, если идем все время прямо по поверхности Земли. Таким образом, можно совершить кругосветное путешествие по Вселенной, как совершают его на Земле.

И наоборот, если Вселенная плоская или подобна формой лошадиному седлу, это значит, что она простирается в бесконечность. Наблюдения показывают, что в масштабе обозримых расстояний (примерно 13,7 млрд световых лет) Вселенная совершенно плоская, то есть простирается в бесконечность.

Расширение Вселенной

Теория относительности допускает и другие феномены в космологии. Поскольку расстояния могут меняться в присутствии массы, это значит, что пространство-время может сжиматься или расширяться в масштабе Вселенной. Рассмотрим часть Вселенной и представим, что все расстояния расширяются (**→ рис. 27.9**): за заданное время два далеких объекта отдаляются друг от друга больше, чем два близких объекта. Именно это наблюдают астрономы: чем дальше галактика, тем быстрее она от нас отдаляется. Таким образом, Вселенная расширяется.

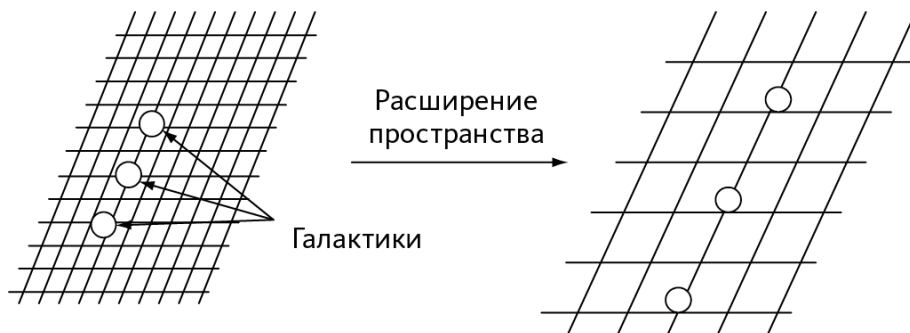


Рис. 27.9 – Расширение Вселенной

Чтобы представить это схематично, трехмерная Вселенная была изображена в двух измерениях в виде сетки. Все точки Вселенной удаляются друг от друга: сеть расширяется.

В частности, все галактики имеют тенденцию удаляться друг от друга из-за этого расширения. И наоборот, чем дальше идет время (справа налево), тем меньше квадратики сетки, пока совсем не сомкнутся (Большой взрыв). Но Вселенная бесконечна, ее размер не стремится к нулю: на рисунке квадратики становятся все меньше, но они продолжают покрывать пространство.

Другими словами, мы движемся к бесконечному числу квадратиков ничтожного размера...

С течением времени это значит, что галактики должны все больше приближаться друг к другу, пока все частицы материи не наложатся друг на друга. Тогда наступит эпоха знаменитого Большого взрыва, с которого началось наблюдаемое расширение. Отметим, что, если Вселенная бесконечна, она была таковой и в первые мгновения Большого взрыва: по мере того, как мы приближаемся к Большому взрыву, размер Вселенной уменьшается, оставаясь бесконечным! Мы подошли к ситуации, которую трудно изобразить, поскольку в ней соединяются две бесконечности: бесконечно огромная Вселенная, в которой расстояние между частицами бесконечно мало. Даже квантовая физика и общая теория относительности не способны решить эту задачу, где легко смешиваются бесконечности, приводя к противоречиям: назрела нужда в новых теориях для изучения таких экзотических ситуаций (не только Большой взрыв, но еще и черные дыры). Например, теория струн, рассматривающая частицы квантовой физики в виде струн, а не в виде точек, не допускает уменьшения квадратиков с предыдущего рисунка меньше размеров струны, что противоречит теории бесконечной плотности насыщения.

Темная энергия

Вернемся в настоящее. Итак, Вселенная расширяется, а галактики удаляются друг от друга. Из-за гравитационного притяжения массивные объекты стремятся помешать этому растущему удалению. Подобно предмету, чья скорость уменьшается, если его подбросить вверх (то есть когда он удаляется от Земли), скорость удаления галактик должна мало-помалу снижаться: иначе говоря, расширение Вселенной должно замедляться из-за присутствия в ней массивных материальных объектов.

Подтверждают ли наблюдения это замедление? Ответ – нет: расширение Вселенной не только не замедляется, оно ускоряется! Все происходит так, словно во Вселенной существует невидимая отталкивающая материя, которой гораздо больше, чем обычной притягивающей материи. Сам вакуум, кажется, обладает отталкивающей силой: ее называют «темная энергия», происхождение которой неизвестно и по сей день.

Отметим, что Альберт Эйнштейн предсказал существование этой темной энергии... по ошибке. На самом деле вначале он не представлял себе, что Вселенная может расширяться и сжиматься: она должна быть стабильной, что означало, что отталкивающая сила должна противодействовать притягивающей силе массивных объектов. Таким образом, он ввел знаменитую космологическую постоянную в свои уравнения, которая была удалена, когда было открыто расширение Вселенной (равновесие между притягивающими и отталкивающими силами потеряло смысл)... а потом ввели ее снова, когда было открыто ускорение этого расширения! Сегодня мы знаем, что космологическая постоянная не равна нулю, но остается понять ее происхождение.



ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

В настоящее время космология столкнулась с двумя загадками, которые не следует путать между собой: темной материей и темной энергией.

Чтобы понять сущность темной материи, обратимся к Солнечной системе: чем больше Солнце, тем быстрее должны вращаться планеты, чтобы оставаться на орбите и не упасть в его

печь. Таким образом, наблюдая за скоростью планет, можно вычислить массу Солнца. С другой стороны, чем Солнце больше, тем оно тяжелее и ярче: измерение его светимости – другой способ измерить его массу.

В случае с Солнцем два метода измерения дают адекватные результаты. Но в масштабе галактики это совсем не так: звезды вращаются вокруг центра галактики с очень высокой скоростью, которая свидетельствует о значительной массе, гораздо большей, чем о том говорит светимость галактики. Следовательно, существует скрытая, несветящаяся, то есть темная, масса. Ошибка становится очевиднее, когда мы увеличиваем масштаб и рассматриваем скопление галактик. В целом 85 % притягивающей материи Вселенной является невидимым, и происхождение ее неизвестно.

Проблема в том, что это изобилие темной материи должно было бы стремиться замедлить расширение Вселенной, а не ускорять его. Это значит, что «темной энергии», которая является, наоборот, отталкивающей, должно быть так же много: она должна не только доминировать над притяжением обычной материи, но и над притяжением темной материи тоже. В целом 68 % энергии Вселенной составляет темная (отталкивающая) энергия, против 32 % притягивающей энергии (обычной материи + темной материи). В итоге лишь 5 % Вселенной состоит из известной формы энергии...

Заключение

Теория относительности Альберта Эйнштейна явилась венцом замечательно безупречной системы классической физики:

- Магнетизм является релятивистским проявлением электростатической силы. Таким образом, сложная совокупность электромагнетизма (а значит, и оптики) оказывается лишь выражением этой силы, представленной в главе 3.

- При рассмотрении искривленного пространства-времени сила гравитации исчезает без следа! Материя попросту искривляет пространство-время: тела притягиваются не под действием какой-то силы, а просто следуют в пространстве-времени своим путем. Таким образом, явление гравитации отождествляется с совокупностью искривлений материей пространства-времени.

Кроме того, отметим, что все явления классической физики (главы 1–21) происходят от воздействия гравитации и/или электростатической силы на движение элементарных частиц. Что касается квантовой физики (главы 22–25), она лишь меняет облик этих элементарных частиц: они перестают быть точечными во время своего распространения, а занимают все пространство подобно волне. Сам спин, новое понятие, введенное квантовой физикой, оказывает чисто электромагнитное воздействие, а значит, электростатическое. На этом этапе нам удалось свести фундамент физики к размерам почтовой марки! Тем не менее остаются некоторые более сложные явления, которые не объясняются гравитацией или электростатикой. Существуют еще две дополнительные фундаментальные силы, которые играют роль лишь в очень малых масштабах, внутри атомных ядер. Это станет темой нашей последней главы.



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Напряженность магнитного поля и сила электромагнитной индукции являются проявлением электростатической силы, если принять во внимание релятивистские эффекты. Таким образом, одной электростатической силы достаточно, чтобы объяснить всю, довольно тяжелую, электромагнитную систему классической физики. В масштабах более крупных, чем атомные ядра, гравитация и электростатика являются единственными фундаментальными силами взаимодействия.

- Релятивистские эффекты, приложенные к гравитации, должны привести к существованию гравитационных волн, перемещающихся со скоростью света, в той же степени, что и электромагнитные волны. Слабая мощность гравитации пока что оставляет эти явления неизмеримыми.

- Материя искажает пространство и время вокруг себя. В частности, чем сильнее гравитационное поле, тем больше растянуто время. Искривление пространства-времени заставляет отклоняться перемещающиеся рядом тела.

- Общая теория относительности допускает переменчивую геометрию Вселенной. На практике обозримая Вселенная представляется плоской, и ее расширение ускоряется. Это ускорение происходит из-за отталкивающей силы, названной темной энергией, чье происхождение остается неизвестным.

28. Ядерная физика

В этой последней главе мы погрузимся в еще более микроскопические масштабы и рассмотрим атомное ядро, в сотни тысяч раз меньше самого атома. Мы познакомимся с новыми частицами и новыми взаимодействиями между ними. Прекрасное единство классической физики покажется нам несколько неустойчивым.

До сих пор мы знали лишь три частицы материи: протоны, нейтроны и электроны. Их жизнью управляли две очень похожие силы: гравитация и электростатическая сила. Эти две силы переносятся двумя частицами-вестниками: соответственно, гравитоном (гипотетически) и фотоном.

Внезапно появятся совершенно новые экземпляры, которые усложнят эту прекрасную систему, а процессы внутри ядра покажутся очень странными по сравнению с воздействием двух старых добрых сил. Теория, призванная объяснить классификацию новых частиц и их взаимодействие, называется «стандартной моделью». Помимо Сильного и Слабого ядерного Взаимодействия мы представим пятое фундаментальное взаимодействие с интригующими последствиями: поле Хиггса, существование которого было подтверждено в ускорителе частиц LHC в 2012 году. Понимание законов природы в этом масштабе еще далеко не закреплено, что оставляет для фундаментальной физики массу прекрасных тем для исследований...

1. Связь внутри ядра и сильное взаимодействие

Кварки, составляющие протона и нейтрона

Необходимость новой силы

Мы узнали, что ядро содержит протоны и нейтроны, сосредоточенные в очень ограниченном пространстве, в то время как облака электронов в сотни тысяч раз больше и занимают все пространство атома. Возникает закономерный вопрос: если протоны имеют положительный заряд, они должны отталкиваться под действием электростатической силы вместо того, чтобы слипаться в ядре вместе... И нейтроны, не имеющие заряда, никак не мешают этому отталкиванию.

То есть необходимо вообразить другую силу, которая противодействует электростатической силе в масштабе атомного ядра. Это не может быть гравитация, поскольку она на этом уровне слишком слаба. Перед нами явно совершенно новая притягивающая сила, действующая лишь в очень малых масштабах. Речь идет о сильном взаимодействии. Чтобы понять всю суть этой новой силы, необходимо проникнуть внутрь протона.

Путешествие внутрь протона и нейтрона

Несмотря на то, что можно было бы подумать, протон *не является* элементарной (неделимой) частицей, в то время как электрон является ею (пока не докажут обратного...)! В 1968 г. к протону направили очень узкий пучок электронов. Благодаря электростатическому притяжению протон, «бомбардируемый» таким образом, отклоняет электроны в разных направлениях в соответствии с расстоянием, на котором они встречаются с протоном. Говорят, что протон «рассеивает» электроны в разные стороны. Опыт показал, что наблюдаемое рассеивание не могло соответствовать существованию одного точечного заряда, но объяснялось, если *три* различные точки в пространстве рассеивали электроны.

Таким образом, протон совершенно очевидно состоял из трех частиц, что лишь подтверждало теоретические предсказания, сделанные на этот счет четырьмя годами ранее. Частицы называли кварками. Нейтрон, чья масса очень близка к массе протона, также состоит из трех кварков.

Кварки протонов и нейтронов не все одинаковы: различают кварки *up* (обозначаются *u*) и кварки *down* (*d*). Кварки *u* содержат $2/3$ заряда протона, а кварки *d* содержат $1/3$ (заряд отрицательный). Таким образом, объединение двух кварков *u* и кварка *d* содержит заряд протона ($2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$): протон является совокупностью этих трех кварков (*u, u, d*). Объединение двух кварков *d* и одного кварка *u* составляет нейтральный заряд ($-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$) – таков состав нейтрона, состоящего из кварков (*d, d, u*) (→ **рис. 28.1**).

Мы видим, что нейтрон и протон – две очень похожие частицы: оба они называются нуклонами (от *лат.* *nucleus* – ядро).

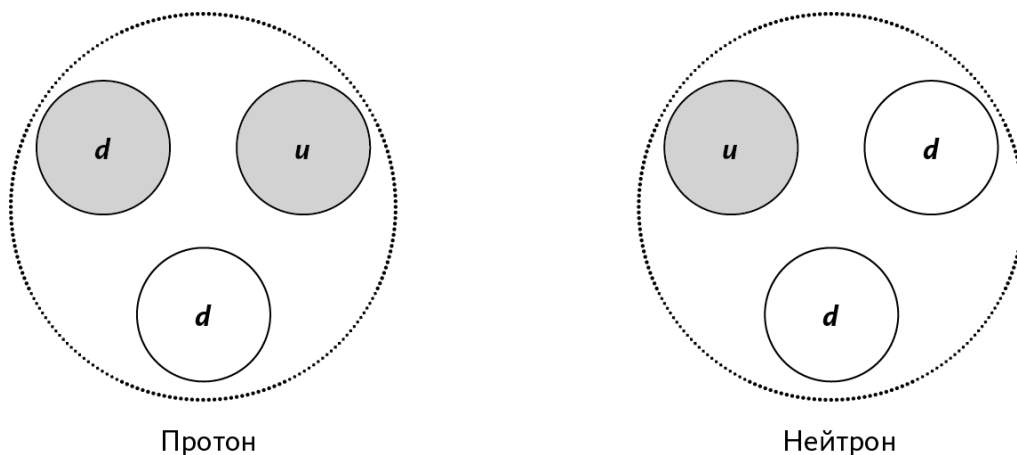


Рис. 28.1 – Символическое изображение протона и нейтрона

Связь внутри протона и нейтрона

Сильное взаимодействие касается кварков. В противоположность электростатической силе, заряды которой бывают двух типов – положительный и отрицательный, а также гравитации, у которой масса лишь одного типа (всегда положительная), сильное взаимодействие управляет параметрами, сходными с массой и зарядом, которые бывают *трех* типов. По аналогии с дополнительными цветами эти три типа названы «красный», «зеленый» и «синий». Таким образом, в сильном взаимодействии «цвет» играет роль заряда для электростатической силы и массы для гравитации (разумеется, этот «цвет» не имеет ничего общего с привычным смыслом этого слова).

Эти три цвета взаимно притягиваются, образуя системы красный+зеленый+синий. По этой причине кварки соединяются по трое: в протоне есть «красный» кварк, «зеленый» кварк и «синий» кварк. То же самое у нейтрона (→ **рис. 28.2**).

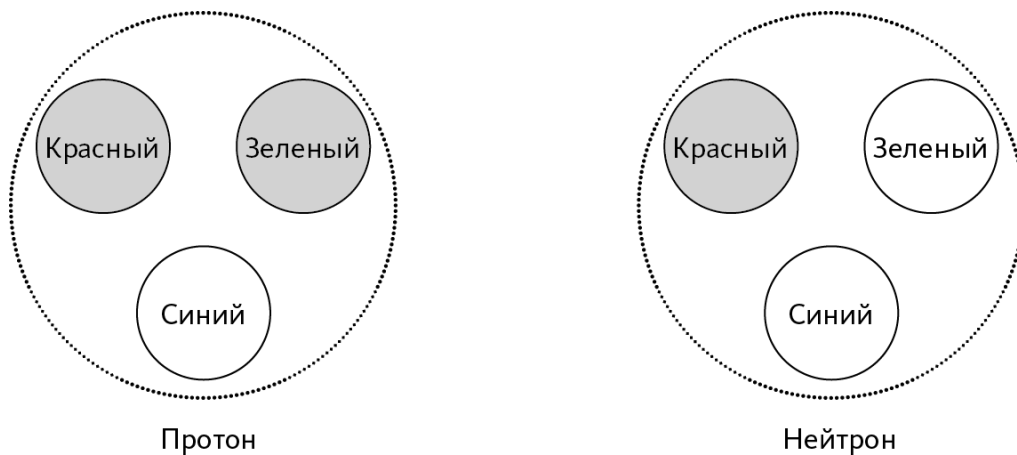


Рис. 28.2 – «Цвет» кварков

Кварки и обозначены темным цветом, кварки d – светлым. Все три кварка нуклона (нейтрона или протона) имеют разные цвета. Отметим, что эти цвета постоянно меняются между тремя кварками.

В электростатике объединение двух противоположных зарядов «плюс» и «минус» образуют общий нейтральный заряд. То же самое в сильном взаимодействии, соединение трех цветов красный+зеленый+синий образует нейтральный заряд: говорят, что итоговый цвет «белый» (отметим поэтичность, присущую физикам в этой области). Таким образом, четвертый кварк не может прицепиться к трем первым, поскольку сильного взаимодействия уже нет («белый» цвет = отсутствие заряда сильного взаимодействия).

Отметим сходство между электростатической силой и сильным взаимодействием: в сильном взаимодействии есть три типа цвета, что объясняет объединение кварков по три. Аналогично существует два типа зарядов в электростатике, что объясняет их объединение по два в атоме (одному электрону соответствует один протон)...

Притяжение между нуклонами

Итак, мы хорошо понимаем стабильность протона и нейтрона как совокупности трех кварков. Но возникает вопрос: поскольку протоны все «белого» цвета, между ними не должно быть никакого сильного взаимодействия. Они все-таки должны отталкиваться друг от друга под действием электростатической силы, вместо того чтобы скапливаться в ядре. Вопрос, заданный в начале параграфа, остался без ответа...

На самом деле происходит в точности то же самое, что и в жидкости на молекулярном уровне: молекулы не заряжены, и все-таки они притягиваются друг к другу под действием электростатической силы. Причина в том, что они состоят из зарядов «плюс» и зарядов «минус», которые не все расположены в одном месте. Следовательно, в любой момент существуют места молекулы, где больше зарядов «плюс» или зарядов «минус». Таким образом, сторона «плюс» притягивается стороной «минус» другой молекулы: в целом незаряженные, молекулы все-таки притягиваются друг к другу.

Так же обстоит с протонами и нейтронами: несмотря на белый цвет, они состоят из красного, зеленого и синего кварков, которые расположены в разных местах. То есть протоны могут так же притягиваться друг к другу, как и молекулы в жидкости (→ **рис. 28.3**).

Между тем сильное взаимодействие между кварками в протоне весьма значительно: сильного взаимодействия между нуклонами ядра достаточно, чтобы компенсировать электростатическое отталкивание между протонами ядра, *хотя у нуклонов и «белый» цвет*. Это объясняет устойчивость ядер.

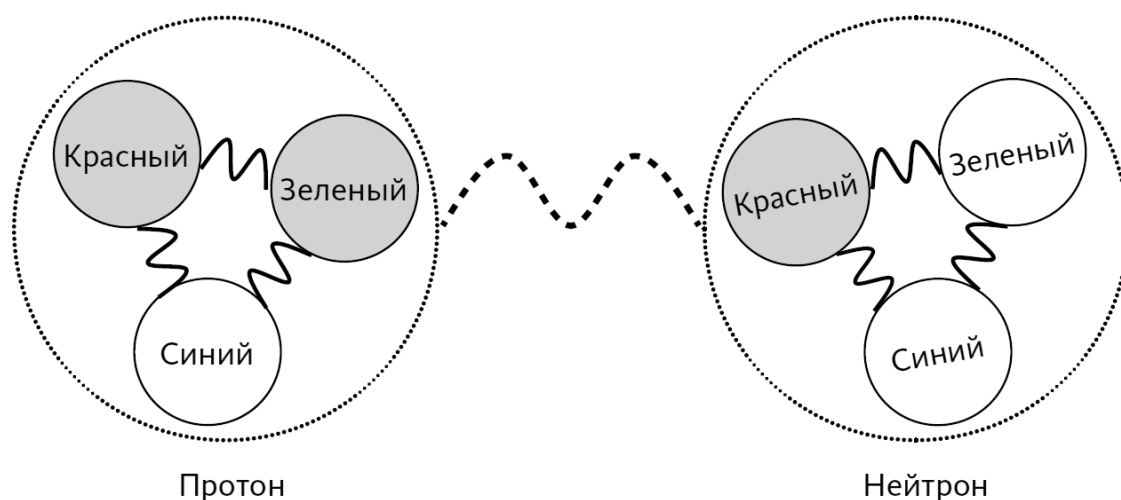


Рис. 28.3 – Сильное взаимодействие между нуклонами

Сильное взаимодействие между кварками в нуклоне представлено «пружинкой». Несмотря на белый (нейтральный) цвет, нуклоны могут притягиваться между собой с помощью кварков, которые они содержат.

Из этого вытекает важное свойство силы между нуклонами: притяжение быстро слабеет на расстоянии. При взгляде издали кварки нуклонов выглядят сгруппированными в одном месте: цвет воспринимается белым, и притяжение исчезает. Надо достаточно приблизиться, чтобы воздействие трех кварков не компенсировало друг друга.

Аналогично с молекулами: притяжение между ними уменьшается так же быстро, если смотреть издали – молекула выглядит нейтральной. Но вблизи положительные и отрицательные заряды молекулы становятся виднее: сила воздействия этих зарядов больше не компенсируется, потому что они расположены на различном расстоянии друг от друга.

Глюон, частица – переносчик сильного взаимодействия

Напоминание о роли частиц-переносчиков

Гравитация и электростатическая сила обладают каждая своей частицей-переносчиком (гравитоном и фотоном соответственно). Сильное взаимодействие также обладает частицей-переносчиком, которая называется глюон.

Фотоны передают информацию о любом перемещении электрона в атоме в форме электромагнитной волны. Когда фотоны сталкиваются с зарядом, они «сообщают» о новой ситуации, что проявляется в виде электромагнитной силы. Таким образом, атом и заряд взаимодействуют на расстоянии с помощью электромагнитной силы, но с некоторой задержкой времени, необходимой для перемещения фотонов.

Также если Луна вдруг резко приблизится к Земле, понадобится некоторое время, чтобы океаны на это отреагировали, время, за которое гравитоны доставят новое гравитационное поле к Земле. Луна в каком-то смысле является излучателем гравитонов, как любой массивный объект.

Что касается кварков, они излучают глюоны, которые, достигнув соседнего кварка, «сообщают» о присутствии первого кварка и создают, таким образом, силу притяжения.

Замечательное свойство глюона

Между тем у фотона и гравитона имеется фундаментальное отличие: у них нет ни заряда, ни массы. То есть у тела, излучающего фотон или гравитон, не меняется ни заряд, ни масса. Если бы у гравитона была масса, объекты мало-помалу теряли бы свою массу по мере излучения частиц.

Зато у глюона есть «цвет»: это значит, что кварк, излучающий глюон, меняет цвет (как объект, излучающий гравитон, обладающий массой, наблюдал бы изменение собственной массы). Так же обстоит с кварком, который *получает* глюон (→ **рис. 28.4**). Из-за этого взаимодействие между кварками в протоне или нейтроне чрезвычайно сложно, поскольку они постоянно меняют цвет по мере того, как отдают или получают глюоны. Более того, в этом масштабе частицы должны рассматриваться как волны, что усложняет все еще больше... Сложный раздел науки, изучающий эти процессы, называется квантовой хромодинамикой. Здесь мы не будем больше о ней говорить.

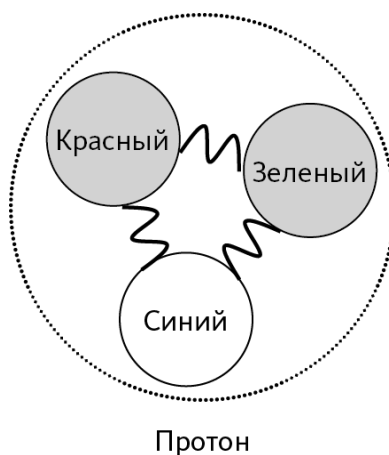


Рис. 28.4 – Роль глюонов

Глюон, частица – переносчик сильного взаимодействия, соответствует волне, изображенной между кварками. Эта передача глюонов не только создает притяжение, но и вызывает передачу цвета: цвета синий, зеленый и красный не всегда принадлежат одним и тем же кваркам.

Мы упомянули явление, которое еще встретится нам в дальнейшем в этой главе: частицы могут «мутировать», излучая или принимая другие частицы. Кварки без конца меняют цвета, обмениваясь глюонами, как если бы электроны становились положительно заряженными, излучая фотоны: в этом случае они превратились бы в совершенно новые частицы. Если этого не происходит, то просто потому, что фотоны не имеют заряда: но мы понимаем, что превращение одной частицы в другую возможно таким путем.



СТРУКТУРА ЯДРА И СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ: ОБОБЩЕНИЕ

Подведем итоги сказанного в данном параграфе:

- Нейтроны и протоны состоят из трех кварков типа d или u : протон содержит кварки (u, u, d) , нейтрон содержит кварки (d, d, u) . Нейтроны и протоны называют одним словом – нуклоны.
- Сильное взаимодействие – это сила притяжения между кварками. Она характеризуется параметром «цвет», который может быть трех типов: красный, зеленый или синий. Объединение трех этих цветов дает белый цвет (отсутствие цветного заряда).
- Сильное взаимодействие означает объединение кварков по три, что объясняет стабильность протона и нейтрона. Это также объясняет притяжение между нуклонами, которое обеспечивает связь внутри ядра и быстро уменьшается с увеличением расстояния.
- Глюоны являются частицами – переносчиками сильного взаимодействия. Они также обладают цветом, что означает, что кварки постоянно меняют цвет, обмениваясь глюонами.

2. Превращение частиц и слабое взаимодействие

Условия стабильности ядер

Сильное взаимодействие позволяет понять причину стабильности атомного ядра. Но во время опытов мы наблюдаем, что ядра не содержат произвольное число протонов и нейтронов. Например, ядра, состоящего только из двух протонов без единого нейтрона, не существует (оно абсолютно нестабильно). Ядро, состоящее из двух нейтронов и одного протона, также нестабильно (как у трития).

Что говорит опыт о стабильности ядер? У всех легких элементов, начиная с гелия, мы видим, что количество нейтронов совпадает с количеством протонов. Например, углерод содержит 6 нейтронов и 6 протонов, в то время как кислород содержит 8 нейтронов и 8 протонов. Таким

образом, необходимо понять, почему легкие атомы с разным числом протонов и нейтронов нестабильны.

Атомы с дефицитом нейтронов

Нестабильность ядер, имеющих дефицит нейтронов, объясняется довольно просто: если накапливать протоны один за другим, их положительный заряд будет расти, что создаст мощное электростатическое отталкивание, которое не сможет компенсировать сильное взаимодействие (не будем забывать, что протоны «белого цвета»). Если добавить нейтроны, это увеличит сильное взаимодействие, *без усиления электростатического отталкивания*. В каком-то смысле, склеиваясь с протонами, нейтроны служат «цементом», отдаляя протоны друг от друга, что уменьшает их электростатическое отталкивание (→ **рис. 28.5**). По этой причине необходимо как минимум такое же число нейтронов, как и протонов, чтобы ядро было стабильным.

Водород – единственное исключение, поскольку его единственный протон не испытывает отталкивания другого протона, что могло бы разрушить ядро, – таким образом, водороду не нужен нейтрон.

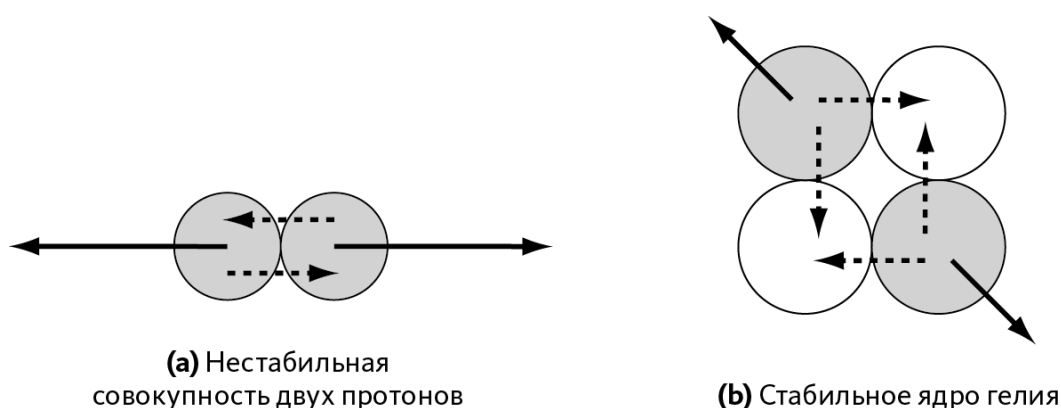


Рис. 28.5 – Избыток протонов и нестабильность ядра

Протоны обозначены темным цветом, нейтроны – светлым.

(a) – электростатическое отталкивание доминирует над сильным взаимодействием между протонами: ядро расщепляется.

(b) – присутствие нейтронов отдаляет протоны друг от друга, уменьшая электростатическое отталкивание. Зато сильное взаимодействие увеличивается, потому что действует между протонами и нейтронами. Ядро гелия стабильно.

Атомы с избытком нейтронов

А что мешает ядру иметь больше нейтронов, чем протонов? Ответ содержится в массе кварков: кварк *d* немного тяжелее кварка *u*. Это значит, что нейтрон (*d, d, u*) немного тяжелее протона (*u, u, d*). Теория относительности говорит нам, что нейтрон обладает большей энергией, чем протон: его «энергия массы» $E = mc^2$ больше.

Между тем изолированный объект не может приобрести энергию; зато он может ее потерять, если сумеет излучить эту энергию в другой форме. Например, электрон атома, расположенный на верхней орбитали, может потерять энергию из-за действия электромагнитной силы: он создает фотон, который аннулирует разницу в энергии. В этом случае именно наличие электромагнитной силы позволяет электрону терять энергию.

А как обстоит с нейтроном? Он хотел бы превратиться в протон, что позволило бы ему потратить энергию. Но для такой трансформации нужна сила, подобная электромагнитной. Кроме того, такое превращение привело бы к внезапному образованию положительного заряда, поскольку нейтрон стал бы протоном, – откуда же возьмется заряд?

Как и фотон, гравитон и глюон не имеют зарядов, их излучение не может изменить заряд нейтрона, чтобы создать протон. Между тем превращение нейтрона в протон действительно наблюдается: это значит, что должна существовать еще одна сила, чья обладает

частица-переносчик имеет заряд, в отличие от фотона, гравитона или глюона. Эта сила называется слабым ядерным взаимодействием.

Природа слабого взаимодействия

Переносчик слабого взаимодействия

Название частицы – переносчика слабого взаимодействия звучит совершенно не романтично: W-бозон. Он может быть заряжен положительно или отрицательно (то есть существует два типа W-бозонов). Отметим, что существует также Z-бозон, незаряженный, но в дальнейшем мы не будем его рассматривать.

На практике кварк d нейтрона может превратиться в кварк u с более слабой энергией благодаря слабому взаимодействию: при этом он излучает W-бозон, который аннулирует не только разницу энергии, но и разницу заряда.

Нейтрон, состоящий из кварков (d, d, u), теперь содержит кварки (d, u, u): это настоящий протон. Заряд W-бозона соответствует противоположности заряда протона (то есть это заряд электрона). Таким образом, общий заряд остается нейтральным. Раньше нейтрон не был заряжен, потом совокупность протон + W-бозон также остается незаряженной (→ рис. 28.6).

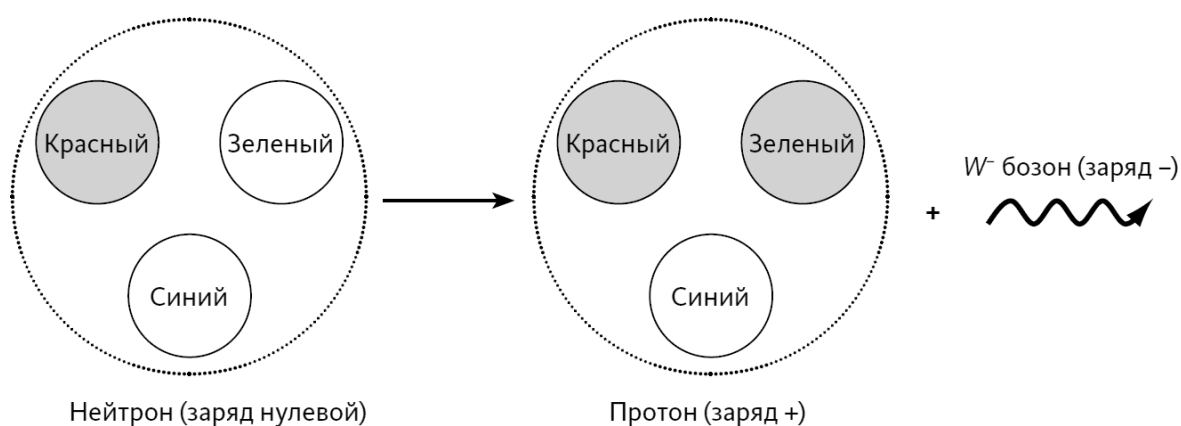


Рис. 28.6 – Превращение нейтрона в протон

Спонтанное излучение W-бозона

Как и излучение фотона атомом, излучение нейтроном W-бозона подчиняется квантовым процессам: это значит, что есть лишь некоторая вероятность, что этот феномен произойдет. Чем больше мы ждем, тем больше шансов его наблюдать.

Возьмем единственный нейтрон: его период полураспада составляет пятнадцать минут. Это значит, что есть один шанс из двух, что нейтрон превратится в протон в течение первых пятнадцати минут своего существования.

К счастью, нейтрон в ядре в основном гораздо стабильнее. Возьмем, например, ядро гелия: оно состоит из двух нейтронов и двух протонов. Если бы нейтрон превратился в протон, это создало бы совершенно неустойчивое ядро с тремя протонами и одним нейтроном: энергия этого нового ядра была бы гораздо выше в виде потенциальной электростатической энергии. Спонтанное превращение нейтрона, таким образом, невозможно, поскольку для него потребовался бы приток энергии извне.

Это объясняет, что нейтроны существуют во Вселенной и поныне: они прекрасно сохраняются в тепле атомных ядер.

Возвращение к стабильности атомных ядер

В итоге естественное превращение нейтрона в протон объясняет, что ядра со слишком большой пропорцией нейтронов относительно протонов являются нестабильными.

Уточним. Когда нейтрон превращается в протон, происходит два процесса:

- потеря энергии массы, вызванная превращением нейтрона в протон;
- приобретение потенциальной электростатической энергии, вызванное появлением положительного заряда внутри положительно заряженного ядра.

В ядрах, имеющих большую пропорцию нейтронов, потеря энергии массы преобладает над приобретением потенциальной энергии. На самом деле остается достаточно нейтронов, чтобы образовавшийся протон «нашел свое место» в ядре и не был оттеснен соседними протонами. Поскольку итоговая энергия ниже начальной, превращение нейтрона в протон вполне возможно (→ рис. 28.7).

Наши недавние наблюдения стабильности ядра, которые одновременно вводят в игру сильное и слабое взаимодействие и электростатическую силу, позволят понять суть важного природного явления: радиоактивности.

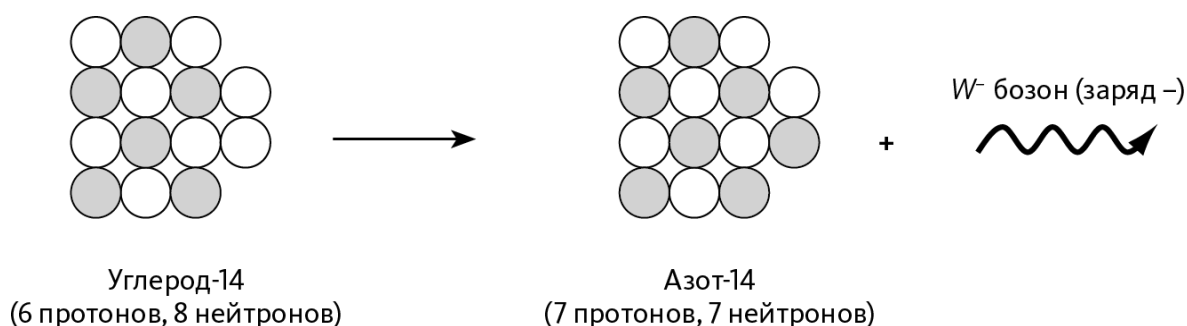


Рис. 28.7 – Нестабильность углерода-14

На схеме протоны обозначены темным, а нейтроны светлым. В углероде-14 нейтроны позволяют обеспечить связь внутри ядра, отдаляя друг от друга протоны, которые отталкивались бы под действием электростатической силы, то есть они служат «цементом». С другой стороны, мы видим, что углерод-14 обладает двумя «бесполезными» нейтронами (два справа).

Таким образом, один нейтрон может стать протоном, превращая атом в азот. Мы видим, что полученная система стабильна (нейтроны не дают контактировать протонам). Более того, масса азота-14 меньше массы углерода-14, потому что протон легче нейтрона: азот-14, таким образом, стабильнее углерода-14.

Заметим, что в реальности ядро существует в трех измерениях, а не в двух, как показано на схеме. Однако умозаключения остаются неизменными.

3. Радиоактивность

Явление радиоактивности впервые было открыто Анри Беккерелем в 1896 г.: он заметил, что уран давал излучения, которые вели себя подобно рентгеновским лучам, но им не нужно было никакой дополнительной энергии. Дальнейшие опыты, проведенные Пьером и Марией Кюри, позволили уточнить природу частиц и излучений.

Различают два основных типа радиоактивности: альфа-распад, который касается только тяжелых элементов, и бета-распад, который в том числе касается и легких элементов.

Альфа-распад

Нестабильность тяжелых элементов

Очень тяжелые элементы, такие как уран, обладают большим числом протонов и нейтронов. В связи с этим возникает проблема, связанная с большим размером ядра. Сильное взаимодействие между нуклонами уменьшается с расстоянием гораздо быстрее, чем электростатическое отталкивание между протонами: таким образом, чем больше ядро, тем больше отталкивание преобладает над притяжением.

Чтобы это компенсировать, тяжелые элементы обладают большим количеством нейтронов, чем протонов: например, у урана 92 протона и 146 нейтронов. Его обозначают ^{238}U , чтобы показать, что у него 238 нуклонов.

Понятно, что атомы урана, которые обладают меньшим числом нейтронов, нестабильны из-за электростатического отталкивания: например, ^{235}U , у которого 92 протона и «всего» 143 нейтрона. Речь идет об уране, который используют в атомных электростанциях. Мы вернемся к этому позднее.

^{238}U и ^{235}U называют «изотопами» урана: у них одинаковое число протонов, но не одинаковое число нейтронов.

Что касается элементов еще более тяжелых, чем уран, они становятся нестабильными, каким бы ни было число их нейтронов, – таких в природе не существует.

Процесс распада

Классическая физика заявляет, что такие очень тяжелые атомы должны бы быть стабильными при достаточном наличии нейтронов. На самом деле они не стабильны из-за туннельного эффекта. Мы знаем, что благодаря своей волновой природе частицы способны преодолевать «энергетические барьеры», даже если у них недостаточно энергии, чтобы сделать это классическим способом. Именно это происходит с тяжелыми элементами, такими как уран. Нуклонам удается оторваться благодаря туннельному эффекту, несмотря на сильное взаимодействие.

Один протон не может освободиться, потому что это создало бы слишком большую пропорцию нейтронов относительно протонов в ядре (у которого из-за этого повысилась бы энергия по сравнению с начальным ядром). То есть необходимо освободить столько же протонов, сколько и нейтронов: на практике освобождается ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов. Его называют альфа-частицей.

Возьмем пример урана-238, не слишком распространенного в природе. Это записывается: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + ^4\text{He}$.

Разумеется, результат этого радиоактивного распада ^{234}Th больше не называется ураном, поскольку у него уже другое число протонов. Это изотоп тория. В процессе такой реакции говорят, что ^{238}U – материнское ядро, а ^{234}Th – дочернее ядро.

Опасности альфа-распада

Излученное ядро гелия легко остановить простым листом бумаги, и, следовательно, оно не опасно, если только радиоактивную субстанцию не трогать и не глотать. В действительности опасность такого распада происходит от двух побочных эффектов.

- Прежде всего, во время распада ядро подвергается резкой перестройке. Поскольку ядро имеет сильный заряд, процесс сопровождается электромагнитным излучением очень высокой мощности. Излученные фотоны соответствуют по диапазону γ -лучам, то есть они самые мощные из всех.

- С другой стороны, полученные «дочерние ядра» также радиоактивны: они обладают избытком нейтронов и, следовательно, распадутся в процессе бета-распада (см. ниже).

Полураспад изотопов

Поскольку альфа-распад происходит благодаря туннельному эффекту, невозможно предсказать, когда распад произойдет: можно лишь высказать вероятность распада за определенное время.

Период полураспада изотопа позволяет определить скорость его распада и, следовательно, его стабильность: он представляет собой время, за которое половина атомов распадется. Чем стабильнее ядро, тем медленнее процесс: у урана-238 период полураспада сравним с возрастом самой Земли, что показывает, что он не очень радиоактивный. Это не случайность: более тяжелые элементы, будучи более нестабильными, исчезли во время формирования Земли...

Заметим все же, что уран-235 с периодом полураспада в 700 миллионов лет не полностью исчез с Земли. Именно он используется при расщеплении атомного ядра (см. параграф 4).

Бета-распад

Роль слабого взаимодействия

Бета-распад происходит, когда в ядре слишком большая пропорция нейтронов или протонов. Случаи с избытком нейтронов распространены гораздо больше. В предыдущей части мы видели, что тогда нейтрон сам превращался в протон, излучая W-бозон (частицу – переносчик слабого взаимодействия). До сих пор мы не рассказывали, что же происходит с W-бозоном. Если рассуждать по аналогии с тремя другими фундаментальными силами, он должен был бы следовать дальше своим путем, пока не встретит другую частицу, чтобы воздействовать на нее своей силой. Проблема в том, что W-бозон сам совершенно нестабилен: он существует менее миллионной миллиардной секунды... Так что вряд ли у него будет время встретить другую частицу, прежде чем исчезнуть.

Мы видели, что созданный W-бозон обладает зарядом электрона, поэтому легко понять, что, исчезнув, он вызывает появление электрона.

В ходе опытов, однако, обнаруживается, что электрон наследует не всю энергию, содержащуюся в W-бозоне. Чтобы объяснить эту разницу в энергии, в 1930 г. физики сделали вывод о существовании новой частицы, нейтрино: он должен реагировать на слабое взаимодействие, поскольку создан W-бозоном, но не должен иметь заряда. Отсутствие заряда означает, что нейтрино почти не взаимодействует с материей, поскольку электростатическая сила никак не действует на него: по этой причине нейтрино был обнаружен (то есть открыт экспериментально) только в 1956 г.



СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ – СИЛА ДОВОЛЬНО СТРАННАЯ

Учитывая вышесказанное, слабое взаимодействие в том числе отвечает за превращение нейтрона в протон. Но мы видели, что нейтрон с некоторой вероятностью распадается *сам по себе*: при чем же тут понятие взаимодействия? Для взаимодействия необходимо как минимум две частицы...

Чтобы разобраться в этом, проведем аналогию с электромагнитной силой. Благодаря электромагнитной силе электрон атома, расположенный на верхней орбитали, имеет некоторую вероятность потерять энергию, приближаясь к ядру. Это приводит к излучению фотона, частице – переносчику электромагнитного взаимодействия.

Этот излученный фотон вполне может удалиться в бесконечность, не реагируя с материей: хотя он и переносит электромагнитное поле и тесно связан с электромагнитной силой, излучение не всегда приводит к взаимодействию двух частиц.

В итоге атом теряет энергию, не взаимодействуя с другим атомом; но, хотя фотон ни с кем и не вступает в контакт, его излучение является следствием существования электромагнитной силы (именно она приближает электрон к ядру и заставляет его терять энергию путем излучения фотона).

То же самое со слабым взаимодействием: нейтрон теряет энергию, излучая бозон, что означает, что должна существовать некая сила, которая заставляет эту энергию терять. Но сила эта остается скрытой; W-бозон исчезает, не успев встретиться ни с единой частицей. В конце концов, необходимо признать, что сила слабого взаимодействия поистине озадачивает: с одной стороны, краткое существование W-бозона, с другой стороны, его заряд, который объясняет превращение частиц, связанных с этим взаимодействием.

Пример бета-минус-распада

Чтобы подвести итог, возьмем пример радиоактивного бета-распада. В природе углерод существует в виде ^{12}C : он содержит 6 протонов и 6 нейтронов. Но существует также малая пропорция ^{14}C (углерод-14), который содержит 6 протонов и 8 нейтронов: этот изотоп нестабилен из-за избытка нейтронов. Он стремится распасться в результате реакции: $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \bar{\nu}$.

Азот ^{14}N содержит 7 протонов и 7 нейтронов, то есть во время реакции один нейтрон превратился в протон. e^- представляет собой электрон, образовавшийся после исчезновения W-бозона, а $\bar{\nu}$ – это нейтрино (на самом деле речь идет об «антинейтрино», но разница между ними слишком мала, и мы не будем на этом задерживаться).

Полураспад углерода-14 занимает 5730 лет. Поскольку в масштабе земного времени он очень нестабилен, то в естественном виде его не должно существовать. Но он мало-помалу возрождается в атмосфере (см. врезку ниже).

Бета-плюс-распад

Радиоактивность, которую мы только что описали, превращает нейтрон в протон и излучает электрон, поэтому она называется бета-минус-распад. Гораздо реже встречаются ядра с избытком протонов: тогда это протон, который превращается в нейтрон. На практике кварк u и протона превращается в кварк d , что образует нейтрон.

Вместо того чтобы выбрасывать отрицательный заряд (электрон), эта реакция выбрасывает положительный заряд, чтобы сохранить общий заряд. Она выбрасывает позитрон: перед нами еще одна новая частица, которая является не чем иным, как электроном, только положительно заряженным.

У позитрона и протона много различий: в частности, масса позитрона гораздо меньше (чем у электрона), и он не состоит из 3 кварков (это элементарная частица).

Помимо позитрона эта реакция образует также нейтрино для удаления избытка энергии. Возьмем пример распада фтора-18: $^{18}\text{F} \rightarrow ^{18}\text{O} + e^+ + \nu$, где e^+ является излученным позитроном, а ν – нейтрино. Такой тип радиоактивности называется бета-плюс-распад.



УГЛЕРОД-14

Верхний слой атмосферы (стратосфера) постоянно подвергается атаке высокоэнергетических фотонов, приходящих из космоса (космические лучи). Между тем стратосфера в основном состоит из двухатомного азота и двухатомного кислорода, как и у поверхности земли. Ударяя атомы кислорода, космические лучи могут освобождать нейтрон высокой энергии. Тот, в свою очередь, ударяясь в ядро азота, может занять место протона: в итоге вместо азота-14 (7 протонов, 7 нейтронов) мы получаем углерод-14 (6 протонов, 8 нейтронов). Этот радиоактивный углерод затем может соединиться с двухатомным кислородом и образовать радиоактивный диоксид углерода CO_2 .

Этот процесс компенсируется естественным распадом (бета-распад), и в атмосфере создается равновесие: содержание углерода-14 по сравнению со стабильным углеродом-12 остается постоянным.

Эта смесь проникает в живых существ при контакте с воздухом. Но предположим, что живой организм умирает и покрывается слоем земли, не пропускающим воздух. Разложение углерода-14 не компенсируется его созданием, и его содержание в организме мало-помалу снижается.

Полураспад углерода-14 занимает 5730 лет: если в умершем организме содержание углерода-14 вдвое меньше, чем в живом, это значит, что организм умер и не имел доступа к воздуху 5730 лет. Это является идеальным методом для определения возраста органических веществ в масштабе от нескольких тысячелетий до нескольких десятков тысяч лет.



ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ: ОБОБЩЕНИЕ

Сделаем обзор разных элементарных частиц, о которых пришло время упомянуть. Обозначенный заряд является частичным ($1 =$ заряд протона).

• Частицы материи:

Кварк u (заряд $= 2/3$): в протоне их 2, в нейтроне 1.

Кварк d (заряд $= -1/3$): в протоне 1, в нейтроне 2.

Электрон (заряд $= -1$): его масса в 836 раз меньше массы протона.

Позитрон (заряд $= +1$): это античастица электрона, то есть его заряд противоположный, но масса идентичная. Излучается при бета-плюс-распаде.

• Частицы взаимодействия:

Гравитон (гипотетический): переносит силу гравитации, это объясняет тот факт, что он пока не был обнаружен (сила очень слабая).

Фотон: переносит электромагнитную силу.

Бозон W^+ , W^- и Z : заряды соответственно $+1$, -1 и 0 . Переносят слабое взаимодействие.

Отметим, что существует множество других элементарных частиц, например таких как нейтрино. Перечислить их все здесь было бы слишком трудно.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СИЛЫ: ОБОБЩЕНИЕ

Перечислим четыре фундаментальные силы Вселенной:

• Гравитация

Переносчик: гравитон, ключевой параметр – масса (всегда $+$).

От нее зависит образование планет и звезд.

• Электромагнитная сила

Переносчик: фотон, ключевой параметр – заряд (плюс или минус).

Является причиной всех повседневных явлений.

• Сильное ядерное взаимодействие

Переносчик: глюон, ключевой параметр – цвет (красный, зеленый или синий).

Отвечает за связь внутри ядер, синтез и расщепление, альфа-распад.

• Слабое ядерное взаимодействие

Переносчик: бозон W и Z .

Отвечает за превращение частиц, бета-распад.

Опасности бета-распада

Как и альфа-распад, бета-распад вызывает значительную перестройку ядра: будучи заряженным, ядро излучает фотоны высокой мощности в диапазоне электромагнитного спектра, которые опасны для здоровья. Что касается электрона, его можно легко остановить листом алюминиевой фольги. Наконец, позитрон, образованный при бета-плюсраспаде, взаимодействует с первым встречным электроном в материи и образует два фотона.

4. Синтез и расщепление ядра

Радиоактивность, описанная в предыдущей части, происходит спонтанно, без поступления энергии извне. Но реакцию в ядре можно спровоцировать, добавив необходимой энергии, чтобы она произошла, – на этом строится принцип соединения и расщепления атомного ядра.

Энергия атомов

Расщепление ядра состоит в получении более легких элементов из тяжелых путем их разделения на много частей. Ядерный синтез, напротив, состоит из образования более тяжелых элементов на основании легких путем их «склеивания». В обоих случаях – реакций ядерного синтеза и расщепления – происходит выделение энергии: почему?

Увеличение энергии при ядерном синтезе

Рассмотрим два ядра дейтерия (изотоп водорода, содержащий один протон и один нейтрон), которые приблизим друг к другу (→ **рис. 28.8.а**): они приобретут потенциальную энергию благодаря электростатическому отталкиванию. Чем ближе ядра друг к другу, тем у электростатической силы больше возможности придать им кинетическую энергию, удалив их друг от друга.

Но в то же время сильное взаимодействие, которое является притягивающим, стремится снизить потенциальную энергию: чем ближе ядра, тем меньше притяжение способно придать им кинетическую энергию, приближая их друг к другу.

Оказывается, повышение сильного взаимодействия доминирует над повышением электростатического отталкивания: потенциальная энергия снижается, когда мы соединяем два ядра. Ядро гелия, созданное соединением двух ядер дейтерия, имеет гораздо более слабую энергию. То есть его создание сопровождается выбросом лишней энергии наружу, чтобы общая энергия сохранилась.

Увеличение энергии при ядерном расщеплении

Как мы видели, при определенном размере ядра рост электростатического отталкивания доминирует над ростом сильного взаимодействия, потому что радиус действия последнего меньше: создание более тяжелых элементов требует дополнительной энергии. То есть здесь при расщеплении происходит обратный процесс, который выделяет энергию (→ **рис. 28.8.b**).

В итоге расщепление тяжелых элементов образует ядра меньшего размера и более слабой энергии. Соединение легких элементов образует более крупные ядра и также со слабой энергией.

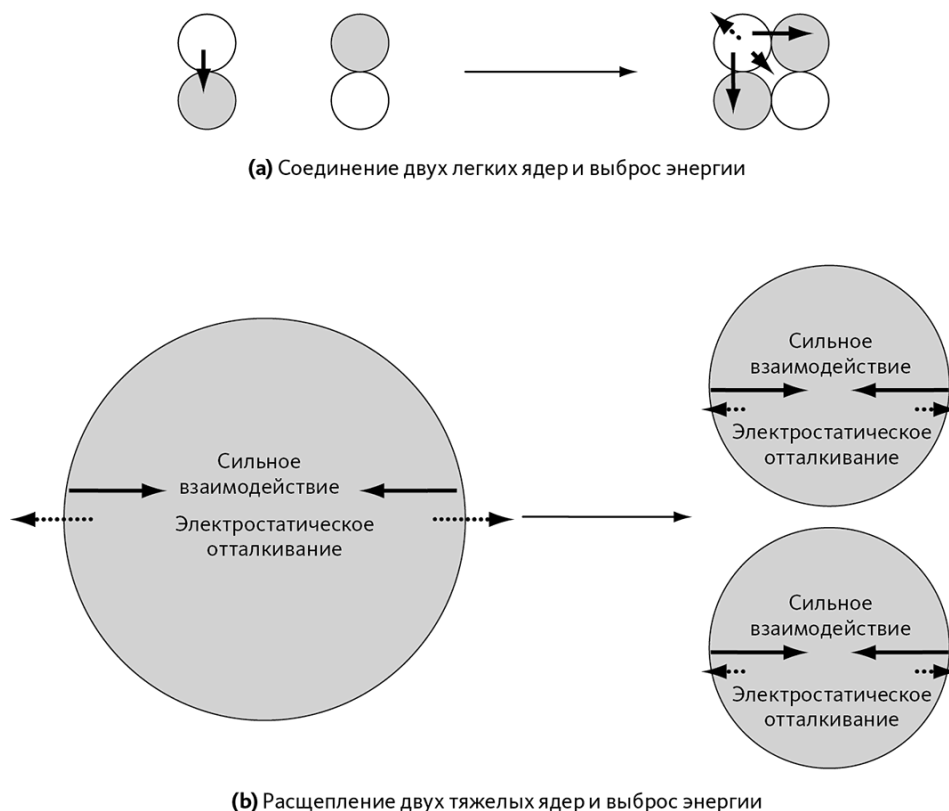


Рис. 28.8 – Энергетические процессы при синтезе и расщеплении ядра

(a) – слияние двух ядер дейтерия: в образованном ядре гелия мы видим, что связь внутри, вызванная сильным взаимодействием, гораздо выше. Электростатического отталкивания недостаточно для противодействия слиянию. Таким образом, потенциальная энергия гелия меньше, чем у ядер дейтерия (он стабильнее).

(b) – расщепление крупного ядра. Мы видим, что здесь сильное взаимодействие доминирует над электростатическим отталкиванием, то есть ядро стабильно. Но в дочерних ядрах электростатическое отталкивание сильно уменьшилось (гораздо меньше протонов), в то время как сильное взаимодействие уменьшилось мало (взаимодействия с малым радиусом действия мало изменились): таким образом, дочерние ядра гораздо стабильнее, чем исходное ядро. Связь в них сильнее, потенциальная энергия слабее.

Стабильность элементов средней массы

Легкие элементы при увеличении теряют энергию, тяжелые элементы теряют энергию при уменьшении. Таким образом, должен существовать «средний» размер ядра, у которого энергия самая маленькая. Речь идет о никеле-62, состоящем из 28 протонов и 34 нейтронов. Это значит, что как синтез, так и расщепление никеля приведет к созданию более энергетически мощных ядер и поглотит энергию, вместо того чтобы ее освободить. Никель-62 достаточно стабилен: таким, как он, стремятся стать все другие элементы (наряду с железом-56, также очень стабильным). Более тяжелые элементы стремятся расщепиться, чтобы стать такими же, а более легкие стремятся объединиться.

Это приводит к важному следствию: никеля и железа во Вселенной особенно много, в частности на Земле. Их не так много на поверхности, зато они образуют большую часть земного ядра. Будучи элементами скорее тяжелыми, во время формирования Земли они осели в ее центре под действием гравитации.

Ядерное расщепление

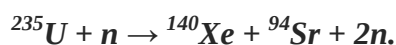
Принцип

Расщепление тяжелого ядра образует более легкие и стабильные ядра. Но тяжелое ядро также является относительно стабильным, то есть, чтобы его дестабилизировать, необходимо придать ему дополнительную энергию и вызвать реакцию. Это позволяет пройти через стадию промежуточного, очень неустойчивого ядра с высокой энергией, которое распадется само. В итоге мы переходим от средней энергии (исходное ядро) к энергии слабой (дочернее ядро), проходя через высокую энергию (промежуточное ядро).

Чтобы придать ядру энергии, прибегают к помощи нейтронов, которые посылают к ядру: цель – дестабилизировать ядро, добавив дополнительный нейтрон. Для этого можно было бы использовать и протоны, но их затормозит электростатическое отталкивание ядра, прежде чем они его достигнут.

В итоге полученное нестабильное ядро высокой энергии раскалывается на две части, как во время альфа-распада. Но во время альфа-распада вытолкнутой частью ядра всегда было ядро гелия, в то время как при расщеплении большой энергии полученного нестабильного ядра достаточно, чтобы расколоть ядро на две разные части. Благодаря квантовым явлениям ядро не всегда раскалывается одинаково: оно может давать разные дочерние ядра с разной долей вероятности.

Возьмем пример с ураном-235, редким природным изотопом урана, который используется на АЭС. Одна из реакций расщепления, которые можно наблюдать, следующая:



В данной реакции n означает нейтрон. Из урана мы получаем ксенон и стронций. Два полученных дочерних ядра являются радиоактивными изотопами и потеряют лишние нейтроны в процессе бета-распада.

Цепная реакция

Если энергии достаточно, чтобы вызвать реакцию, мы все же получаем продукты расщепления более низкой энергии, чем у урана и исходного нейтрона. А поскольку энергия должна сохраняться, это значит, что реакция выбрасывает ее наружу. На практике реакция освобождает гамма-фотоны, что приводит к перестройке ядер и их зарядов.

Во время такой реакции освобождается гораздо больше энергии, чем ее необходимо для того, чтобы она состоялась: в этом и есть смысл расщепления ядер. Общая энергия сохранилась, но часть потенциальной энергии ядра превратилась в кинетическую энергию (излученные нейтроны) и излучение (фотоны). Таким образом, мы «освободили» потенциальную энергию, содержащуюся в ядре.

Кроме того, отметим, что нейтроны выделились при предыдущей реакции; между тем необходимо точное число нейтронов, чтобы начать реакцию. Это значит, что, если нам удалось расщепить ядро урана, выделенные нейтроны расщепят соседние ядра урана и так далее: это называется цепной реакцией.

Внутри бомбы такая цепная реакция протекает очень быстро: за долю секунды расщепление одного за другим ядер урана приводит к выбросу колоссальной энергии.

На атомных электростанциях цепные реакции контролируют с помощью веществ, которые останавливают выделенные нейтроны и мешают им спровоцировать следующие реакции, лишь нескольким нейтронам позволяют достичь других ядер таким образом, чтобы контролировать скорость цепной реакции.

Расщепление ядра в военных и мирных целях

Когда излученные гамма-фотоны взаимодействуют с материей, они отдают ей свою энергию (например, отрывая электроны). Эта энергия быстро превращается в тепловую энергию в результате столкновения молекул.

Внутри бомбы резкое повышение температуры приводит к резкому скачку давления (вспомним, что $P = nkT$, где P – давление, T – температура, а n – концентрация). Воздух очень быстро расширится в направлении зон более низкого давления, произойдет взрыв.

На атомных электростанциях тепловая энергия позволяет кипятить воду, как на ТЭЦ это делает уголь.

Синтез ядра

Трудности синтеза ядра

Образование гелия (2 протона и 2 нейтрона) из изотопов водорода является самой «простой» реакцией синтеза: именно она дает энергию Солнцу, и именно на ней хотят строить работу будущих термоядерных электростанций.

Как реализовать подобный синтез? Основная трудность – преодолеть электростатическое отталкивание между исходными ядрами: например, ядра дейтерия заряжены положительно, поскольку содержат протон. Для того чтобы они достаточно приблизились друг к другу, чтобы их соединить и создать гелий, необходимо, чтобы они обладали большой кинетической энергией ($\rightarrow$ рис. 28.9). На практике это значит, что температура среды должна быть огромной, поскольку она отражает микроскопическую кинетическую энергию. Порядка необходимой величины десятки миллионов градусов!

Здесь проявляется часть проблемы ядерного синтеза. Когда реакция началась, она отдает гораздо больше энергии, чем было необходимо для ее начала, что поддерживает реакцию; но ведь ее еще нужно начать... Расщепление ядра не доставляет таких проблем, поскольку к ядру посылают нейтрон, то есть не нужно преодолевать электростатическое отталкивание.

В водородных бомбах используется расщепление плутония или урана, что позволяет повысить температуру настолько, что происходит синтез водорода. Но в атомной электростанции нельзя использовать бомбу на основе расщепления ядра, чтобы вызвать реакцию! Вся трудность мирного ядерного синтеза в том, чтобы вызвать реакцию, при этом ее контролируя. Именно поэтому ядерный синтез уже давно используется в военных целях, но еще долгие годы не сможет быть использован в мирных целях.

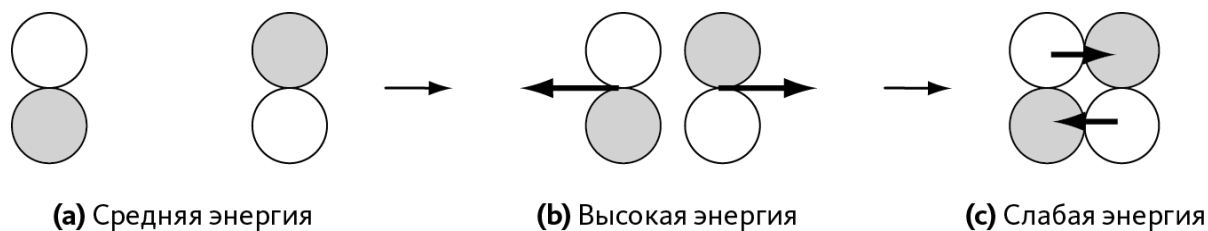


Рис. 28.9 – Соединение двух ядер дейтерия

(a) – два отдельных ядра дейтерия.

(b) – электростатическое отталкивание высоко, и два ядра остаются слишком далеко друг от друга, чтобы проявилось сильное взаимодействие (радиус его действия очень мал): потенциальная энергия очень высока.

(c) – два ядра достаточно близки, чтобы сильное взаимодействие преодолело электростатическое отталкивание: образованное таким образом ядро гелия очень стабильно, его энергия очень мала. Мы видим, что в итоге получили очень маленькую энергию по сравнению с началом, но прошли через промежуточную стадию очень высокой энергии. В случае с расщеплением ядра принцип действия идентичный.

Ядерный синтез внутри Солнца

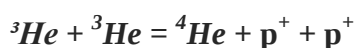
В заключение в качестве примера дадим синтез водорода, происходящий внутри Солнца: это процесс первостепенной важности, поскольку поддерживает температуру поверхности Солнца достаточной, чтобы нас согревать и освещать...

В первой стадии высокое давление и температура, которые царят в центре Солнца, позволяют двум протонам (= ядрам водорода) значительно приблизиться друг к другу. На этой стадии возможно превращение протона в нейтрон, потому что это уменьшает энергию частиц, уничтожая электростатическое отталкивание. Таким образом, существует некоторая вероятность, что это превращение состоится: речь идет о бета-плюс-распаде, поскольку при этом образуются протон и нейтрон. Это выглядит как:

$p^+ + p^+ \rightarrow D + \nu + e^+$ (где p^+ – это протон, а D – ядро дейтерия, образованное протоном и нейтроном. ν и e^+ представляют нейтрино и позитрон, образовавшиеся при бета-плюс-распаде).

Во второй стадии другой протон приближается к образовавшемуся дейтерию, чтобы путем слияния создать гелий (2 протона и 1 нейтрон). Происходит именно слияние. Это записывается: $D + p^+ \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (γ представляет собой высокоэнергетический фотон, который удаляет энергию, потерянную при синтезе).

Наконец, два ядра образованного в Солнце гелия-3 реагируют между собой, чтобы сформировать гелий-4, который является стабильным. Во время этого процесса два протона выбрасываются:



Материя нашего тела родилась на звездах

Излучение звезд, образованное ядерными реакциями, создает давление, которое не позволяет звезде сложиться вовнутрь под действием собственного веса. Когда водород кончается внутри звезды, она снова сжимается, пока давление и температура внутри нее не повысятся снова: именно в этот момент могут произойти более сложные ядерные реакции, создающие более тяжелые элементы.

Самые тяжелые звезды в конце жизни взрываются (становятся сверхновой звездой), что сопровождается выбросом тяжелых элементов, которые разлетаются по всему космосу. Все элементы Вселенной тяжелее гелия были созданы на тяжелых звездах. Это значит, что наше собственное тело, состоящее из углерода, кислорода и многих других тяжелых элементов, сформировалось на звездах задолго до того, как образовалась Солнечная система.

Надежды, связанные с контролем ядерного синтеза

В конце концов управляемый термоядерный синтез через несколько десятилетий, возможно, ознаменует важный поворот в проблеме выработки энергии, с которой мы сталкиваемся сейчас. Водорода, почти неисчерпаемого на Земле, хотя бы в виде морской воды H_2O , и довольно распространенного дейтерия достаточно для выработки энергии путем ядерного синтеза в течение сотен тысяч лет.

Более того, ядерный синтез будет «чище» ядерного расщепления: он производит легкие элементы, чьи изотопы либо стабильны, либо, напротив, имеют очень краткий срок существования. В то время как расщепление ядра приводит к образованию тяжелых элементов, многочисленные радиоактивные изотопы которых живут долго, и это приводит к важной проблеме утилизации ядерных отходов. Прибавим к этому, что синтез ядра, как и расщепление, не образует никаких газов, дающих парниковый эффект (только водяной пар).

5. Пятое фундаментальное взаимодействие: поле Хиггса

К происхождению массы

Эквивалентность массы и энергии

Четыре фундаментальные силы составляют основу, на которой зиждется существование Вселенной. Между тем существует пятая сила, еще более незаметная, чем слабое взаимодействие, имеющая огромное значение, поскольку именно она придает массу элементарным частицам: речь идет о взаимодействии с полем Хиггса, чье существование было подтверждено совсем недавно (в 2012 г.).

Чтобы познакомить вас с ним, мы начнем с того, что напомним, что такое масса. Мы уже много говорили о ней в главе 2, используя понятие инертной массы, пассивной и активной гравитационной массы. Но тогда мы рассматривали лишь *последствия* существования массы, оставляя в стороне ее *происхождение*. Между тем теория относительности (глава 26) дает неожиданную и таинственную информацию на эту тему при помощи формулы $E = mc^2$.

Обычно эту формулу называют эквивалентностью массы и энергии. Но такое наименование ошибочно: частица может обладать энергией, но не иметь массы, как, например, фотон. Не следует забывать, что энергия массы $E = mc^2$ всего лишь часть общей энергии частицы, которая выражается $E = \gamma mc^2$. $E = mc^2$ не включает кинетическую энергию перемещения в пространстве: речь идет только об энергии покоя. То есть необходимо запомнить, что существует «эквивалентность между энергией покоя частицы и ее массой».

Это также применимо к любому объекту, состоящему из частиц, что приводит к значительным последствиям.

Пример отрицательной массы

Рассмотрим неподвижный атом водорода, состоящий из электрона и протона. Какова его масса? Можно дать поспешный ответ, что масса представляет собой сумму масс электрона и протона. Однако энергия массы водорода $E = mc^2$ включает всю энергию системы (протон + электрон), а точнее:

- Энергию массы электрона.
- Энергию массы протона.

Но также:

- Потенциальную энергию электростатического взаимодействия между протоном и электроном.
- Кинетическую энергию электрона и протона (атом в покое остается неподвижен, но заряды внутри могут перемещаться).

Чтобы упростить, представим, что электрон и протон изначально неподвижны и что их стараются разделить (атом водорода разрушают). Получаем отдельно электрон и протон: теперь энергия каждой частицы соответствует их энергии массы. Но чтобы реализовать этот процесс, необходимо добавить энергии атому водорода, чтобы преодолеть притяжение между электроном и протоном. Поскольку системе была придана энергия, это значит, что конечная энергия будет больше исходной. Таким образом, исходная энергия атома водорода меньше, чем энергия электрона и протона, полученных в финале. Это значит, что потенциальная энергия электростатического взаимодействия внутри водорода *отрицательная*, поскольку она уменьшает общую энергию.

Данное умозаключение справедливо для любого атома. Примечательно, что инерция объекта (его масса) напрямую зависит от его внутренней электростатической энергии (которая обеспечивает целостность объекта), тогда как два этих понятия логически совершенно не связаны между собой. Другими словами, чем ближе электроны к протонам внутри объекта, тем больше отрицательная внутренняя энергия взаимодействия, то есть объект легче!

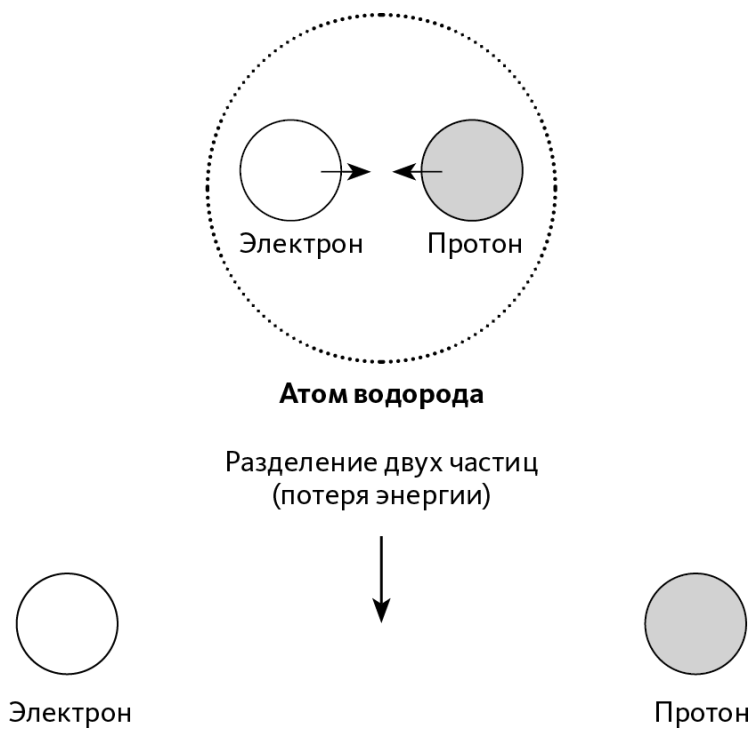


Рис. 28.10 – Баланс массы при ионизации водорода

Конечная энергия больше исходной, поскольку энергия была добавлена для разделения двух частиц. Таким образом, энергия атома водорода меньше энергии электрона + протона, взятых по отдельности. То же самое касается массы.

В главе 2 мы уже могли убедиться, что масса имеет странный характер при тождестве «инертная масса = пассивная гравитационная масса = активная гравитационная масса»: чем тяжелее объект (пассивная гравитационная масса), тем сложнее придать ему ускорение (инертная масса) и тем больше он притягивает другие объекты (активная гравитационная масса). Мы преодолеваем новый этап, дополняя это равенство:

инертная масса = пассивная гравитационная масса = активная гравитационная масса = внутренняя энергия.

Инерция объекта, его способность притягивать и способность быть притянутым гравитационно – три свойства, вытекающие из внутренней связи объекта (которая изначально не имеет ничего общего ни с гравитацией, ни с понятием инерции). Это заключение, хотя и нелогичное, есть прямой результат теории относительности, широко подтвержденной опытами.

Происхождение массы Вселенной

Важность этого заключения огромна. В самом деле, основная часть массы объектов, которые нас окружают, состоит из протонов и нейтронов (масса электронов в сравнении с ними очень мала). Однако протоны и нейтроны не являются элементарными частицами: они состоят из трех кварков. Чтобы понять массу протона или нейтрона, нужно принять во внимание кинетическую и потенциальную энергию кварков, которые их составляют. На этом этапе возникает удивительный вывод: сильное взаимодействие, обеспечивающее связь кварков, возрастает с увеличением расстояния (в противоположность электростатической силе между протоном и электроном). Как будто кварки соединены между собой резинкой. Отметим, что это является результатом действия виртуальных частиц, разделяющих кварки, что на таком микроскопическом уровне становится важнейшим фактом.

Когда кварки пытаются удалиться друг от друга, сильное взаимодействие на большой скорости влечет их обратно. И наоборот, когда кварки слишком близко подходят друг к другу,

сила, действующая между ними, снова становится очень слабой (слабая потенциальная энергия взаимодействия), но их кинетическая энергия сильно повышается. В итоге сумма (кинетическая энергия + потенциальная) кварков положительная (хотя она была отрицательной при взаимодействии электрона с протоном). Таким образом, масса протона больше, чем сумма масс трех кварков, из которых он состоит. Учитывая интенсивность сильного взаимодействия (самого мощного из четырех фундаментальных сил), эта энергия сцепления огромна, гораздо выше энергии массы трех кварков: *почти вся масса протона состоит из сильного взаимодействия между кварками, а не из массы кварков.*

То же самое касается нейтрона, также состоящего из трех кварков. Данное умозаключение можно переносить на любые объекты, которые нас окружают: *основная часть видимой массы Вселенной происходит от сильного взаимодействия, которое обеспечивает сцепление материи.* Масса элементарных частиц составляет лишь ничтожную часть массы объектов.

Поле Хиггса

Необходимость пятого взаимодействия

Этот вывод приводит к естественному важному вопросу: если основная часть массы Вселенной приходится на фундаментальные силы, которые действуют внутри частиц (например, сильное взаимодействие), что можно сказать о массе элементарных частиц? Слово «элементарный» подразумевает, что они не могут делиться на более мелкие частицы, то есть их масса не может состоять из взаимодействия более мелких частиц. Следовательно, эта масса имеет другое происхождение, что является довольно интригующим: сложно допустить, что один и тот же параметр (масса) может иметь два совершенно независимых источника.

Чтобы связать эти два вроде бы различных происхождения, нужно допустить, что модель, представленная до сих пор, не является полной. Обобщим еще раз четыре фундаментальных взаимодействия:

- Сила гравитации: никоим образом не объясняет происхождение массы частиц, зато является результатом действия этих масс (понятие гравитационной массы). Эта сила передается гравитационными волнами, квантовые составляющие которых бозоны, называемые гравитонами.

- Электромагнитная сила: стремится немного уменьшить массу атомов относительно протонов и электронов. Выдвигает понятие инерции объекта (инертная масса). Эта сила передается электромагнитными волнами, квантовые составляющие которой называются фотонами.

- Сильное взаимодействие: объясняет происхождение подавляющей части массы Вселенной взаимодействием между кварками. Квантовые составляющие волн взаимодействия – бозоны, называемые глюонами.

- Слабое взаимодействие: позволяет одной элементарной частице превращаться в другую. Ее бозоны взаимодействия нестабильны и обозначаются W- и Z-бозонами.

Последнее взаимодействие интересно тем, что оно изменяет сами элементарные частицы: подобно тому, как электрон излучает фотон под действием внутренней электромагнитной силы (которая приближает электрон к протону), u-кварк излучает W^+ -бозон под действием слабого внутреннего взаимодействия (превращаясь таким образом в d-кварк).

Поскольку слабое взаимодействие способно «создавать» элементарные частицы (из других частиц), не может ли оно создавать их массу? Увы, мощность слабого взаимодействия не позволяет объяснить массу частиц. Тем не менее физики не останавливаются на полпути: поскольку масса, по-видимому, является результатом существования внутреннего взаимодействия, они предположили пятый тип взаимодействия, поле Хиггса, чьей квантовой составляющей является бозон (как и при других взаимодействиях), названный «бозоном Хиггса».

Так же как фотон соответствует колеблющемуся электромагнитному полю, бозон Хиггса соответствует элементарному колебанию поля Хиггса. Придавая внутреннюю энергию элементарным частицам, поле Хиггса создает их массу. Отметим, что бозон Хиггса, как и W- и Z-бозоны, имеет очень краткий срок существования из-за своей огромной энергии. Представим поле Хиггса в виде очень жесткой скатерти. Скатерть возможно заставить колебаться, только если очень сильно ее встряхнуть, вызвав появление очень мощных бозонов Хиггса. Но скатерть существует и при отсутствии колебаний: именно она придает массу элементарным частицам,

а не бозоны Хиггса. Бозоны являются лишь признаками, индикаторами существования этого поля.

Именно бозон Хиггса, а не поле Хиггса пытались поймать физики в Большом адронном коллайдере. Идея была в том, чтобы создать как можно более сильное круговое движение, которое заставит проявиться бозон Хиггса. Это потребовало огромных энергетических затрат: этого достигли, отправив два протона на высокой скорости навстречу друг другу. В итоге бозон Хиггса был выявлен 4 июля 2012 г. с ожидаемыми характеристиками и добавлен к основному обоснованию теоретической системы Стандартной модели.

Скалярное поле

Отметим, наконец, что взаимодействие Хиггса стоит несколько особняком от четырех фундаментальных сил, рассмотренных ранее. В самом деле, речь идет о «скалярном», а не «векторном» поле.

Уточним: когда масса находится в гравитационном поле, она испытывает на себе силу, которая ее ускоряет в определенном направлении с определенной мощностью. Это взаимодействие должно изображаться с помощью вектора, который позволит охарактеризовать интенсивность и направление силы. Именно поэтому говорят, что гравитационное поле «векторное». То же самое касается трех других фундаментальных сил.

Теперь поместим элементарную частицу в поле Хиггса: она не испытывает ни малейшего ускорения. Единственный эффект поля Хиггса – придает частице *внутренней* энергии, то есть массы. Таким образом, простой величины достаточно, чтобы охарактеризовать силу этого взаимодействия: вектор больше не нужен, поскольку нет направления ускорения. Именно поэтому такое поле называют скалярным.

В конечном итоге существует четыре фундаментальные силы Вселенной, которые управляют ее развитием. Пятое взаимодействие, поле Хиггса, только придает массу частицам. Между тем мы еще не способны объяснить, почему взаимодействие Хиггса сильнее для кварков, чем для электронов (то есть почему кварк тяжелее электрона). В настоящем состоянии науки понятие поля Хиггса не решает важных вопросов: оно лишь переводит в другую область проблему, касающуюся загадочного значения масс элементарных частиц.

Важно ли знать, что масса происходит из пятого взаимодействия? Ответ – да, потому что бозон Хиггса существует и добавляется к другим частицам, заполняющим Вселенную (даже если он очень редкий). Подтверждение механизма Хиггса – это открытая дверь к лучшему будущему пониманию основ физики. Он показывает, что *внутри* элементарных частиц явно что-то происходит. Физика только что установила важную веху, которая станет отправной точкой для дальнейшего понимания работы Вселенной.



БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР

Запущенный в конце 2008 г. БАК (LHC), расположенный на франко-швейцарской границе, является ускорителем частиц, на который фундаментальная физика возлагает все свои надежды. Протоны там разгоняются с поистине умопомрачительной скоростью – 99,999 999 % скорости света! Это соответствует релятивистскому сжатию расстояния более чем в 7000 раз: вместо 27 км периметра окружности, по которой они проносятся, протоны «видят» дистанцию лишь в несколько метров.

Цель ученых спровоцировать столкновения протонов невиданной силы: выделенная при ударе энергия будет соответствовать десяткам тысяч миллиардов наложенных друг на друга фотонов, сконцентрированных в одной микроскопической точке пространства...

При такой энергии может произойти множество реакций, слишком сложных, чтобы рассматривать их здесь. Главной целью таких реакций является создание новых частиц, которые откроют прекрасные перспективы в понимании фундаментальной физики. Именно так были обнаружены первые бозоны Хиггса в 2012 г. Плотность энергии, достигнутой в БАК, такова, что некоторые опасались создания маленьких черных дыр, способных целиком поглотить Землю.

Но не стоит забывать, что космические лучи, которые постоянно бомбардируют Землю из космоса, обладают еще более мощной энергией и также способны создавать маленькие черные дыры, тем не менее Земля все еще существует.

Не стоит волноваться: еще далеко то время, когда человек станет сильнее природы...



СЛЕДУЕТ ЗАПОМНИТЬ

- Протоны и нейтроны состоят из трех частиц, кварков. Кварки u составляют $2/3$ заряда протона, кварки d составляют $1/3$ заряда протона. В протоне 2 кварка u и 1 кварк d , в нейтроне 2 кварка d и 1 кварк u .
- Сильное взаимодействие является фундаментальной силой, притягивающей кварки, ее частица-переносчик – глюон. «Цвет» является характерным параметром этой силы и может быть трех типов: «красный», «зеленый» или «синий».
- Протон и нейтрон состоят из трех кварков разных цветов: результирующий цвет белый («нейтральный заряд» сильного взаимодействия). Хотя протон и нейтрон белого цвета, они притягиваются с близкого расстояния от сильного взаимодействия, благодаря тому что три кварка не расположены в одном и том же месте.
- Кварк u может превращаться в кварк d при слабом взаимодействии, и наоборот. Это позволяет нейтронам становиться протонами, и наоборот.
- Число нейтронов в ядре регулируется двумя параметрами: слишком малое количество нейтронов провоцирует слишком сильное электростатическое отталкивание, слишком большое количество нейтронов провоцирует их мутацию в протоны, масса которых меньше, и, следовательно, энергия тоже меньше.
- Во время бета-минус-распада нейтрон ядра превращается в протон. Во время бета-плюс-распада протон ядра превращается в нейтрон. В обоих случаях это меняет название элемента.
- В тяжелых ядрах (очень тяжелых элементов) электростатическое отталкивание между протонами становится мощнее сильного взаимодействия, потому что действует на большем расстоянии. Это объясняет альфа-распад, при котором ядро гелия (2 протона и 2 нейтрона) отделяется, чтобы сформировать более легкое ядро.
- Легкие элементы теряют энергию, становясь более тяжелыми из-за сильного взаимодействия: это объясняет преимущество ядерного синтеза, при котором выделяется энергия. Тяжелые элементы, напротив, теряют энергию, становясь меньше из-за сильного электростатического отталкивания больших ядер. Это объясняет преимущество расщепления ядра, при котором также выделяется энергия.
- Масса любой материальной системы связана с внутренним взаимодействием. На практике сильное взаимодействие, соединяющее кварки между собой, объясняет основную часть массы протона и нейтрона, то есть большую часть массы видимой Вселенной.
- Масса элементарных частиц происходит из особенного взаимодействия – поля Хиггса. Элементарное колебание этого поля называется бозоном Хиггса. Обладая очень мощной энергией и очень кратким сроком существования, бозон Хиггса впервые был обнаружен только в 2012 г.

Эпилог: умещается ли вселенная на почтовой марке?

Одно уравнение, одна вселенная

На протяжении всех глав мы попытались дать обзор большинства явлений, происходящих вокруг нас. Мало-помалу мы нашли ответы на все вопросы, которые были заданы в предисловии.

На фундаментальном уровне мы рассказали о том, что такое материя и свет, почему иногда материя образует твердые тела, иногда жидкости, а иногда газы. Что такое звук и как он распространяется. Что скрывается за словом «энергия», происхождение химических и ядерных реакций и так далее.

Мы также постигли суть природных явлений, которые нас окружают: образование звезд, происхождение теплоты и солнечного света, движение ветров и океанов на Земле, цвет неба и моря, магнитное поле земли, снижение температуры на высоте и так далее.

Наконец, мы смогли объяснить некоторые аспекты работы разных приборов: печей, ламп, холодильников, радио, компьютеров, двигателей, самолетов, электростанций и так далее. В подавляющем большинстве случаев мы смогли привести эти феномены к детерминистскому действию двух сил: гравитации (иногда) и электростатической силы (почти все явления, которые нас окружают). Единственным исключением являются процессы, происходящие внутри атомов, а также химические и ядерные реакции.

Так, почти все явления, которые нас окружают, можно резюмировать в одном математическом выражении, которое синтезирует сущность классической физики, дополненной специальной теорией относительности:

$$\frac{d(\gamma m \vec{v})}{dt} = \vec{F}_{\text{grav}} + \vec{F}_{\text{elec}}, \text{ где } \vec{F}_{\text{grav}} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_r, \text{ а } \vec{F}_{\text{elec}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^1 q^2}{r^2} \vec{u}_r.$$

Мы не пытаемся определить каждый из этих математических терминов, физический смысл которых мы уже описали в этой книге. Приведенное выше уравнение – не что иное, как дифференциальный закон движения (второй закон Ньютона), примененный с учетом релятивистских феноменов, в то время как $\vec{F}_{\text{grav}}$ и $\vec{F}_{\text{elec}}$ – сила гравитации и электростатическая сила. Полюбуйтесь на эту линию: вся природа (в нашем масштабе) сосредоточена в ней.

Парадигма общей теории относительности немного меняет уравнение, поскольку она заменяет гравитацию пространством-временем, искривленным материей. Но это больше относится к процессам микроскопического масштаба, на уровне атомов, которым необходимо изменить и дополнить свои формулы. Неточечный характер элементарных частиц заставляет отбросить дифференциальный закон движения в пользу другого – уравнения Шрёдингера. Более того, случайность при превращении волны в частицу добавляет сложность квантовой физике, не охваченной этим уравнением, заставляя исчезнуть детерминизм.

Если уравнение Шрёдингера слишком сложное, чтобы написать его в этой книге, ему все-таки присуща математическая лаконичность. Надо еще ограничиться гравитацией и электростатической силой: если мы хотим принять во внимание две дополнительные силы (сильного и слабого взаимодействия), действующие лишь на микроскопическом уровне, но необходимые для правильной работы Вселенной, приходится признать, что записать все в одну строчку становится слишком сложно...

Но где физика, такая, какой она известна сейчас, действительно выходит из берегов – так это в области характеристик самих элементарных частиц: масса, заряд, спин. Каждая элементарная частица обладает собственным значением, и очень сложно объяснить почему. Все, что можно констатировать, это что если бы эти частицы обладали немного другим значением массы или заряда, во Вселенной не смогли бы сформироваться звезды и планеты и жизни не существовало бы.

В основе этого утверждения лежит антропный принцип: в тех мирах, где эти параметры другие, жизни нет, следовательно, нас там нет, чтобы в этом убедиться. Таким образом, все зависело бы от аспекта наблюдения: единственные видимые элементарные частицы те, которые обеспечивают наше существование, оправдывая наблюдаемые параметры. Все равно как если бы рыбка спросила, почему окружающая среда, в которой она живет, жидкая. Ответ: потому что иначе рыбки бы не было, чтобы задать этот вопрос. Но это не мешает существовать другой среде, недоступной ее органам чувств.

Между тем это утверждение не объясняет всего. На каждую обычную элементарную частицу приходится две более тяжелые и менее стабильные частицы, обладающие похожими свойствами. Например, у электрона есть два более редких коллеги, мюон и тау-лептон. Эти дополнительные частицы выглядят не слишком полезными и усложняют и без того уже длинный список. Это делает неустойчивым антропический взгляд на Вселенную, который мы только что предложили, и отдаляет нас от прекрасного единства фундаментальной физики, которое мы выдвинули на передний план.

Именно в сторону этой области направлено будущее фундаментальной физики. Стандартная модель, которой придерживаются сейчас, была предложена лишь в 1970-е гг., и ее опытное подтверждение продолжается в наши дни, как показывает обнаружение бозона Хиггса в 2012 г. Пока еще не хватает общего взгляда на совокупность всех частиц, как в конце XIX в. не хватало единой теории, чтобы связать вместе все составляющие классической физики.

Для достижения такого общего взгляда выдвинуты новые теории. Прекрасным примером таких теорий служит гипотеза суперсимметрии (чье описание выходит за рамки данной книги): многие физики считают, что природа не могла обойтись без столь элегантного и унитарного концепта. В своих рассуждениях они опираются на историю классической физики, которая похожа на «извилистый путь к концептуальной элегантности». Между тем сегодня прогресс науки ограничен недостатком технологических средств для экспериментального подтверждения теорий.

В то же время, независимо от этих более или менее эстетических рассуждений, в современных теориях скрыто множество более крупных подводных камней: например, общая теория относительности и квантовая физика вступают в противоречие, когда речь идет о плотности энергии, превосходящей определенный порог, как, например, внутри черных дыр. То есть две эти широкие грани современной физики в чем-то наверняка неверны или недостаточны, поскольку они несовместимы друг с другом!

Чтобы попытаться решить эту проблему, существуют другие теории: теория струн, которая также отличается большой концептуальной элегантностью, одна из них. Но здесь к экспериментальным ограничениям добавляется ограниченность возможности расчетов, что отбрасывает фазу зрелости этой теории в еще более далеко будущее.

Скорее всего, будущий прогресс фундаментальной физики будет связан с опытными наблюдениями, неожиданными для стандартной модели. Именно в этом огромное преимущество БАК и других ускорителей частиц, с помощью которых намереваются создать другие неизвестные частицы, которые выдадут «путевой лист» теории, позволяющей проникнуть глубже в суть вещей.

В этом отношении тайны бесконечно большого соседствуют с тайнами бесконечно малого. Связана ли тайна темной материи и темной энергии с существованием неизвестных частиц? Трудно сказать, будет ли следующее открытие в фундаментальной физике сделано с помощью телескопа или ускорителя частиц, но бурная деятельность в области современных исследований позволяет надеяться на стремительное развитие науки в ближайшие годы.

Три столпа вселенной

Фундаментальное уравнение, представленное в предыдущем параграфе, резюмирует центральное понятие, вокруг которого объединяется вся физика, – движение. Напомним упрощенную формулу этого уравнения: $ma^{\rightarrow} = F^{\rightarrow}$; (где m – масса тела в кг, $a^{\rightarrow}$ – его ускорение в м/с², а $F^{\rightarrow}$ – сумма четырех фундаментальных сил Вселенной).

Это уравнение предусматривает, что начало движения связано с действием четырех фундаментальных сил, эффективным настолько, насколько мала масса тела. Оно объединяет три главных кирпичика Вселенной: массу (кг), расстояние (м) и время (с). Сама сила объединяет в себе три эти понятия: являясь произведением массы на ускорение, она выражается в кг · м/с² (единица, которую для простоты называют ньютоном).

На этот счет есть замечательное утверждение: *ни одно явление, существующее в природе, не содержит в себе ничего другого, кроме трех понятий – массы, времени и расстояния*. Чтобы в этом убедиться, сделаем обзор других физических величин, используемых для описания этих явлений.

Кроме силы широко используется понятие энергии. Пример энергии $E = \frac{1}{2}mv^2$ показывает, что она выражается в кг · (м/с)². Мы также могли бы в качестве иллюстрации взять $E = mc^2$: энергия также объединяет в себе три базовых кирпичика.

А как же температура? Это кинетическая энергия перемещения молекул в заданном направлении, то есть ее тоже можно выразить в кг · (м/с)². Обычно мы предпочитаем использовать для этого шкалу Кельвина или Цельсия, что более логично, но не следует забывать,

что понятие тепла или холода есть не что иное, как передача энергии на микроскопическом уровне.

Продолжим наш обзор физики. Оптика и электричество, в частности, основаны на действии электромагнитной силы. Между тем она вводит понятие заряда, которое, казалось бы, не согласуется с концепцией времени, расстояния или массы. Но связь все-таки существует! Чтобы в этом убедиться, полезно сравнить выражение двух фундаментальных сил не квантовой физики: гравитации $F = G \frac{Mm}{r^2}$ и электростатической силы $F = k \frac{Qq}{r^2}$.

Первая пропорциональна произведению взаимодействующих масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния, которое их разделяет. Во второй массы просто заменены зарядами.

В этом прекрасном сходстве очевидна аналогия между произведением $Q \cdot q$ и $M \cdot m$: вообще-то можно выразить их одной единицей, при условии, что $k = G$, и соответствующим образом адаптировать значение зарядов. Другими словами, заряд можно выразить в кг в системе, где постоянная k будет равна G (отметим, что заряды при этом имели бы колоссальное значение, отражая слабость гравитации по сравнению с электростатической силой). Использование единицы заряда, кулона, не является необходимым: она возникла в ходе развития науки, когда гравитацию и электростатику стали рассматривать отдельно друг от друга. Отметим, что это не противоречит тому, что объект может отдельно иметь массу и заряд: эти два параметра вовсе не идентичны только потому, что оба могут выражаться в кг.

С помощью понятий массы, времени и расстояния можно описать все явления механики, термодинамики, электричества и оптики, затронутые в этой книге.

А как обстоит дело с современной физикой?

Теория относительности построена вокруг фундаментальной константы: скорости света в вакууме c , которая выражается м/с. Какие-либо дополнительные единицы не требуются. Что касается квантовой физики, она строится вокруг постоянной Планка h . Речь идет о моменте импульса, то есть она выражается в $\text{кг} \cdot (\text{м/с})^2$. И снова мы видим перестановку трех базовых концептов – массы, времени и расстояния. Вся Вселенная держится на этих трех величинах!

Это утверждение приводит нас к еще более поразительному выводу: все законы Вселенной строятся вокруг всего лишь трех фундаментальных констант, напрямую связанных с существованием трех ключевых величин, которые мы выдвинули на передний план. Вот они:

G : гравитационная постоянная, выражается $(\text{м}^3/\text{кг})/\text{с}^2$

Это скрепа классической физики.

c : скорость света в вакууме, выражается м/с

Это скрепа теории относительности.

h : постоянная Планка, выражается $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$

Это краеугольный камень квантовой физики.

Единственные дополнительные элементы, необходимые для понимания единства Вселенной, – это свойства элементарных частиц: их масса, заряд и спин. Мы уже говорили об этом в предыдущем параграфе: происхождение значения этих параметров – это главная тайна, которая по сей день присутствует в стандартной модели. Исследовательские работы в физике продолжаются как на теоретическом, так и на экспериментальном уровне. Возможно, однажды появится всеобъемлющая теория, вершина пирамиды, с которой вырисовывается вся Вселенная. Мы уже не очень далеки от этого.

Физика и метафизика

Ранее мы рассматривали прошлые и будущие открытия фундаментальной физики. Между тем даже старая добрая классическая физика XIX в. по-прежнему может перевернуть нашу повседневную жизнь. Почти все технологические достижения, которыми мы пользуемся каждый день, основаны на законах классической физики. Одно дело – понять источник наблюдаемых законов, другое дело – применить их в сложных системах, где смешиваются процессы микро- и макромира.

Все больше и больше это взаимопроникновение масштабов потребует применения квантовой физики начала XX в. для технологий будущего: «квантовые компьютеры» – один из подобных многообещающих способов применения.

Если законам физики суждено применяться в технологиях все более и более сложных, они также позволят понять особенно сложные природные системы. Так произошло с химией, в прошлом широко используемой шарлатанами, но которая мало-помалу была теоретически обоснована благодаря квантовой физике.

От химии мы естественным образом переходим к биологии, которая есть не что иное, как чрезвычайно сложная химия. Примером этого служит человеческое тело.

На этом этапе сложность физико-химических процессов такова, что детерминизм законов природы нашего масштаба кажется неразличимым. Впрочем, мы замечаем это во многих областях, например в прогнозе погоды: невозможно предвидеть погоду, которая будет через год, потому что необходимо учесть гигантское число разных параметров. Невозможно не только свести эти параметры воедино, чтобы вывести заключение, но и невозможно знать общий состав этих параметров. Это иллюстрирует знаменитый «эффект бабочки»: если мотылек где-то взмахнул крыльями, этого достаточно, чтобы изменить погоду, которая будет через год...

Подобное же наблюдение мы встречаем в области информатики, где поведение машины может казаться хаотичным из-за сложности задействованных процессов. Что сказать тогда о столь совершенном механизме, как человеческое тело? Мы понимаем, что многие феномены в этой области могут показаться случайными, в то время как они управляются детерминистскими законами.

В этой связи невольно задумаешься о том, что кажется специфической особенностью человека: поскольку он наделен сознанием, создается впечатление, что человек может воздействовать на природу и сохранять свободу воли, по крайней мере внешне. Другими словами, человек это не только тело, это еще и дух...

«Сознание», «свобода воли»... мы только что перешли в область философии, что, казалось бы, совершенно выходит за рамки данной книги. Между тем многие вопросы, ранее относившиеся к философии, в итоге перешли в область науки. Например, теория относительности, без сомнения, внесла свой вклад в понятие времени и пространства. Не говоря уже о явлениях, которые по незнанию раньше приписывались богам (или Богу), а сегодня разгаданы, то есть по большей части подчинены человеку.

Точно так же многие вопросы, которые сегодня относятся к области философии, в близком или далеком будущем могли бы стать достоянием науки. Ими мы и завершим эту книгу.

Возьмем два самых простых примера.

Первый касается «свободы воли». С точки зрения философии, вопрос состоит в следующем: обладает ли человек свободой воли, которая позволяет ему воздействовать на окружающую среду как «маленькому богу», а не как животному-машине?

Если ответ – да, это значит, что человек должен в определенной степени быть способным влиять на окружающую среду, независимо от материальных причин. Это влияние осуществляется благодаря его телу, но само оно подчиняется «традиционным» законам природы, как любая другая материальная система.

Рассмотрим в таком случае мозг: если человек способен нарушить работу объективного мира, то это происходит именно здесь. От мозга информация распространяется по всему телу с помощью относительно известных физических процессов, которые подчиняются старым добрым детерминистским законам классической физики. Что же происходит в мозге внутри нейронов? Сейчас мы не можем ответить на этот вопрос, потому что мозг очень плохо изучен, особенно на микроскопическом уровне. Но на уровне имеющихся знаний можно выдвинуть несколько гипотез.

Первая гипотеза состоит в том, что процесс принятия решения происходит в более крупном масштабе, чем уровень атомов. В этом случае кажется маловероятным, что детерминистские законы природы, действующие повсюду, внезапно изменились на уровне молекул мозга. Если гипотеза верна, наша свобода воли является чистейшей иллюзией. В реальности с самого рождения все наши действия и мысли связаны с детерминистским воздействием окружающей среды на наше тело и мозг до молекулярного уровня. Крайняя сложность этих детерминистских процессов целиком маскирует физические причины, приводящие к решениям, которые мы принимаем. Но эти причины именно физические и детерминистские: это значит, что наши действия на протяжении жизни были предсказуемы еще до того, как мы родились. В каком-то смысле наша судьба уже предначертана.

Вторая гипотеза состоит в том, что процесс принятия решения происходит в объективном мире на уровне атома или еще более мелких масштабов внутри мозга. В этом случае применяются законы квантовой физики, которые не являются детерминистскими, то есть нашим поведением не управляет никакая предначертанная судьба, поскольку оно управляется недетерминистскими законами.

Большое преимущество человеческого тела в том, что оно очень структурировано (другими словами, оно обладает очень слабой энтропией): это значит, что простой локальный феномен на атомном уровне внутри мозга, возможно, может передаваться от одной частицы к другой, пока не затронет уровень более крупного масштаба. Согласно этой теории (разумеется, пока не подкреплённой ни одним опытом, чтобы можно было ее подтвердить или опровергнуть), простой «квантовый скачок» электрона в атоме мог бы привести, например, к поднятию руки.

Это означало бы, что наше воздействие на окружающую среду частично управляется квантовыми, то есть случайными, процессами. Благодаря прямой связи, которую мы образуем между микро- и макромасштабами, мы были бы машинами, чье макроскопическое окружение не является детерминистским! Это составило бы совершенно исключительное свойство человеческого тела: человек мог бы нарушить предначертанную Вселенной судьбу на макроскопическом уровне, позволив вмешаться случайным процессам.

Но согласно второй гипотезе наша свободная воля так же ничего не значит, как и в первой гипотезе, поскольку наши решения имеют случайную составляющую! Выбираем не мы, а случайность, свойственная квантовой физике...

При настоящем уровне знаний лишь две эти гипотезы могут удовлетворять законам физики. Но мы все-таки представим третью гипотезу, которую физик наверняка будет рассматривать неохотно, ибо она подвергает сомнению нынешнюю систему. Она состоит в том, что в некоторых случаях «нечто» способно влиять на случайность квантового выбора. Вспомним, что согласно квантовой физике частица «выбирает», в каком месте ей оказаться, так что ничто не может объяснить этот выбор. Это один из самых будоражающих выводов квантовой физики. Третья гипотеза подразумевает, что «нечто» способно в некоторой степени управлять этим выбором.

В этом и только в этом случае мы перестаем быть существами-машинами, а становимся сознательными созданиями с реальной возможностью воздействовать на окружающую среду, независимо от какой бы то ни было материальной причины. Это чувство свободы воздействия на окружающий мир в итоге разделяет большинство человечества; но мы видим, что это требует пересмотра некоторых выводов квантовой физики при некоторых особенных процессах (которые еще предстоит выявить!), происходящих, к примеру, в мозге. Сильная сторона этих умозаключений в том, что они не навсегда останутся в области философии: однажды, быть может, мы раскроем работу мозга до атомного уровня. Когда этот день придет, мы наверняка сможем выбрать между тремя гипотезами... Но, увы, этот день принадлежит к пока еще далекому будущему...

Второй пример философского размышления, который однажды может стать достоянием науки, касается самого сознания: он тесно связан с предыдущими размышлениями. Вопрос следующий: какая физическая разница объясняет, что у меня сознание есть, а у бактерии его (наверное) нет?

Другими словами, что создает сознание? Существует ли какая-то материальная структура, отвечающая за его создание, например такая, какую мы видим в мозге? Этот вопрос затрагивает область, очень близкую к «способности воздействовать на окружающую среду», которую мы упоминали выше. Где совершается переход от субъективного («я хочу поднять руку») к объективному («мой мозг посылает электрический сигнал руке, чтобы она поднялась»)? Где совершается переход от объективного («фотон с длиной волны 0,7 мкм заставляет вибрировать заряды моего главного нерва») к субъективному («я вижу красный цвет»)?

Физика никак не влияет на субъективное, поскольку она изучает лишь материальный мир и законы, которые им управляют. Но она может заинтересоваться связью между ними, изучая объективную сторону этой связи. Наблюдение за работой мозга на микроскопическом уровне открывает широкие возможности потенциального изучения.

Существует много интереснейших нерешенных задач в работе настойчивых ученых-физиков. Чтобы их прояснить, им необходимо проводить опыты, с каждым разом все более точные,

на основе которых они попытаются выстроить теории еще более связные и единые. И возможно, однажды, через тысячу лет, наши потомки с улыбкой взглянут на философские размышления своих предков, сочувствуя ученым, которые поняли, что эти проблемы всего лишь логическое проявление единых фундаментальных законов природы...

Что еще почитать?

Читатель, желающий более основательно разобраться в физических явлениях и понятиях, может с большой пользой для себя ознакомиться со следующими замечательными трудами:

Альберт Эйнштейн. О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение).

Ричард Фейнман, Роберт Лейтон, Мэтью Сэндс. Фейнмановские лекции по физике.

Брайан Грин. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории.

Леонард Сасскинд, Джордж Грабовски. Теоретический минимум. Все, что нужно знать о современной физике.

Брайан Кокс, Джефф Форишоу. Квантовая вселенная. Как устроено то, что мы не можем увидеть.

ПикOVER Клиффорд. Великая физика. От Большого взрыва до Квантового воскрешения. 250 основных вех в истории физики.

Джим Белл. Великий космос. От начала и до конца времен. 250 основных вех в истории космоса и астрономии.

Сноски

1

Физические науки – термин, изредка использующийся для обозначения естественных наук, которые не изучают живую природу. (*Здесь и далее прим. науч. ред.*)

2

Технически это не так. Земля и звезды движутся относительно друг друга, просто медленно.

3

Тут надо сделать оговорку. Тело с положительной массой притягивало бы ВСЕ, кроме объектов с отрицательной массой.

4

Утверждение неверное. Положительные массы могут притягивать только (!) положительные, но никак не отрицательные. О чем, собственно, и говорится в следующем абзаце.

5

Это уже будет сила сопротивления воздуха, или аэродинамическое сопротивление.

6

Уточним: не давление уравнивает вес, а сила. (*Прим. науч. ред.*)

7

Первое начало термодинамики обычно записывают иначе, хотя запись автора тоже верна.