Нил Деграсс Тайсон

Майкл А. Стросс

Дж. Ричард Готт

БОЛЬШОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПУТЕШЕСТВИЕ

Annotation

Основой этой книги стал курс Принстонского университета, который читали гуманитариям три знаменитых астрофизика – Нил Деграсс Тайсон, Майкл Стросс и Джон Ричард Готт. Они рассказывают о том, что любят больше всего, и рассказывают так, что самые сложные теории становятся понятны неспециалистам.

Астрономы не привыкли усложнять то, что может быть простым. Большие красные звезды – это красные гиганты. Маленькие белые звезды – это белые карлики. Если звезда пульсирует, она называется пульсар. Даже начало всего пространства, времени, материи и энергии, что существуют в космосе, можно назвать всего двумя простыми словами: Большой Взрыв.

Что мы знаем о Вселенной? Наша Вселенная велика. Наш Космос гораздо больше, чем кажется. Он жарче, чем вы думаете. Плотнее, чем вы думаете. Разреженнее, чем вы думаете. Что бы вы ни думали о Вселенной, реальность все равно окажется невероятнее.

Добро пожаловать во Вселенную!

- Нил Деграсс Тайсон, Майкл А. Стросс, Дж. Ричард Готт
  -
  - Открытая лабораторная рекомендует
    -
    - От издательства
  - Предисловие
  - Часть 1
    - Глава 1
    - Глава 2
    - Глава 3
    - Глава 4
    - Глава 5
    - Глава 6
    - Глава 7
    - Глава 8
    - Глава 9
    - Глава 10
  - Часть 2
    -

        - Глава 11
        - Глава 12
        - Глава 13
        - Глава 14
        - Глава 15
        - Глава 16
    - Часть 3
        -
        - Глава 17
        - Глава 18
        - Глава 19
        - Глава 20
        - Глава 21
        - Глава 22
        - Глава 23
        - Глава 24
    - Благодарности
    - Приложение 1
    - Приложение 2
    - Список литературы
- notes
    - 1
    - 2
    - 3
    - 4
    - 5
    - 6
    - 7
    - 8
    - 9
    - 10
    - 11
    - 12
    - 13
    - 14
    - 15
    - 16
    - 17
    - 18

- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35
- 36
- 37
- 38
- 39
- 40
- 41
- 42
- 43
- 44
- 45
- 46
- 47
- 48

Нил Деграсс Тайсон, Майкл А. Стросс, Дж. Ричард Готт
Большое космическое путешествие

Права на издание получены по соглашению с Princeton University Press. Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Информация, содержащаяся в данной книге, получена из источников, рассматриваемых издательством как надежные. Тем не менее, имея в виду возможные человеческие или технические ошибки, издательство не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимых сведений и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

© 2016 by Neil deGrasse Tyson, Michael A. Strauss, and J. Richard Gott
© Перевод на русский язык ООО Издательство «Питер», 2018
© Издание на русском языке, оформление ООО Издательство «Питер», 2018
© Серия «New Science», 2018

Открытая лабораторная рекомендует

Александр Сергеев, научный редактор книги; научный редактор и автор заданий в проекте «Открытая лабораторная» (openlaba.com)

В седьмом классе школы мне в руки попался учебник «Астрономия 10». Он оказался таким скучным, что я даже пытался сочинить ему замену. Все самое захватывающее – взрывающиеся звезды, далекие галактики, расширение Вселенной – было скомкано в несколько заключительных параграфов, которые полагалось изучать в последней четверти выпускного класса. Глушить самую романтичную науку такими сухими текстами – настоящее преступление перед любознательностью. Не потому ли многие вполне культурные люди путаются даже в самых элементарных представлениях о Вселенной?

Весной 2017 года я участвовал в организации первой «Всероссийской лабораторной». Это открытая для всех желающих самопроверка на понимание основ научной картины мира. Оказалось, что треть участников акции не знала, что в прошлом Вселенная была очень горячей, хотя, казалось бы, кто в наше время не слышал о теории Большого взрыва? Около сорока процентов согласились с ошибочным суждением, что смена дня и ночи связана с вращением Земли вокруг Солнца. А темную и обратную сторону Луны путали почти три четверти участников. И это ведь показатели среди людей, которые сами пришли на «Лабу», а значит, хоть немного, но интересуются наукой.

Думаю, все это – следствие того, что школьное обучение основам наук традиционно строится по модели упрощенно-сокращенного университетского курса. Детям дают некоторый минимум профессиональных научных сведений, чтобы с их помощью потом решать специально подогнанный под этот минимум набор шаблонных задач. Радость познания, которая должна сопровождать приобщение к тайнам Вселенной, подменяется натаскиванием на символические манипуляции, имитирующие работу ученых. Любопытство – драгоценный ресурс, который нельзя растрачивать на второстепенные технические вещи, пока не сформирован устойчивый интерес к науке. Отшлифованные безэмоциональные формулировки хороши для тех, кто зашел по этому пути достаточно далеко. А начинающим важнее просто привыкать к базовым научным идеям, вводить их в круг знакомых вещей, даже, может быть,

вырабатывать к ним чуть фамильярное отношение.

Эту задачу блестяще решает в первом разделе книги Нил Деграсс Тайсон, один из самых известных в мире популяризаторов астрономии. Начав с быстрого погружения в масштабы астрономических явлений, он почти сразу переходит к самому интересному – энергии и эволюции звезд, планетам и поискам внеземной жизни. При этом, как бы между делом, читатель вместе с автором проделывает несложные, но важные расчеты. Поэтому числа, которые во многих астрономических книжках воспринимаются, как просто «что-то очень большое», обретают ощутимый масштаб, а формулы наполняются вполне ясным смыслом и уже не смотрятся иллюстрациями, которые можно «пропустить без ущерба для понимания».

Во втором разделе астрофизик и космолог Майкл Стросс разворачивает на заложенном фундаменте картину Вселенной в самых крупных доступных нам масштабах. Это галактики и Великие стены из их скоплений, темная материя и сверхмассивные черные дыры, рождение Вселенной и ее самый ранний снимок, запечатленный реликтовым излучением прямо на небесной сфере. Фактически этот раздел книги охватывает весь доступный нашим наблюдениям физический мир. А вместе первые два раздела покрывают большую часть тем школьного курса астрономии, только при этом они не убивают, а подпитывают любопытство. Наверное, было бы слишком радикально предлагать эту книгу в качестве учебника астрономии, но помечтать о чем-то подобном все же можно.

А дальше начинается совсем уже невероятная наука, граничащая с научной фантастикой. Автор третьего раздела, принстонский астрофизик и специалист по общей теории относительности Ричард Готт известен своими работами о путешествиях во времени и кротовых норах. И это не досужие выдумки, а следствия, выводимые из хорошо проверенных уравнений эйнштейновской теории, хотя и в довольно специальных случаях. Рассказ об этом приходится начинать с краткого изложения основных идей теории относительности. И тут уже от читателя потребуется определенное упорство, чтобы проследить за изложением. Наградой за эти усилия станет возможность мысленно заглянуть в уголки Вселенной, принципиально недоступные никакому наблюдению: во внутренности вращающихся черных дыр, в эпоху до Большого взрыва, в параллельные Вселенные, которые по современным представлениям не менее реальны, чем наша.

Экскурс по Вселенной и ее окрестностям завершается там же, где и начался – на крошечной планете Земля. Тысячную доли процента от

времени жизни Вселенной здесь обитает человечество. И лишь в последнюю тысячную долю своей истории оно стало осознавать подлинные масштабы окружающего мира. Это сознание порождает смешанные чувства: скромность от понимания своих масштабов, гордость за способность, тем не менее, охватить мыслью всю эту колоссальную Вселенную и тревогу за крошечную искру разума, которая вполне может скоро и бесследно угаснуть, если специально не позаботиться о ее сбережении.

Частью такой заботы как раз и станет чтение этой книги. Ведь прояснение научной картины мира у себя в голове (уверен, внимательные читатели перестанут ошибаться в астрономических вопросах «Лабы») способствует общему повышению адекватности в принятии решений и поведении, а это, в конечном счете, влияет на судьбу всего человечества.

Добро пожаловать во Вселенную!

От издательства

Ваши замечания, предложения, вопросы отправляйте по адресу comp@piter.com (издательство «Питер», редакция научно-популярной и компьютерной литературы).

Мы будем рады узнать ваше мнение!

Для скачивания цветных иллюстраций книги воспользуйтесь ссылкой goo.gl/c6nvX1 или QR-кодом.

На веб-сайте издательства www.piter.com вы найдете подробную информацию о наших книгах.

В память о Лаймане Спитцере-младшем, Мартине Шварцшильде, Богдане Пачинском и Джоне Бакале, которые своим примером окончательно и бесповоротно сподвигли нас троих к исследованиям в области астрофизики и преподавательской деятельности

Предисловие

Одной из первых фраз, которую я сказал моей новорожденной внучке Эллисон, была «Добро пожаловать во Вселенную!» Мой соавтор Нил Тайсон многократно произносил ее в теле- и радиоэфире. На самом деле это одна из коронных фраз Нила. Родившись, вы становитесь гражданином Вселенной. А значит, вам подобает осмотреться и полюбопытствовать, что за мир вас окружает.

Нил ощутил зов Вселенной, когда впервые посетил Планетарий Хейдена в Нью-Йорке. Тогда Нилу было девять. Ребенок, выросший в городе, он впервые узрел красоты ночного неба на куполе планетария и именно в тот момент решил стать астрономом. Сегодня Нил – директор этого планетария.

Вообще говоря, частичка Вселенной есть в каждом из нас. Водород, который есть в нашем организме, – почти ровесник Вселенной, а другие элементы, имеющиеся в нашем теле, родились в далеких, давно угасших звездах. Когда вы звоните другу с мобильного – будьте благодарны за это астрономам. Технологии мобильной связи подчиняются уравнениям Максвелла, а проверить их удалось потому, что к моменту открытия этих уравнений астрономы уже измерили скорость света. Система GPS, фиксирующая местоположение телефона, работает на основе общей теории относительности Эйнштейна, которую также проверили на астрономических наблюдениях, измерив отклонение лучей звездного света, проходящего вблизи от Солнца. А вы знали, что есть предельный объем информации, которую можно сохранить на шестидюймовом жестком диске, и этот предел обусловлен физикой черных дыр? Более прозаический пример – регулярная смена времен года зависит от наклона земной оси к плоскости орбиты, по которой Земля вращается вокруг Солнца.

Цель этой книги – лучше познакомить вас со Вселенной, в которой вы живете. Идея книги зародилась, когда три ее автора преподавали на старших курсах Принстонского университета новый курс о Вселенной для студентов-гуманитариев, которые до этого никогда не посещали курсов по естественным наукам. Наша коллега Нета Бакал, директор учебных программ, поручила эту задачу Нилу Деграссу Тайсону, Майклу Строссу и мне. Очевидно, что Нил гениально умеет объяснять естественнонаучные вопросы неспециалистам. Майкл незадолго до того открыл самый далекий квазар, обнаруженный во Вселенной, а я получил Президентскую премию

«За выдающиеся преподавательские заслуги». Курс начался с помпой и привлек такое множество студентов, что мы не смогли принять их в нашем корпусе и были вынуждены перебазироваться в более вместительный лекционный зал на физическом факультете. Нил рассказывал о «Звездах и планетах», Майкл о «Галактиках и квазарах», а я об «Эйнштейне, теории относительности и космологии». Об этом курсе написали в журнале *Time*, причем это издание отметило Нила в числе одного из ста наиболее влиятельных людей за 2007 год. На страницах этой книги вы узнаете, какие вещи Нил рассказывает своим студентам.

Мы читали этот курс несколько лет, а потом решили изложить его идеи в книге – для читателей, жаждущих глубже познать Вселенную. Мы приглашаем вас в большое космическое путешествие по маршруту, проложенному астрофизиками. Мы попытаемся понять, что же творится во Вселенной. Мы расскажем вам, как Ньютон и Эйнштейн пришли к своим величайшим идеям. Все знают знаменитого Стивена Хокинга. А мы расскажем, чем он прославился. Есть великолепный биографический фильм о Хокинге, «Теория всего», а Эдди Редмэйн получил Оскар в номинации «лучшая мужская роль» за то, как убедительно сыграл Хокинга в этом фильме. В кино величайшая идея внезапно осеняет Хокинга, когда он просто смотрит на огонь. Но мы расскажем о том, что не попало в фильм: как Хокинг не соглашался с исследованиями Яакова Бекенштейна, но в итоге переработал их и пришел к совершенно новому выводу.

В то же время тот самый Яаков Бекенштейн обнаружил абсолютно предельный объем информации, который можно сохранить на шестидюймовом жестком диске. Все это связано. В этой книге мы рассказываем о наших любимейших темах из истории Вселенной – надеемся, наш интерес окажется заразительным.

С тех пор как мы начали этот курс, астрономические знания значительно обогатились, и в книге это отражено. Мнение Нила о статусе Плутона было подтверждено Международным астрономическим союзом по итогам исторического голосования, состоявшегося в 2006 году.

Рис. 0.1. Трое авторов, слева направо: Стросс, Готт, Тайсон. Публикуется с разрешения: Дениза Эпплуайт, Принстон

На орбитах вокруг других звезд были открыты тысячи новых планет. Мы поговорим о них. Сегодня с исключительной точностью построена стандартная космологическая модель, включающая обычные атомные ядра, темную материю и темную энергию. Все благодаря результатам работы

космического телескопа «Хаббл», «Слоановского цифрового обзора неба», Зонда для изучения анизотропии космического микроволнового излучения им. Уилкинсона (WMAP) и спутника «Планк». На Большом адронном коллайдере в Европе физики отрыли бозон Хиггса, еще на шаг приблизившись к вожделенной Теории Всего. Обсерватория LIGO (лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория) позволила непосредственно наблюдать гравитационные волны, образовавшиеся при столкновении двух черных дыр, по спирали врезавшихся друг в друга.

Мы расскажем, как астрономы определили массовую долю темной материи во Вселенной и откуда мы знаем, что эта материя отличается от обычной, то есть не содержит атомных ядер с протонами и нейтронами. Мы объясним, откуда известна плотность темной энергии и откуда мы знаем, что она оказывает отрицательное давление. Мы обсудим современные соображения о происхождении Вселенной и о том, какая эволюция ей предстоит в будущем. Все эти вопросы приведут нас на передний край современных физических знаний. Мы публикуем в книге восхитительные снимки, сделанные космическим телескопом Хаббл, зондом WMAP, космическим аппаратом «Новые горизонты» (этот аппарат сфотографировал Плутон и его спутник Харон).

От физики захватывает дух. Нил продемонстрирует это уже в первой главе. Многие испытывают трепет от таких вещей, одновременно представляя себя крошечными и ничтожными. Но наша цель – помочь вам понять Вселенную. Тогда вы ощутите силу. Мы узнали, как действует гравитация, как развиваются звезды, каков возраст Вселенной. Это триумфальные достижения человека-мыслителя и человека-наблюдателя. Это должно вселить в вас гордость, ведь и вы – представитель человеческого рода.

Вселенная манит. Поехали!

Дж. Ричард Готт

Принстон, штат Нью-Джерси

Часть 1
Звезды, планеты, жизнь

Глава 1
Размер и масштабы Вселенной

Автор: Нил Деграсс Тайсон

Сначала мы поговорим о звездах, затем поднимемся на уровень Галактики, далее окинем взглядом Вселенную и заглянем за ее пределы. Помните, как говаривал Базз Лайтер из «Истории игрушек»? – «Бесконечность – не предел!».

Наша Вселенная велика. Позвольте рассказать вам о размерах и масштабах нашего Космоса, который гораздо больше, чем вам кажется. Он жарче, чем вы думаете. Плотнее, чем вы думаете. Разреженнее, чем вы думаете. Что бы вы ни думали о Вселенной, реальность все равно невероятнее. Давайте сперва проведем небольшую инвентаризацию. Хотел бы сориентировать вас по некоторым числам, большим и малым, так, чтобы разговор получился более предметным, чтобы стало понятнее, что во Вселенной какой размер имеет. Начнем с единицы. Вы, конечно, уже видели эту цифру раньше. Она – палочка без нулей. Если бы я записал ее в виде степени, то получилось бы 10^0. Справа от единицы нулей нет, поэтому $1 = 10^0$. Разумеется, 10 можно записать как 10 в первой степени, то есть 10^1. Дойдем до тысячи, 10^3. Какой префикс в метрической системе означает «тысяча»? *Кило*. В килограмме тысяча граммов, в километре – тысяча метров. Добавим еще три нуля, получится миллион, 10^6. Миллиону соответствует приставка «*мега*». Возможно, только до миллиона люди и умели считать, когда изобретали мегафон; наверное, они не задумывались о миллиарде, в котором еще на три нуля больше, всего 10^9. Тогда, может быть, назвали бы громкоговоритель «гигафоном». Если вы обращали внимание на размеры файлов у вас в компьютере, то наверняка знаете слова «мегабайт» и «гигабайт». В гигабайте миллиард байт[1]. Не уверен, что вы вполне представляете себе величину «миллиард». Давайте осмотримся и вспомним, что считают миллиардами.

Во-первых, на Земле живет семь миллиардов человек.

Билл Гейтс – знаете такого? Когда я в последний раз уточнял его состояние, оно тянуло на 80 миллиардов долларов. Билл Гейтс – покровитель гиков; в кои-то веки гики правят миром. В истории такого еще не бывало. Но времена меняются. А 100 миллиардов видели? Ну ладно,

почти 100 – знаете где? В Макдоналдсе. «Мы обслужили более 99 миллиардов гостей». Это самое большое число, которое можно увидеть на улице. Помню, когда они включили этот счетчик; в моем детстве у них на рекламе красовалось: «Мы обслужили более 8 миллиардов гостей». На табло в Макдоналдсе никогда не отображается 100 миллиардов, потому что бургер-счетчик имеет всего два разряда, так что они остановились на 99 миллиардах. Потом они воззвали к Карлу Сагану и с тех пор пишут: «Мы обслужили миллиарды и миллиарды».

Возьмите 100 миллиардов гамбургеров и уложите их в ряд. Начинайте от Нью-Йорка и двигайтесь на запад. Как думаете, до Чикаго доберетесь? Естественно. А до Калифорнии? Несомненно. Далее на гамбургеры придется цеплять поплавки. Расчеты делаются, исходя из диаметра булочки (10 сантиметров), сам-то гамбургер немного поменьше. Итак, считаем булочками. Выкладываем из булочек мост через океан по дуге большого круга. Так мы минуем Тихий океан, Австралию, Африку, пересечем Атлантику и вновь вернемся в город Нью-Йорк. Да, гамбургеров потребуется много, но ведь от 100 миллиардов гамбургеров что-то еще останется. Вы успеете выложить вокруг Земли еще 215 гамбургерных колец, а гамбургеры-то все не кончаются. Итак, после 216 кругосветных гамбургерных путешествий вы берете остальные булочки и начинаете укладывать их друг на друга. Высота булочки – 5 сантиметров. Вы сделаете гамбургерную башню до Луны и еще одну от Луны до Земли – и только тогда израсходуете все 100 миллиардов гамбургеров. Вот почему коровы так боятся Макдоналдса. Для сравнения: в галактике Млечный Путь около 300 миллиардов звезд. Макдоналдсу пора начинать космическую экспансию.

Когда вам стукнет 31 год, 7 месяцев, 9 часов, 4 минуты и 20 секунд, вы как раз проживете свою миллиардную секунду. Я отметил этот возраст, откупорив бутылку шампанского. Бутылочка была небольшая. Да, нечасто отмечаешь миллиард секунд.

Идем дальше. Какое большое число впереди? Триллион, 1012. В метрической системе и для него есть префикс, «*тера*». Досчитать до триллиона невозможно. Если хотите – попробуйте, конечно. Но если называть по числу в секунду, то у вас ушла бы на это 31 тысяча лет, так что не рекомендую проделывать такой опыт даже дома. Триллион секунд назад пещерные люди – троглодиты – начали рисовать на стенах родных гротов.

В Роуз-центре Земли и Космоса в Нью-Йорке мы изобразили хронологию Вселенной в виде спирали, которая начинается с Большого взрыва и раскручивается на протяжении 13,8 миллиарда лет. В развернутом

виде эта спираль протянулась бы через целое футбольное поле. Каждый шаг вдоль нее равен 50 миллионов лет. Вы проходите ее целиком и спрашиваете: а где же мы? Вся наша история, которая началась триллион секунд назад и заканчивается сегодня, в каменных джунглях, населенных троглодитами-граффитистами, на этой шкале сравнима с толщиной пряди человеческих волос. Вы думаете, что мы живем долго, что цивилизации существуют веками? Но только не в масштабах космоса.

Что дальше? 10^{15}. Это квадриллион, в метрической системе имеет префикс «*пета*». Это одно из моих любимых чисел. На (и в) Земле обитают от 1 до 10 квадриллионов муравьев, как считает эксперт-мирмеколог Э.О. Уилсон.

Что дальше? 1018, квинтиллион, приставка в метрической системе – «*экса*». Примерно столько песчинок лежит на 10 больших пляжах. Самый известный пляж в мире – Копакабана в Рио-де-Жанейро. Он протянулся на 4,2 километра и имел 55 метров в ширину, пока его не раздвинули до 140 метров, досыпав туда 3,5 миллиона кубических метров песка. Средний размер песчинки на Копакабане на уровне моря составляет треть миллиметра. То есть в кубическом миллиметре 27 песчинок, а в 3,5 миллиона кубических метрах такого песка – около 10^{17} песчинок. Итак, примерно на 10 пляжах размером с Копакабану должен набраться квинтиллион песчинок.

Умножив это число еще на тысячу, получаем 10^{21}, секстиллион. Мы начинали с километров, потом дошли до мегафонов, гамбургеров из Макдоналдса, пещерных художников-кроманьонцев, муравьев, песчинок и, наконец, прибыли сюда.

10 секстиллионов – это

количество звезд в наблюдаемой части Вселенной.

Есть люди, которые ежедневно заявляют, что мы одиноки в этом космосе. Они просто понятия не имеют о больших числах и о космосе. Позже мы подробнее расскажем, что такое *наблюдаемая Вселенная*, то есть часть Вселенной, которую мы можем видеть.

А теперь позвольте перейти к значительно более крупным числам, гораздо больше секстиллиона – как насчет 10^{81}? Насколько мне известно, у этого числа нет названия. Это количество атомов в наблюдаемой части Вселенной. Зачем вообще может понадобиться число еще крупнее? Что «на Земле» можно было бы им сосчитать? Поговорим о 10100, симпатичном

круглом числе. Это *гугол*. Не путать с Google – интернет-компанией, основатели которой специально написали слово googol с ошибками.

В наблюдаемой части Вселенной нет таких объектов, которых бы насчитывался целый гугол. Это просто забавное число. Его можно записать как 10^{100} либо, если ваш компьютер не ставит верхних индексов, вот так:10^100. Но в некоторых ситуациях большие числа все-таки могут пригодиться: например, если считать не *предметы*, а варианты событий, которые могут произойти. Сколько можно сыграть шахматных партий? Например, в партии можно объявить ничью в одном из следующих случаев: либо при троекратном повторении позиции одним из игроков, либо после 50 ходов без взятия и движения пешек, либо когда исчерпан материал для дальнейшей борьбы и ни одна из сторон не может поставить мат сопернику. Если предположить, что как только такая ситуация складывается в партии, игрок должен воспользоваться правом свести все на ничью, то можно подсчитать количество возможных шахматных партий. Рич Готт так и сделал, и у него получилось несколько меньше 10^(10^4,4). Это число значительно превосходит гугол, который можно записать как 10^(10^2). Если считать не предметы, а варианты развития событий, то можно получить очень большие числа.

Но есть и число гораздо больше гугола. Если гугол – это единица со ста нулями, то сколько будет 10 в степени гугол? У этого числа также есть название: *гуголплекс*. Это единица, за которой следует гугол нулей. Можно ли хотя бы записать такое число? Нетушки. Ведь в нем гугол нулей, а во Вселенной менее одного гугола атомов. Придется удовлетвориться записью10^{googol}, или$10^{10\text{^}100}$, или 10^(10^100). Если, конечно, есть охота, можете записать 10^{19} нулей на каждом атоме во Вселенной[2]… Но вы наверняка найдете занятие поинтереснее.

Я рассказываю обо всем этом не для того, чтобы убить ваше время. Просто я знаю число еще больше, чем гуголплекс. Яаков Бекенштейн изобрел формулу, позволяющую оценить максимальное количество различных квантовых состояний, которые были бы сравнимы по массе с наблюдаемой частью Вселенной. Учитывая известное явление квантовой размытости, таким же будет и максимально возможное число наблюдаемых вселенных, подобных нашей. Это число 10^(10^124), в нем 10^{24} гуголплексов нулей. Среди этих 10^(10^124) вселенных попадаются самые разные – есть жуткие, переполненные черными дырами, а есть и почти такие же, как наша, только в такой вселенной в некоторый момент у вашего двойника в носу может оказаться на одну молекулу кислорода меньше, чем

здесь у вас, а у какого-то инопланетянина в космосе – на одну молекулу больше.

Так что очень большие числа и в самом деле не лишены практической пользы. Я не представляю, для чего могут понадобиться числа еще больше вышеописанного, но математики, конечно же, представляют. В одной теореме упоминается умопомрачительное число 10^(10^(10^34)), которое называется «*число Скьюза*». Математики упиваются размышлениями, страшно далекими от физической реальности.

Давайте побеседуем и о других вселенских крайностях.

Например, о плотности. Вы, конечно, интуитивно понимаете, что такое плотность, но давайте поговорим о космической плотности. Для начала исследуем воздух, которым дышим. С каждым кубическим сантиметром воздуха мы вдыхаем 2,5 x 10^{19} молекул – 78 % азота и 21 % кислорода.

Пожалуй, плотность 2,5 × 10^{19} молекул на кубический сантиметр выше, чем вы думали. Но давайте обсудим максимально чистый вакуум, который можно получить в лаборатории. Сегодня вполне удается снизить плотность до 100 молекул на кубический сантиметр. А межпланетное пространство? В солнечном ветре в районе земной орбиты содержится примерно 10 протонов на кубический сантиметр. Рассуждая здесь о плотности, я говорю о количестве молекул, атомов или свободных частиц, из которых состоит газ. Что насчет межзвездного пространства? Его плотность колеблется в зависимости от того, где вы очутились, но нередко встречаются области, где на кубический сантиметр приходится примерно один атом. Межгалактическое пространство гораздо разреженнее: там всего один атом на кубический метр.

Даже в лучших современных лабораториях невозможно получить столь чистые вакуумы. Существует старинная поговорка: «Природа не терпит пустоты». Люди, которые ее придумали, всю жизнь провели на поверхности Земли. На самом деле природа *любит* пустоту, поскольку большая часть Вселенной – это именно пустота. Говоря «природа», многие имеют в виду всего лишь нашу окружающую среду, укрытую одеялом атмосферы. Атмосфера действительно сразу заполняет любые доступные пустоты.

Допустим, я швырну куском мела в классную доску и подберу кусочек. Мел рассыпался в мельчайшую крошку. Предположим, каждая крошка имеет миллиметр в поперечнике. А теперь вообразим, что крошка – это протон. Знаете, какой атом устроен проще всех? Правильно, водород. У него в ядре один протон, и в обычном атоме водорода один электрон,

вращающийся вокруг ядра по единственной орбитали. Если крошка мела – это протон, то какого размера будет атом водорода? Как пляжный мяч? Нет, он будет куда больше – примерно 100 метров в поперечнике, примерно как 30-этажное здание. А что происходит в атоме? Атомы практически пустые. Между ядром и единственным электроном нет никаких частиц, электрон носится по своей единственной орбитали, которая, как известно из квантовой механики, является шарообразной и со всех сторон окружает ядро. Углубимся дальше и дальше в микромир, пока не достигнем следующего предела – сущностей настолько мелких, что их невозможно измерить. Мы до сих пор не знаем диаметр электрона, измерить его мы не в состоянии. Однако теория суперструн предполагает, что электрон может напоминать вибрирующую струну длиной $1{,}6 \times 10^{-35}$ метра.

Диаметр атома – около 10^{-10} (одной десятимиллиардной) метра. А что насчет 10^{-12} или 10^{-13} метра? Известны некоторые объекты такого размера – например, уран всего с одним электроном или экзотическая разновидность водорода, по орбитали которого вращается не электрон, а *мюон* – родственная электрону тяжелая частица. Такой объект, примерно в 200 раз меньше обычного атома водорода, имеет период полураспада около 2,2 микросекунды, поскольку спонтанно распадается сам мюон. Величины 10^{-14} или 10^{-15} м уже сопоставимы с размером атомного ядра.

Пойдем в другую крайность, поговорим о более высоких плотностях. Например, Солнце – оно плотное или не очень? Да, в недрах Солнце довольно плотное (и чертовски горячее), но по краям оно гораздо более разреженное. В среднем Солнце примерно в 1,4 раза плотнее воды. Плотность воды нам известна – один грамм на кубический сантиметр. В центре Солнца плотность вещества составляет примерно 160 граммов на кубический сантиметр. Но в этом отношении Солнце довольно заурядно. Мир звезд очень разнообразен. Некоторые из них чрезвычайно разбухают и становятся очень разреженными, другие коллапсируют, превращаясь в компактные и сверхплотные объекты. Давайте вновь поговорим о крошке мела (которую мы сравнили с протоном) и окружающей ее пустоте. Во Вселенной могут происходить процессы, при которых материя коллапсирует, плющится и сгущается, пока не достигает плотности атомного ядра. Получаются звезды, в которых атомные ядра тесно лежат бок о бок. Объекты с такими экзотическими свойствами состоят преимущественно из нейтронов – это и есть верхний предел плотности, известный во Вселенной.

Мы, астрономы, привыкли называть объекты описательно – такими,

какими мы их видим. Большие красные звезды – это *красные гиганты*. Маленькие белые звезды – это *белые карлики*. Когда звезда состоит из нейтронов, она называется *нейтронной*. Если звезда пульсирует, она называется *пульсаром*. В биологии, например, обычны длинные латинские названия. Доктор пишет рецепт какими-то закорючками, которые пациент не в состоянии разобрать, отправляет пациента к аптекарю, который понимает такую клинопись. Потом мы глотаем какое-то вещество с причудливой химической формулой. Самая известная биохимическая молекула называется двумя словами, в одном из которых одиннадцать слогов – дезоксирибонуклеиновая кислота! Однако начало всего пространства, времени, материи и энергии, что существуют в космосе, можно назвать всего двумя простыми словами: *Большой взрыв*. Наша наука немного сложная, ведь Вселенная довольно сурова. Нет никакого смысла плодить заковыристые названия – из-за них одна путаница.

Дальше рассказывать? Во Вселенной есть места с такой сильной гравитацией, что даже свет не в состоянии оттуда улететь. Падаете туда и обратно не возвращаетесь: это *черная дыра*. Опять же, два коротких слова – и все понятно. Извините, надо было выговориться.

Какова плотность нейтронной звезды? Возьмем наперсток такого вещества. Раньше швея работала только вручную и надевала наперсток, чтобы не исколоть пальцы иголкой. Чтобы получить такую же плотность, как в нейтронной звезде, наловим 100 миллионов слонов и запихнем в этот наперсток. Иными словами, если положить на одну чашу весов 100 миллионов слонов, а на другую – наперсток вещества из нейтронной звезды, то они уравновесятся. Вот такое плотное вещество. Тяготение нейтронной звезды также очень велико. Насколько? Давайте призвездимся и проверим.

Один из способов измерить силу гравитации – проверить, сколько энергии нужно, чтобы поднять что-либо. Чем сильнее гравитация, тем больше нужно энергии. Например, я трачу определенное количество энергии, чтобы подняться по лестнице, моих энергетических резервов на это вполне хватает. Но вообразите себе отвесную скалу высотой 20 тысяч километров на гипотетической гигантской планете, чья гравитация сравнима с земной. Представьте, сколько бы энергии вы потратили, чтобы вскарабкаться от подножия до вершины, преодолевая привычную земную силу тяжести. Нужно много энергии. Гораздо больше, чем имеется у вас в организме, когда вы стоите там, у подножия. Карабкаясь вверх, вам придется лопать энергетические батончики или другую высококалорийную пищу, которая быстро усваивается. Хорошо. Если вы полезете вверх с

огромной скоростью – сто метров в час, – то окажетесь на вершине через 22 года, это если лезть круглосуточно. Столько же энергии вам бы понадобилось, чтобы поднять лист бумаги с поверхности нейтронной звезды. Вероятно, никакой жизни на нейтронных звездах нет.

От одного протона на кубический сантиметр мы дошли до 100 миллионов слонов в наперстке. Что я еще забыл? Осталась температура. Обсудим, что такое «жарко». Начнем с поверхности Солнца. Там примерно 6000 кельвинов – 6000 К. При такой температуре любое вещество испарится. Поэтому Солнце состоит из газов. (Для сравнения: средняя температура на поверхности Земли – всего 287 К).

Что насчет температуры в центре Солнца? Вы, вероятно, догадываетесь, что в недрах Солнца жарче, чем на поверхности, – и на то есть веские причины, о чем будет рассказано далее в этой книге. Температура в центре Солнца – около 15 миллионов кельвинов. При такой жаре происходят удивительные вещи. Протоны носятся быстро. Как угорелые. Обычно два протона отталкиваются, поскольку обладают одинаковым (положительным) зарядом. Но на достаточно высоких скоростях такое отталкивание преодолевается. Они могут достаточно сильно сблизиться, и тогда между ними возникает совершенно новое взаимодействие – не отталкивающая электростатическая сила, а сила притяжения, правда, исключительно короткодействующая. Если сблизить два протона на такое минимальное расстояние, то они прилепятся друг к другу. Мы называем такую силу *сильным взаимодействием*. Да, это официальный термин. Сильное ядерное взаимодействие может сцеплять протоны друг с другом, порождая таким образом новые элементы, например гелий, идущий в периодической системе сразу за водородом. Работа звезд – варить более тяжелые элементы, нежели те, из которых они родились. Этот процесс творится глубоко в звездных недрах. Подробнее мы поговорим об этом в главе 7.

Теперь охладимся. Какова температура Вселенной? Да, у Вселенной есть остаточная температура, сохранившаяся со времен Большого взрыва. Тогда, 13,8 миллиарда лет назад, все пространство, время, материя и энергия, которые мы наблюдаем в пределах 13,8 миллиарда световых лет вокруг, были скомканы вместе в одной точке. Новорожденная Вселенная была жарким, кипучим котлом с материей и энергией. С тех пор в результате космического расширения Вселенная остыла примерно до 2,7 К.

Сегодня она продолжает расширяться и остывать. Конечно, я вас не обрадую, но факты свидетельствуют о том, что Вселенная катится к финалу. Она родилась при Большом взрыве и обречена на вечное

расширение. Температура так и будет падать, достигнет сначала двух кельвинов, потом кельвина, потом полкельвина и будет асимптотически стремиться к абсолютному нулю. В конце концов температура может остановиться на отметке около 7×10^{-31} K – в силу эффекта, открытого Стивеном Хокингом, – об этом Рич расскажет в главе 24. Но этот факт ничуть не успокаивает. Звезды сожгут все свое ядерное топливо, угаснут одна за другой и исчезнут с небес. Естественно, в газопылевых облаках рождаются новые звезды, но запасы газа при этом истощаются. В начале был газ, из него родились звезды, прошли свой жизненный цикл и превратились в огарки, конечные продукты звездной эволюции: в черные дыры, нейтронные звезды или белые карлики. Этот процесс продолжится, пока все огни в галактике не погаснут, один за другим. Во Вселенной стемнеет. Останутся лишь черные дыры, теплящиеся едва заметным светом – этот эффект, опять же, спрогнозировал Стивен Хокинг.

Так и закончится космос. Не взрыв, но всхлип.

Задолго до этого Солнце станет расти. Вас к тому времени уже не будет, можете мне поверить. Когда Солнце станет умирать, в его недрах развернутся сложные теплофизические процессы, и в результате внешние слои Солнца начнут расширяться. Оно будет становиться все больше, больше, больше, больше, займет полнеба. Расширится до орбиты Меркурия, а затем до орбиты Венеры. Через 5 миллиардов лет Земля станет оплавленной головешкой, вращающейся почти около самой поверхности Солнца. Океаны превратятся в крутой кипяток, пока, наконец, полностью не испарятся. Атмосфера разогреется настолько, что вся до единой молекулы улетучится в космос. Известная нам жизнь исчезнет, а затем, спустя 7,6 миллиарда лет, под действием других сил прокаленная Земля по спирали устремится на Солнце и там испарится.

Доброго дня!

В этой главе я попытался помочь вам ощутить масштабы и величие тем, затрагиваемых в книге. Все, что я только что обозначил, в следующих главах будет описано гораздо подробнее. Добро пожаловать во Вселенную.

Глава 2
От дневного и ночного неба к орбитам планет

Автор: Нил Деграсс Тайсон

В этой главе мы обсудим три тысячи лет из истории астрономии. Все, что происходило с древнейших времен (эпоха Вавилона) примерно до XVII века н. э. Это не будет уроком истории, поскольку я не собираюсь подробно описывать, кто что первым придумал и кто что открыл. Я хочу, чтобы вы составили впечатление о том, что мы успели узнать за этот период. Все началось с того, что люди пытались постичь ночное небо.

Вот Солнце (рис. 2.1). Нарисуем рядом с ним Землю; масштаб не соблюдается ни в размерах двух тел, ни в расстоянии, здесь я просто хочу проиллюстрировать некоторые свойства системы Солнце – Земля. Вдали, конечно, изображены звезды на небе. Предположу, что на небе есть только звезды – светящиеся точки, расположенные на внутренней поверхности большой сферы; в таком случае будет проще описать некоторые другие вещи.

Вероятно, вам известно, что Земля вращается вокруг своей оси и земная ось расположена под углом к околосолнечной орбите Земли. Угол наклона 23,5°. Сколько времени уходит на один оборот Земли? Один день. А на оборот вокруг Солнца? Один год. Тридцать процентов опрошенных в США ответили на второй вопрос неверно.

На самом деле, вращающийся объект в космосе достаточно стабилен, так что при орбитальном вращении его ориентация в пространстве не изменяется. Если переместить Землю вокруг Солнца из точки, соответствующей 21 июня, в точку, соответствующую 21 декабря, когда она окажется по другую сторону от Солнца (эта ситуация показана на рис. 2.1 справа), то ориентация земной оси не изменится. На протяжении всего пути вокруг Солнца земная ось направлена в одну и ту же точку.

Поэтому существуют некоторые интересные особенности. Например, 21 июня вертикальная линия, перпендикулярная плоскости земной орбиты, делит на рисунке Землю на дневную и ночную часть. Что можно сказать о той части Земли, что расположена слева от этой линии, в тени? Там ночь. Но 21 декабря Земля будет в противоположной точке орбиты, и ночь также переместится в диаметрально противоположную правую часть рисунка.

Рис. 2.1. Земля вращается вокруг Солнца, поэтому ночное небо выглядит по-разному в зависимости от времени года. Поскольку земная ось наклонена, 21 июня лучи Солнца освещают Северное полушарие напрямую, а по всему Южному полушарию словно скользят. 21 декабря люди, живущие за Южным полярным кругом, видят солнце круглые сутки. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Все люди, которые ночью смотрят на звезды, могут видеть лишь часть неба, противоположную Солнцу. Ночное небо 21 июня (звезды, показанные в левой части рисунка) отличается от ночного неба 21 декабря (это звезды, показанные в правой части рисунка). Летней ночью видны «летние» созвездия, например Лебедь и Лира, а зимней ночью – «зимние» созвездия, например Орион и Телец.

Рассмотрим другой аспект. Допустим, 21 декабря справа от вертикальной линии у нас ночь, Земля вращается вокруг своей оси, – и что в таком случае будут видеть люди, находящиеся в Антарктике, за Южным полярным кругом, и глядящие в ночное небо? Они нарисованы у Южного полюса. Будут ли они в таком случае видеть темноту? Нет. Двадцать первого декабря в Антарктиде круглые сутки не заходит солнце, хотя Земля там вращается точно так же как и везде. В этот день никто из людей, находящихся за Южным полярным кругом, не увидит ночи. Это касается

всех, кто находится между Южным полярным кругом и Южным полюсом. Следуя этой логике, если отправиться на Северный полюс и посмотреть в небо вместе с теми, кто живет за Северным полярным кругом – а там живут Санта-Клаус и его друзья, – то они в этот день так и не попадут на дневную половину. Для них 21 декабря будет круглосуточная ночь. Вы уже догадываетесь, что 21 июня там происходит обратное: для жителей Южного полюса наступает круглосуточная ночь, а в Арктике в этот день не заходит солнце.

Давайте посмотрим, что в эти дни происходит в Принстоне, штат Нью-Джерси. Этот город расположен недалеко от Нью-Йорка, но там нет небоскребов и ярких огней, которые могли бы помешать обзору. Город расположен примерно на 40° с.ш. На заре 21 июня Нью-Джерси со всем Северным полушарием переходит на дневную сторону. На эту территорию начинает отвесно литься солнечный свет, тогда как в Южном полушарии солнечный свет словно стелется по поверхности Земли.

Полдень – это момент, когда Солнце достигает в небе высшей точки. А вы знали, что нигде в континентальной части США Солнце никогда не бывает прямо над головой (в зените), независимо от месяца и времени суток? Звучит странно, потому что если остановить человека на улице и спросить: «Где находится Солнце в двенадцать часов дня?», большинство ответит: «Прямо над головой». В этом случае, как и во многих других, люди просто повторяют заученные, казалось бы, верные вещи – и тем самым выдают, что сами никогда на Солнце в полдень не смотрели. Даже не замечали. Не пытались экспериментально проверить. В мире полно таких вещей. Например, что происходит со световым днем зимой? «Зимой день укорачивается, летом удлиняется». Подумаем над этим. Какой самый короткий день в году? Это 21 декабря, день зимнего солнцестояния, а также первый день зимы в Северном полушарии. Если в первый день зимы наступает кратчайший световой день в году, то что происходит во все следующие зимние дни? Световой день должен удлиняться. В самом деле, зимой дни удлиняются, а не укорачиваются. Чтобы это понять, не нужна научная степень или академический грант. Световой день удлиняется зимой и укорачивается летом.

Какая звезда на ночном небе самая яркая? Многие скажут – Полярная. А сами-то смотрели? Большинство – нет. Полярная звезда не входит в топ-10. И в топ-20. И в топ-30. И даже в топ-40. Австралия, например, расположена слишком далеко на юге, поэтому оттуда Полярная звезда просто не видна. Над Южным полюсом нет такой же яркой звезды. А если поговорить о полушариях небесной сферы – и не думайте завидовать тому,

«какие яркие созвездия в Южном полушарии». Взять хотя бы Южный Крест; многие о нем слышали. О нем пишут песни. Но знали ли вы, что Южный Крест – самое маленькое из всех 88 созвездий? Если вытянуть перед собой руку, сжатую в кулак, то он закроет это созвездие. Кстати, четыре ярчайшие звезды Южного Креста образуют скособоченный четырехугольник. В середине нет никакой звезды, которая отмечала бы центр четырехугольника. Поэтому правильнее было бы назвать это созвездие «Южный *Ромб*». Для сравнения: астеризм Северный Крест (шесть хорошо заметных звезд созвездия Лебедя) занимает в небе почти вдесятеро большую площадь, чем Южный, и выглядит он действительно как крест со звездой в середине. У нас на Севере есть несколько великолепных созвездий.

Полярная звезда занимает 45-е место по яркости в Северном полушарии. Поэтому сделайте мне одолжение – остановите на улице человека, задайте ему этот вопрос, а затем поправьте его. Если хотите знать, ярчайшая звезда на ночном небе – Сириус, что в созвездии Большого Пса.

Теперь сравним, что происходит с солнечным светом в двух точках на Земле. Посмотрите под ноги в Принстоне в полдень 21 июня. Солнечные лучи падают под очень высоким углом (см. рис. 2.1). Два параллельных луча, прилетающих от Солнца в Принстон, попадут в землю на минимальном расстоянии друг от друга. Земля в Сиднее в полдень также примет два подобных солнечных луча, но они придут под гораздо более меньшим углом и, соответственно, упадут намного дальше друг от друга. Что в данном случае происходит? Какое место нагревается эффективнее? Принстон, естественно. Энергия, вливающаяся в принстонскую почву, более концентрированная, поскольку несущие ее лучи достигают поверхности Земли, и в Принстоне становится жарче. В Принстоне 21 июня – лето. В тот же день в австралийском городе Сидней – зима. Спустя шесть месяцев, 21 декабря, сложится обратная ситуация.

Солнце греет землю, земля греет воздух. Солнце как таковое почти не нагревает воздух, почти вся поступающая от Солнца энергия свободно через него проходит. Пик солнечной энергии приходится на видимую часть спектра, как известно, Солнце легко увидеть сквозь атмосферу. Отсюда следует очевидный факт: видимый солнечный свет не поглощается атмосферой – иначе мы бы просто не заметили Солнце. Если вы сидите в комнате без окон, то Солнце видеть не можете, поскольку крыша здания поглощает весь видимый солнечный свет. Чтобы увидеть Солнце, потребуется либо посмотреть в прозрачное окно, либо выйти на улицу.

Следовательно, солнечный свет проникает через прозрачный воздух и попадает на землю. Земля поглощает солнечный свет, а затем возвращает эту энергию в форме невидимого инфракрасного излучения, которое атмосфера уже способна поглощать – и поглощает. Мы подробнее обсудим невидимые части спектра в главе 4.

Земля поглощает видимый свет, идущий от Солнца, разогревается, а затем обогревает воздух тем инфракрасным излучением, которое отдает. Это происходит не мгновенно, а требует времени. Сколько времени? Какие часы дня самые жаркие? Земля нагревается сильнее всего не в полдень. В силу описанного эффекта самая жара всегда наступает на несколько часов позже – в два, в три часа дня, а кое-где даже в четыре.

Итак, в Северном полушарии – лето. Летом земная ось со стороны Северного полушария направлена к Солнцу, и, естественно, в Южном полушарии в эту пору зима. По той же причине, по которой самая жара устанавливается позже полудня, наиболее знойный сезон в Северном полушарии наступает после 21 июня. Поэтому лето *начинается* 21 июня, после чего погода становится все жарче и жарче. Аналогично, 21 декабря в Северном полушарии *начинается* зима, и после этого холодает.

Спустя три месяца, 21 марта, начинается весна. В первый день весны (21 марта) каждая точка Земли за счет вращения оказывается и на солнечной, и на темной стороне планеты, то же самое происходит и в первый день северной осени (21 сентября). В каждый из этих дней ночь и день занимают ровно по половине суток, поэтому дни называются весенним и осенним *равноденствием*.

Северный полюс Земли указывает на Полярную звезду. Что это – космическое совпадение? На самом деле нет, поскольку Полярная звезда расположена не совсем точно над полюсом. Между Полярной звездой и той точкой, в которую направлена земная ось (Северным полюсом мира), можно уложить 1,3 полные Луны.

Вернемся в Принстон, то есть к рис. 2.2. Оказавшись там ночью, вы увидите над собой звездное небо. На рисунке оно обозначено как «звезды, видимые над горизонтом Принстона». Там же нарисован принстонский горизонт – это линия, касательная поверхности Земли. Взглянув на небо, вы увидите, что звезды словно вращаются вокруг Полярной звезды по мере вращения Земли (рис. 2.2). (Полярная звезда расположена так близко к Северному полюсу мира, что сама она почти не движется.) Итак, на небе есть «вершина», звезды с которой оборачиваются вокруг Полярной звезды, но сами за горизонт никогда не заходят. Эти звезды называются *незаходящими*.

Рис. 2.2. Схема ночного неба в Принстоне (40° с. ш). Полярная звезда неподвижна, располагается на высоте 40° над северной стороной горизонта. Большой Ковш вращается вокруг нее против часовой стрелки. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Теперь рассмотрим какую-нибудь звезду, которая сильнее удалена от Полярной. Такая звезда заходит за горизонт, а затем снова восходит. Вот как выглядит с Земли знакомое нам звездное небо. Один из самых известных *астеризмов* (элементов созвездий) – Большой Ковш. Его образуют яркие звезды созвездия Большой Медведицы. Вращаясь вокруг Полярной (см. рис. 2.2), он то опускается, слегка касаясь горизонта (если смотреть из Принстона), то вновь поднимается. Все звезды, расположенные от Полярной дальше, чем Большой Ковш, заходят за горизонт. Какова будет угловая высота Полярной звезды, если смотреть из Принстона? Это можно определить. Для начала допустим, что мы отправились на Северный полюс – навестить Санта-Клауса. Где будет Полярная звезда? Когда окажетесь в гостях у Санта-Клауса, Полярная звезда будет светить (почти) прямо у вас

над головой. На севере так всегда. Звезда, расположенная между Северным полюсом мира и горизонтом, вращается вокруг Полярной по мере вращения Земли и всегда остается над горизонтом. Звезда, расположенная прямо на горизонте, вращается по линии горизонта, так что все звезды, которые вы видите, всегда остаются над горизонтом. Ни одна звезда не восходит, ни одна не заходит; все они вращаются вокруг Полярной звезды, которая расположена прямо у вас над головой, и вы видите все Северное полушарие небесной сферы. Так это выглядит на крайнем севере, у Санта-Клауса.

Какова широта Северного полюса? Девяносто градусов. Какова высота Полярной звезды над горизонтом, если смотреть с Северного полюса? Опять же 90°. Это не совпадение, а закономерность. Вы находитесь на девяностой широте, а высота Полярной звезды над горизонтом – 90°. Теперь отправимся на экватор. Какова широта экватора? Ноль градусов. Здесь Полярная звезда находится прямо на горизонте, ее высота – 0°. На какой широте я нахожусь в Принстоне? Сорок градусов северной широты. Поэтому в Принстоне Полярная звезда находится на высоте 40° над горизонтом.

Те, кто умеет ориентироваться по звездам, знают, что высота Полярной звезды над горизонтом соответствует широте, на которой вы находитесь. Христофор Колумб отправился в плавание по строго определенной широте, которой придерживался на всем пути через Атлантический океан. Давайте обратимся к его картам. Вот как шли его корабли: они оставались на одной и той же широте, высота Полярной звезды над горизонтом не изменялась во время его путешествия.

Вспомните, когда в детстве вы играли с юлой, вы видели, как ее ось покачивается, описывая конус? Земная ось тоже покачивается. Она испытывает гравитационное воздействие со стороны Солнца и Луны. Период такого покачивания длится 26 тысяч лет. Земля совершает полный оборот вокруг своей оси за сутки и одно качание оси за 26 тысяч лет. У этого факта есть интересное следствие. Во-первых, обратимся к звездной сфере, которую я нарисовал вокруг Солнечной системы. По мере движения Земли вокруг Солнца место самого Солнца на фоне звезд тоже меняется. Двадцать первого июня (см. рис. 2.1) Солнце находится между нами и звездами, показанными по правому краю, – таким образом, 21 июня мы видим, как оно проходит на фоне этих звезд. Но 21 декабря Солнце расположено между нами и звездами, показанными по левому краю. В промежутке между этими датами Солнце занимает то или иное место на фоне других совокупностей звезд, постепенно двигаясь по небу. Давным-

давно, когда большинство людей были неграмотны, не было никакого вечернего телеэфира, книг или интернета, люди воплощали свою культуру на небесах. Изображали там то, что их волновало. Человеческое воображение превосходно улавливает закономерности там, где их на самом деле нет. Возьмите любой произвольный набор точек, и мозг подскажет вам – «я вижу узор». Если умеете программировать, попробуйте провести такой эксперимент: возьмите множество точек и начните произвольно ставить их на странице. Когда точек наберется около тысячи, вам уже может почудиться: «Э… а я тут вижу Авраама Линкольна!» Вы что-то видите. Аналогичным образом древние люди экстраполировали свои идеи на звездное небо, поскольку понятия не имели, почему оно именно такое. Они не знали, как движутся планеты, не понимали законов физики. Они полагали: «Хм… небо большое, я маленький, значит, небо непременно должно на меня влиять». Далее они могли рассуждать так: «Вон там сверху группа звезд, напоминающая по форме рака, и это созвездие особенное: Солнце было как раз в этом созвездии, когда ты родился. Наверное, поэтому ты такой чудной. А вот там – две рыбы, а там – близнецы. Жаль, что у нас нет телика, тогда давайте сами придумывать истории и передавать их из уст в уста». Так древние люди придумали зодиакальный круг – созвездия, через которые Солнце словно проходит в течение года.

Было двенадцать зодиакальных созвездий, и все их прекрасно знают – это Весы, Скорпион, Овен и так далее. Они известны, поскольку практически ежедневно упоминаются в новостях. Человек, которого вы, возможно, никогда и не встречали, зарабатывает деньги, предсказывая вам будущее. Давайте попытаемся с этим разобраться. Во-первых, в течение года Солнце проходит не через двенадцать, а через тринадцать созвездий. Астролог вам этого не рассказывает, потому что в таком случае ничего он не заработает. Знаете тринадцатое зодиакальное созвездие? Это Змееносец. На самом деле большинство Скорпионов – Змееносцы, но в гороскопах об этом умалчивают.

Давайте остановимся на этом поподробнее. Когда составляли зодиак? Около 2000 лет назад Клавдий Птолемей опубликовал карты с зодиаком. 2000 – это 1/13 от 26 000. Почти 1/12. Теперь понимаете, что из-за покачивания земной оси (научное название этого явления – *прецессия*) месяц, в котором Солнце оказывается в определенном зодиакальном созвездии, за это время сместился? Все созвездия, которые в газетах соответствуют хорошо известным датам, на самом деле уже сдвинулись по зодиаку на целый месяц. Поэтому Скорпионы и Змееносцы уже стали Весами.

Вот почему так ценится образование. Вы приобретаете объективные знания об устройстве Вселенной. Если вы недостаточно сведущи в предмете, чтобы разобраться, а понимает ли ваш собеседник, о чем говорит, – это может влететь вам в копеечку. Социальные антропологи говорят, что лотерея – это налог на бедных. На самом деле не совсем так. Это налог на всех, кто плохо учил математику, так как, если разбираешься в математике, то сразу понимаешь, что вероятности не в твою пользу и не стоит тратить свои кровные на лотерейные билеты.

Эта книга прежде всего об образовании. И немного о космическом просвещении.

Далее давайте поговорим о Луне, затем сразу об Иоганне Кеплере, а после этого – о моем кумире Исааке Ньютоне, в чьем доме мне довелось побывать во время съемок фильма «Космос: одиссея в пространстве и времени».

Начнем с того, что Земля обращается вокруг Солнца, а Луна, естественно, обращается вокруг Земли. Это показано на рис. 2.3. Солнце расположено далеко справа, за пределами рисунка, а Земля показана в центре рисунка. Здесь Луна вращается вокруг Земли, на рисунке мы видим различные фазы Луны. Мы смотрим на северный полюс лунной орбиты, при этом солнечный свет падает справа.

Солнце всегда освещает как Землю, так и Луну. Если вы стоите на Земле и смотрите на Луну, расположенную против Солнца, то что вы видите? Какую фазу? Полнолуние. На крупных картинках с рис. 2.3 показано, как Луна выглядит с Земли в каждой точке лунной орбиты.

Почему не бывает ежемесячных лунных затмений, когда Земля оказывается между Солнцем и Луной? Дело в том, что лунная орбита примерно на 5° наклонена к околосолнечной орбите Земли. Поэтому, как правило, Луна проходит в пространстве севернее или южнее земной тени, и мы видим привычное *полнолуние*. Время от времени полная Луна пересекает плоскость земной орбиты; при этом она попадает в тень Земли, и наступает лунное затмение.

Итак, посмотрим, что далее происходит с Луной, когда она под углом 90° движется по своей орбите против часовой стрелки. Луна входит в *последнюю четверть*. В таком случае освещена половина Луны. Переместим Луну еще на 90° по орбите (против часовой стрелки) – и она пройдет между Землей и Солнцем. Освещена сторона Луны, невидимая с Земли. Поэтому, стоя на Земле, вы вообще не видите Луну. Это *новолуние*. Обычно в этой фазе Луна проходит севернее или южнее Солнца.

Рис. 2.3. Фазы Луны при вращении ее вокруг Земли. Солнце (расположено справа, за пределами рисунка) всегда освещает половину Земли и половину Луны. На схеме (против часовой стрелки) показано, как Луна движется по орбите вокруг Земли. Мы смотрим на орбиту с севера. Луна всегда обращена к Земле одной и той же стороной. Обратите внимание: при новолунии Солнце освещает обратную сторону Луны, которая с Земли не видна. На больших снимках показано, как каждая из фаз Луны выглядит с Земли. Предоставлено Робертом Дж. Вандербеем

Иногда, когда она проходит прямо перед Солнцем, наступает солнечное затмение.

Итак, мы рассмотрели полнолуние, последнюю четверть и новолуние. Сдвинемся еще на 90° – и увидим *первую четверть*, где Луна вновь наполовину освещена. Еще есть промежуточные фазы Луны. Что мы видим между новолунием и первой четвертью? Тонюсенький серпик. Он называется *растущий серп*, поскольку каждый день становится шире. А

прямо перед новолунием мы видим *убывающий серп*[3]. Серпы направлены в противоположные стороны; в этих фазах Луна сначала убывает, а затем вновь начинает расти.

Между первой четвертью и полнолунием наступает фаза, иногда именуемая «*растущая выпуклая Луна*»[4]. Термин достаточно неуклюжий, да и саму эту фазу почти никогда не рисуют, хотя половину времени мы видим Луну именно в выпуклой фазе – не полнолуние, но и не четверть. Если бы художник живописал небо в произвольно выбранные дни на протяжении года, то на половине работ была бы выпуклая Луна, но художники предпочитают изображать полумесяц либо полнолуние. Они упускают часть реальности, которая их окружает.

Естественно, каждый такой цикл длится один месяц – кстати, и лунный серп тоже называется «месяц». Когда полная Луна находится напротив Солнца, в какой час она восходит? Если она напротив Солнца, то логично заключить, что Луна восходит на закате. А на восходе полная Луна садится.

В другие дни месяца все иначе. Если Луна в последней четверти, то на восходе Солнца она высоко в небе. Обратите внимание на схему, где Земля вращается против часовой стрелки; в таком случае утро наступит, когда Луна (последняя четверть) высоко в небе. Рассмотрите рисунок внимательно, включите воображение, представьте, что вы внутри картины. Затем возвращайтесь в реальный мир и сравните результат.

У меня на компьютере есть такое приложение: всякий раз, когда я открываю «Рабочий стол», программа отображает текущую фазу Луны, день за днем. Это мои лунные часы. Они связывают меня со Вселенной, даже когда я сижу, уставившись в монитор.

Давайте поговорим о Солнечной системе, какой ее видели в середине и конце XVI века. Тогда в Дании жил богатый астроном Тихо Браге. На Луне есть кратер Тихо, названный в его честь.

Как-то раз я битый час промаялся с одним датчанином, который учил меня правильно произносить: [Ти’ко Браэ]. Я старался. Но, разумеется, по-английски его имя звучит привычнее.

Тихо Браге всерьез интересовался планетами, по крайней мере внимательно за ними наблюдал. Он соорудил самые совершенные для своего времени астрономические инструменты и точнее, чем кто бы то ни было ранее, измерил положения планет. Телескоп изобрели только в 1608 году, поэтому Тихо пользовался визирными инструментами, записывая положения звезд и планет на небе как функцию времени. Тихо собрал

колоссальный массив данных; вдобавок у него был блестящий ассистент – немецкий математик Иоганн Кеплер.

Кеплер взял данные Тихо и проник в их суть. Он сказал себе: «Я понял, как ведут себя планеты. На самом деле, можно сформулировать законы, в точности описывающие их движения». До Кеплера устройство Вселенной казалось самоочевидным. «Глядите-ка, звезды вращаются вокруг нас. Солнце восходит и заходит. Луна восходит и заходит. Должно быть, мы – центр Вселенной». В это не только было удобно верить, все *так и выглядело*. Человеку такая картина льстила, она подтверждалась фактами, и никто в ней не сомневался – пока не явился польский астроном Николай Коперник. Если Земля – в центре Вселенной, то что делают планеты? Смотрим на небо в разные дни и видим, что Марс движется на фоне звезд. Хм. А вот прямо сейчас он замедляется. Ох, остановился. Нет, дал задний ход (это называется «*попятное* движение»), а потом снова пошел вперед. Интересно почему?

Коперник задумался: а если в центре находится Солнце, а Земля вращается вокруг Солнца, что тогда? Тогда мы запросто объясняем и ход, и противоход Марса. Солнце – в центре, Земля вращается вокруг Солнца по орбите, носится как гоночный автомобиль по трассе. Марс, следующая от Солнца планета, вращается медленнее, словно это болид, который идет по крайнему треку. Когда Земля обходит Марс на повороте, кажется, что в течение некоторого времени Марс движется назад. Если вы едете по скоростной полосе на автобане и обгоняете автомобиль, идущий по соседней полосе медленнее вашего, то может показаться, что в какой-то момент эта машина движется задом в противоположную от вас сторону. Если поставить Солнце в центре и предположить, что Земля и Марс вращаются вокруг него по бесхитростным круговым орбитам, то мы сразу объясним попятное движение; поймем, что происходит на ночном небе. Чем дальше планета от Солнца, тем медленнее она вращается. Все эти соображения Коперник изложил в фолианте «О вращениях небесных сфер». Если вы попытаетесь купить первое издание этой книги на аукционе, то потребуется раскошелиться на два с лишним миллиона долларов – еще бы, ведь это одна из важнейших книг в истории человечества.

Она вышла в 1543 году и заставила людей задуматься. Поначалу Коперник опасался публиковать книгу и без огласки демонстрировал ее коллегам. Нельзя просто так взять и объявить, что Земля – больше не центр Вселенной. У могучей католической церкви было иное мнение на этот счет, духовенство продолжало утверждать, что Земля – центр.

Так говорил Аристотель. Древнегреческий философ Аристарх пришел к верному выводу, что Земля вращается вокруг Солнца, но аристотелевская точка зрения возобладала, и церковь упорно поддерживала ее, так как мнение Аристотеля согласовывалось с Писанием. Когда же Коперник опубликовал свою книгу? Он успел подержать ее в руках, лежа на смертном одре. Мертвых не репрессируют. Он возродил представление о Вселенной, выстроенной вокруг Солнца, так называемую *гелиоцентрическую модель*.

«*Гелио*» означает «Солнце». Ранее в науке были приняты *геоцентрические* модели. Их сформулировали Аристотель, Птолемей, а далее закрепили церковные эдикты.

Затем настал черед Кеплера. Кеплер поддерживал мнение Коперника, но с оговорками. Коперниковские орбиты имели форму идеальных окружностей. Но поскольку такая модель не соответствовала наблюдаемому движению планет, Коперник откорректировал ее, добавив небольшие круги-эпициклы (как и Птолемей в свое время). Все-таки модель не вполне точно описывала положения планет на небе. Кеплер понял, что модель Коперника нужно доработать. У него была информация – таблицы движения планет, составленные Тихо Браге, – и по этим таблицам он вывел три закона движения планет. Сегодня они именуются *законами Кеплера*.

Первый закон гласит: «*Планеты движутся вокруг Солнца по эллиптическим, а не по круговым орбитам*» (рис. 2.4). Что такое эллипс? С математической точки зрения у круга всего один центр, а у эллипса, можно сказать, два – они называются *фокусами*. Все точки окружности равноудалены от центра, а у всех точек на линии эллипса – одинаковая сумма расстояний до двух фокусов. Фактически круг – частный случай эллипса, где оба фокуса находятся в одной и той же точке. В продолговатом эллипсе фокусы значительно удалены друг от друга. Чем сильнее мы сблизим фокусы, тем ближе к идеальной окружности будет полученная фигура.

По Кеплеру, планетная орбита представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Это утверждение уже было революционным. Древние греки считали, что поскольку Вселенная божественна, она должна быть совершенной, причем в греческой философии была конкретная концепция «совершенства». Круг – совершенная фигура; все точки окружности находятся на одинаковом расстоянии от центра; это и есть совершенство. Звезды движутся кругами, полагали древние греки. Эта философия сохранялась в течение тысячелетий.

ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

I

Орбита каждой планеты – это эллипс

Солнце находится в одном из фокусов

II

Отрезок прямой, соединяющий Солнце и планету, отсекает равные площади за равные промежутки времени

III

$$\frac{P_2^2}{P_1^2} = \frac{a_2^3}{a_1^3}$$

$$P^2 \sim a^3$$

Рис. 2.4. Законы Кеплера. Величина a называется большой полуосью, она равна половине диаметра эллиптической орбиты. В случае круговой орбиты с нулевым эксцентриситетом большая полуось будет равна радиусу. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

А затем появляется Кеплер и говорит: «Люди, орбиты – это не окружности. Я взял таблицы Тихо и пришел к выводу, что орбиты – это эллипсы».

Далее он показал, что при вращении планеты скорость ее изменяется в зависимости от того, насколько она приближается к Солнцу. Представьте себе идеально круглую орбиту. Нет никаких причин на то, чтобы скорость движения планеты в разных точках окружности отличалась; планета всегда должна вращаться с одной и той же скоростью. Но с эллипсом все иначе. Когда скорость планеты будет максимальной? Тогда, когда планета будет ближе всего к Солнцу. Кеплер обнаружил, что планета движется наиболее быстро, будучи ближе всего к Солнцу, а чем дальше – тем медленнее она летит.

Кеплер обдумал эту задачу с геометрической точки зрения и решил: «Давайте измерим, как далеко планета успевает уйти, скажем, за месяц». Если планета расположена близко от Солнца и вращается быстро, то она будет заметать определенную площадь орбиты, так что получается вот такой неаккуратный широкий веер (см. рис. 2.4). Обозначим эту область A1. Проделаем такой же эксперимент в другой части орбиты, когда планета будет дальше от Солнца. Кеплер заметил, что чем дальше от Солнца планета, тем медленнее она движется и, соответственно, за то же время покрывает меньшее расстояние. Поскольку преодолеваемое расстояние меньше, планета пройдет за месяц область A2, напоминающую по форме длинный лепесток. Кеплеру хватило смекалки уловить, что область, заметаемая за месяц, всегда одинакова, независимо от того, каково расстояние от планеты до Солнца: A1 = A2. Так он сформулировал второй закон: «*Отрезок прямой, соединяющий Солнце и планету, заметает равные площади за равные промежутки времени*».

Из этого следует фундаментальный вывод, обусловленный сохранением *углового момента*. Если ранее вы этого термина не слышали, то, надеюсь, догадаетесь о его значении.

Угловым моментом пользуются фигуристы. Обратите внимание: когда фигурист начинает вращение, его руки вытянуты. А что потом? Спортсмен прижимает руки к телу, сокращая расстояние между руками и осью

вращения, и, соответственно, ускоряется. Когда планета, движущаяся по эллиптической орбите, приближается к Солнцу, расстояние между ней и Солнцем уменьшается – соответственно, сама планета ускоряется.

Это явление именуется сохранением углового момента. Во времена Кеплера такого термина еще не существовало, но фактически он открыл именно угловой момент.

Третий закон Кеплера – гениален, просто гениален (вновь см. рис. 2.4). Он додумался до него не скоро. Первые два закона он дал практически экспромтом, считай за один вечер. На формулировку третьего ушло десять лет. Он пытался вывести взаимосвязь между расстоянием планеты от Солнца и тем, за какое время она проходит весь путь по околосолнечной орбите, ее период обращения. Внешним планетам требуется больше времени, чтобы сделать оборот вокруг Солнца, чем внутренним.

Сколько планет было тогда известно? Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер и самая популярная планета – Сатурн.

Многие третьекурсники говорили, что их любимая планета – Плутон. Поэтому они меня и недолюбливают. Как-то раз в «Роуз-центре Земли и Космоса» в Нью-Йорке мы собрались с коллегами и разжаловали Плутон из планеты в один из плутоидов – ледяных шаров, вращающихся на задворках Солнечной системы.

Греческое слово «*планетос*» означает «скиталец». Древние греки не считали Землю планетой, поскольку располагали ее в центре Вселенной. Причем древние греки выделяли еще две планеты, которые я не назвал, – какие? Это тела, также движущиеся на фоне звезд: Солнце и Луна. Таким образом, древние греки насчитывали семь планет. А названия семи дней недели в английском языке связаны с планетами или богами, которые с этими планетами ассоциировались. Так, Sunday (воскресенье) – день Солнца, Monday (понедельник) – день Луны. Суббота (Saturday) посвящалась Сатурну. Чтобы понять остальные названия, нужно обратиться к другим языкам. Так, пятница (Friday) названа в честь Фригг (Фрейи), норвежской богини любви, которая ассоциировалась с Венерой.

Наконец, Кеплер сформулировал одно уравнение. Первое космическое уравнение.

Он стал измерять все расстояния в отрезках, равных расстоянию от Земли до Солнца.

Мы называем такой отрезок «астрономическая единица» (а. е.). Расстояние от планеты до Солнца меняется в зависимости от положения ее на орбите. Эллипс похож на вытянутый круг, у него есть длинная и короткая оси, которые называются соответственно *большой* и *малой*.

Кеплер (блестяще) заключил, что мерой расстояния от планеты до Солнца следует взять половину большой оси ее орбиты. Мы называем его «большая полуось». Это арифметическое среднее максимального и минимального расстояния планеты от Солнца.

А при измерении времени в земных годах получается уравнение, в котором забрезжили первые признаки грядущего постижения космоса. Если обозначить буквой *P* период, равный одному планетному году (выраженный в земных годах), и обозначить буквой *a* среднюю величину максимального и минимального расстояния планеты от Солнца (в астрономических единицах), то получится:

$$P^2 = a^3,$$

третий закон Кеплера. Рассмотрим случай с Землей. Период вращения Земли равен 1. Среднее расстояние между афелием и перигелием равно 1. $1^2 = 1^3$. Работает. Хорошо.

Если этот закон действует в пределах всей Солнечной системы, то он должен соблюдаться для любой планеты (или другого объекта, вращающегося по околосолнечной орбите), независимо от того, был ли этот объект известен при Кеплере или открыт позднее. Как насчет Плутона? Кеплер о Плутоне не знал. Проверим Плутон. Среднее расстояние между ним и Солнцем равно 39,264 а.е. Итак, по закону Кеплера, $P^2 = 39{,}264^3$. Получается 60 381,8. Можете проверить на калькуляторе. Период орбитального вращения P должен быть равен квадратному корню из 60 381,8, что составляет 246. Сколько времени длится год на Плутоне? 246 земных лет.

Кеплер был нереально крут.

Когда Исаак Ньютон формулировал закон всемирного тяготения, он опирался на $P^2 = a^3$, чтобы описать, как гравитационное притяжение ослабевает с увеличением расстояния. Оно убывало обратно пропорционально квадрату расстояния. Чтобы получить такой ответ, Ньютон воспользовался дифференциальным исчислением, которое, кстати, незадолго до того сам и изобрел. Ньютон обобщил закон Кеплера и сформулировал другой закон, применявшийся уже не к Солнцу и планетам, а к любым двум телам во Вселенной. В основе этого закона лежала сила взаимного гравитационного притяжения двух этих тел, описываемая по формуле

$$F = Gm_a m_b / r^2,$$

где G – константа, m_a и m_b – массы двух тел, r – расстояние между центрами этих тел.

Из этого уравнения можно вывести третий закон Кеплера $P^2 = a^3$ как частный случай. Также можно вывести первый и второй законы Кеплера; доказать, что орбита планеты – это эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце, а также что планета заметает равные площади орбиты за равное время. Вот какова сила ньютоновского закона тяготения, и он этим даже не исчерпывается. Он полностью описывает гравитационное притяжение между двумя телами во Вселенной, независимо от того, по каким орбитам они обращаются. Ньютон расширил наши представления о космосе и дал такое описание планет, о котором Кеплер и помыслить не мог. Ньютон вывел эту формулу в неполные 26 лет. Он открыл законы оптики, выделил цвета спектра и выяснил, что, если объединить цвета радуги, вместе они дают белый. Он изобрел телескоп-рефлектор. Изобрел дифференциальное исчисление. Все это сделал Ньютон.

Следующая глава – о нем.

Глава 3
Законы Ньютона

Автор: Майкл Стросс

Коперник совершил революционное открытие, объяснив движения планет в контексте *гелиоцентрической* Вселенной и поместив Солнце в центре *Солнечной системы*. Различные планеты, и Земля в том числе, движутся по околосолнечным орбитам. Мы сидим на движущейся платформе. Чтобы определить, как быстро движется Земля, мы должны определить, какое расстояние она проходит за конкретный интервал времени. В таком случае скорость будет равна расстоянию, деленному на время.

Как было рассказано в главе 2, Кеплер показал, что орбита Земли имеет форму эллипса. На самом деле орбиты большинства планет в нашей Солнечной системе близки к круговым, так что пока приблизительно условимся, что Земля движется по кругу и один такой круг проходит за год. Радиус этого круга, то есть расстояние от Солнца до Земли, постоянно используется в астрономии. Как было сказано в предыдущей главе, оно официально называется «астрономическая единица», сокращенно а.е. Одна а.е. равна примерно 150 миллионам километров, или $1{,}5 \times 10^8$ км.

Итак, за год Земля описывает окружность с радиусом 150 миллионов километров. Длина окружности равна 2π радиуса. Все знают, что число π примерно равно 3. Примерно такими грубыми приближениями оперируют астрономы. Длину окружности нужно разделить на время, то есть на 1 год.

Пересчитаем год в секундах, впоследствии нам это пригодится. Количество секунд в году равно: 60 секунд в минуте умножить на 60 минут в часе, умножить на 24 часа в сутках, умножить на 365 дней в году. Можно посчитать на калькуляторе, но, как вы помните из главы 1, Нил отметил свою миллиардную секунду бутылкой шампанского, а было ему тогда около 31 года. Соответственно в году примерно 1/30 миллиарда, то есть около 30 миллионов секунд. Возьмем приблизительно $3{,}0 \times 10^7$ секунд в году.

Резюмируя, можно сказать, что Земля вращается вокруг Солнца со скоростью $2\pi r/(1\text{ год}) = 2 \times 3 \times (1{,}5 \times 10^8\text{ км})/(3 \times 10^7\text{ с}) = 30$ км/с. Вот с такой скоростью мы движемся вокруг Солнца прямо сейчас. Просто

несемся! Но нам кажется, что мы спокойно сидим на месте, – возможно, именно поэтому древним казалось естественным ставить себя в центр Вселенной. Это представлялось столь очевидным. Но на самом деле можно заметить активное движение. За сутки Земля совершает полный оборот вокруг своей оси. За год она обходит полный путь вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Во второй части книги мы расскажем, что Солнце также движется (увлекая за собой Землю и другие планеты).

Коперник говорил, что планеты вращаются вокруг Солнца. Кеплер воспользовался расчетами Тихо Браге, определив с их помощью орбиты разных планет и изучив их свойства. Как упоминалось в главе 2, он вывел из этого три закона. Исаак Ньютон, один из героев нашей истории, смог вывести из третьего закона Кеплера такое следствие: притяжение – это радиальная сила между двумя объектами, обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними.

Пожалуй, Ньютон был величайшим физиком, возможно, самым великим из когда-либо живших ученых. Он совершил множество фундаментальных открытий. Ньютон хотел понять, как движется все на свете: не только планеты вокруг Солнца, но и мяч, подброшенный в воздух, или камень, катящийся по склону.

В науке требуется сделать множество измерений, а потом попытаться вывести из них небольшое количество законов, которые обобщают и объясняют эти наблюдения. Ньютон сформулировал три закона движения. Первый закон Ньютона – это закон инерции. Что такое инерция? Есть такое выражение «плыть по течению»; оно означает, что вам совершенно не хочется противиться инерции. Лежишь себе на диване и не рыпаешься. Вас кто-то должен подтолкнуть, чтобы вы встали с дивана. Объект в состоянии покоя (например, лежебока) так и останется в покое, пока на него не подействует внешняя сила.

Обсудим, что такое сила. Закон Ньютона об инерции состоит из двух частей. Первая часть: «*всякое тело сохраняет состояние покоя до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние*». Это логично. Допустим, лежит на столе яблоко. На него не действует никакая сила, поэтому оно остается в покое.

Вторая часть ньютоновского закона об инерции формулируется не столь очевидно: «*объект, равномерно движущийся с определенной скоростью, продолжит двигаться с той же скоростью, пока на него не подействует внешняя сила*». «Равномерно» означает с одной и той же скоростью, в одном и том же направлении. Если запустить мячик по полу, то он не будет двигаться в этом направлении вечно и с постоянной

скоростью, а замедлится и остановится. Ведь на него действует третья сила – трение между мячиком и полом. В обыденной жизни трение встречается повсеместно. Допустим, вы пустили по воздуху лист бумаги; он замедлится, а затем спланирует на пол. В полете на него действуют две силы: 1) сила гравитации, о которой мы вскоре подробно поговорим, и 2) сила сопротивления воздуха. Площадь листа бумаги велика, поэтому и сопротивление воздуха получается значительным.

Идея о том, что движущееся тело так и будет двигаться с постоянной скоростью, если на него не действуют внешние силы, не очевидна, так как мы повсюду сталкиваемся с трением. Сложно вообразить обыденную ситуацию, в которой отсутствует всякое трение и, соответственно, нет воздействия внешних сил. Фигуристка почти не испытывает трения между коньками и льдом, поэтому она может сравнительно легко прокатываться по льду на большие расстояния. Когда трение стремится к нулю, объект достаточно подтолкнуть – и он станет двигаться с постоянной скоростью. Галилей это понял. Открытый космос предлагает самые яркие примеры отсутствия какого-либо трения. В космосе действительно можно запустить объект и не сомневаться, что он так и полетит равномерно с этой скоростью, поскольку ничто не встретится ему на пути. Ньютон сформулировал все эти принципы в виде базового закона.

Второй закон движения Ньютона описывает, что происходит с объектом, на который воздействует сила. На объект могут действовать разнообразные силы, но, независимо от конкретных сил, именно их *сумма* дает отклонение от равномерной скорости. Чтобы количественно выразить такое отклонение, используется термин «*ускорение*»: ускорение – это изменение скорости за единицу времени. Следовательно, второй закон соотносит ускорение объекта с силой, действующей на него. Если подтолкнуть объект с некоторой силой, то объект ускорится. Если объект обладает небольшой массой, то ускорение будет велико; с другой стороны, приложив ту же силу к более массивному объекту, мы сообщим ему меньшее ускорение. Данное отношение описывается самым знаменитым уравнением Ньютона $F = ma$: сила равна произведению массы на ускорение.

Третий закон Ньютона можно «запросто» сформулировать так: «Ты толкаешь меня – я толкаю тебя». Таким образом, если одно тело с силой воздействует на другое, то второе тело воздействует на первое с равной, но противоположно направленной силой. Если хлопнуть рукой по столешнице, то ощущается отдача: сопротивление стола. Сила действия равна силе противодействия.

Допустим, у вас на ладони лежит яблоко. Определенно оно находится

в покое. Действуют ли на него какие-либо силы? Да, земная гравитация. Яблоко должно с ускорением лететь вниз, но этого не происходит. Дело в том, что вы удерживаете его рукой, словно подталкиваете вверх (на это затрачивается ваша мышечная сила). По третьему закону Ньютона, яблоко давит на ладонь – так ощущается *вес* яблока. Сила притяжения Земли действует на яблоко вниз, а сила вашей руки толкает яблоко вверх. Две эти силы компенсируют друг друга, их сумма равна нулю. Нулевая сила означает нулевое ускорение по второму закону Ньютона. Поэтому яблоко остается в покое и никуда не катится.

На самом деле все еще интереснее. Выше мы вычислили, что Земля облетает Солнце по кругу со скоростью 30 км/с, а значит, и яблоко движется с той же скоростью. Чтобы разобраться с этим, давайте сделаем отступление и поговорим о природе кругового движения.

При движении Земли по кругу со скоростью 30 км/с ее скорость является постоянной, но не является равномерной, так как направление движения Земли постоянно изменяется. Если бы направление не менялось, то Земля бы просто улетела по прямой, а не вращалась по кругу. Ускорение, возникающее при движении по кругу, встречается и в повседневной жизни. В развлекательных парках есть разнообразные аттракционы-горки, и на них такое ускорение пробирает вас насквозь.

Чтобы определить ускорение, испытываемое объектом, который движется с постоянной скоростью v по кругу радиусом r, Ньютон воспользовался собственноручно изобретенным дифференциальным исчислением. Такое ускорение равно v^2/r, оно направлено к центру круга. Яблоко у вас на ладони, которое кажется неподвижным, на самом деле летит со скоростью 30 км/с по этому колоссальному кругу, причем с ускорением. По второму закону Ньютона на яблоко должна действовать какая-то сила, и эта сила – гравитационное притяжение Солнца. Солнце тащит Землю по орбите со скоростью 30 км/с, а вместе с ней тащит и яблоко. Яблоко испытывает силу солнечной гравитации, точно как вы и я.

Мы летим вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Учитывая, как велика эта скорость, кажется, что результирующее ускорение также должно быть огромным, но ускорение на самом деле невелико, поскольку радиус круга огромен. Давайте посчитаем. Скорость Земли равна 30 км/с или 30 000 м/с, а радиус земной орбиты – 150 000 000 000 м. По формуле v^2/r ускорение a равно $(30\ 000\ \text{м/с})^2/150\ 000\ 000\ 000\ \text{м} = 0{,}006\ \text{м/с}^2$, или 0,006 метра в секунду за секунду. Таким образом, скорость Земли ежесекундно меняется на 6 миллиметров в секунду. Величина крошечная. Галилей открыл, что

тела падают на Землю под действием земного притяжения с ускорением примерно 9,8 метра в секунду за секунду, это значение гораздо больше. Следовательно, пусть мы и летим вокруг Солнца с огромной скоростью, Земля при этом ускоряется совершенно незначительно. Напротив, на американских горках наша скорость куда ниже 30 км/с, но радиус круга, по которому мы движемся, крохотный; подставив это меньшее значение r в формулу v^2/r, получаем довольно большое ускорение, которое весьма ощутимо. (Так, если радиус горок – 10 метров, а вы летите по ним со скоростью 10 м/с, то получается ускорение 10 метров в секунду за секунду).

Если попытаться проследить гравитационное воздействие Солнца, то складывается более тонкая ситуация. Солнечная гравитация сообщает одинаковое ускорение *всем* телам на Земле – вам, книге, которую вы держите, яблоку на ладони. Все мы вращаемся по околосолнечной орбите свободного падения. Нам только кажется, что мы неподвижны; просто мы не замечаем этого движения, равно как не замечаем и ускорения.

Но факт остается фактом: Земля вращается вокруг Солнца с ускорением, и это ускорение вычисляется по формуле v^2/r. Далее Ньютон применил третий закон Кеплера, чтобы определить, как сообщаемое Солнцем ускорение изменяется в зависимости от радиуса. Период орбитального вращения планеты (P) равен

$P = (2\pi r/v)$;

следовательно, орбитальный период вычисляется как расстояние, проходимое планетой по орбите ($2\pi r$), деленное на скорость (v). Таким образом:

P пропорционально r/v и

P^2 пропорционально r^2/v^2.

Кеплер установил, что P^2 пропорционально a^3, где a — большая полуось планетной орбиты. В данном случае земная орбита почти круговая, поэтому можно приблизительно взять $r = a$. В таком случае, подставив r вместо a, находим:

P^2 пропорционально r^3.

ПосколькуP^2 также пропорционально r^2/v^2,

r^2/v^2 пропорционально r^3.

Разделив на r, получаем:

r/v^2 пропорционально r^2.

Обратив это выражение, находим, что

v^2/r (ускорение) пропорционально $1/r^2$.

При помощи таких рассуждений, третьего закона Кеплера и элементарной алгебры мы показали, что гравитационное ускорение, сообщаемое Солнцем другому телу, удаленному от него на расстояние r, обратно пропорционально квадрату этого расстояния; это и есть ньютоновский «закон обратных квадратов». Вот как его сформулировал сам Ньютон:

> …в это время я был в расцвете моих изобретательских сил и думал о математике и философии больше, чем когда-либо после. Из правила Кеплера о том, что периоды планет находятся в полуторной пропорции к расстоянию от центров их орбит, я вывел, что силы, удерживающие планеты на их орбитах, должны быть в обратном отношении квадратов их расстояний от центров, вокруг коих они вращаются.

Такие представления о гравитации Ньютон также применил к Земле и Луне. Вспомните знаменитое упавшее яблоко, вдохновившее Ньютона. Оно расположено на расстоянии одного земного радиуса от центра Земли и падает на Землю с ускорением 9,8 м/с^2. Луна расположена на расстоянии 60 земных радиусов от центра Земли. Если сила тяготения Земли убывает в пропорции $1/r^2$ (как и у Солнца), то на лунной орбите земное притяжение должно давать ускорение в $(60)^2$ раз меньше тех 9,8 м/с^2, которым равно ускорение свободного падения на поверхности Земли, то есть около 0,00272 метра в секунду за секунду.

Точно как и в случае с вращением Земли вокруг Солнца, можно рассчитать ускорение Луны, вращающейся вокруг Земли, взяв период вращения (27,3 дня) и радиус лунной орбиты (384 000 километров). Подставив эти числа в формулу v^2/r, получаем ускорение 0,00272 метра в секунду за секунду. Эврика! Как красиво все согласуется с моделью, где расчет велся от яблока. По словам самого Ньютона, два этих результата показались ему «весьма близко совпадающими». Одна и та же сила притягивает к Земле и яблоко, и Луну, причем траектория Луны искривляется и становится не прямолинейной, а круговой, что позволяет ей удерживаться на приблизительно концентрической околоземной орбите. Сила земного притяжения, под действием которой падает яблоко, распространяется и на орбиту Луны. Ньютон совершил это открытие, когда

жил в доме бабушки, – Кембриджский университет в те годы был закрыт из-за чумы. Но он не опубликовал результаты своей работы. Вероятно, он был раздосадован, что наблюдения не вполне согласовывались с прогнозом – небольшое расхождение могло быть связано с тем, что Ньютон пользовался неточным значением земного радиуса. Как бы то ни было, опубликовать эти расчеты лишь много лет спустя уговорил Ньютона Эдмунд Галлей (в честь которого названа комета).

Ньютон сформулировал закономерность, которую часто называют пафосным выражением «*Закон всемирного тяготения*» – с ним вы познакомились в главе 2. Рассмотрим два объекта – например, Землю и Солнце. Расстояние между ними (1 а.е., или $1{,}5 \times 10^8$ км) примерно в 100 раз превосходит диаметр самого Солнца ($1{,}4 \times 10^6$ км). Эти тела обладают соответственно массами $M_{\text{ЗЕМЛ}}$ и $M_{\text{СОЛН}}$.

Ньютон обнаружил, что сила притяжения между двумя этими телами пропорциональна массе каждого из них и обратному квадрату расстояния r между ними (как я уже говорил, он пришел к такому выводу, опираясь на третий закон Кеплера). «Пропорциональна» в данном случае означает, что сила будет включать константу, характеризующую пропорциональность, – она называется G, или «постоянная Ньютона», в честь сэра Исаака. Вот формула Ньютона, описывающая тяготение между Солнцем и Землей:

$$F = GM_{\text{ЗЕМЛ}}M_{\text{СОЛН}}/r^2.$$

Речь идет о силе притяжения; два тела притягиваются друг к другу, и, следовательно, эта сила направлена от первого тела ко второму и от второго к первому.

По третьему закону Ньютона эта формула охватывает как силу притяжения Земли к Солнцу, так и силу притяжения Солнца к Земле. Но Солнце неизмеримо массивнее Земли. По второму закону Ньютона ускорение есть сила, деленная на массу. Следовательно, ускорение Земли гораздо, гораздо больше ускорения Солнца, и скорость, сообщаемая Солнцу из-за такого ускорения, крошечная по сравнению со скоростью Земли (Солнце и Земля вращаются вокруг общего центра масс, но он находится под поверхностью Солнца. Солнце минимально колышется вокруг этого центра, тогда как Земля описывает вокруг Солнца большой круг).

Рис. 3.1. Ускорение Луны и ньютоновского яблока, падающего с дерева. Обратите внимание: в обоих случаях вектор ускорения (изменения скорости) направлен к центру Земли. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Рассмотрим еще одно удивительное следствие из формулы Ньютона. По второму закону Ньютона сила гравитации, формулу которой мы записали чуть выше, равна произведению массы Земли ($M_{\text{ЗЕМЛ}}$) на ее ускорение, а при движении по кругу ускорение равно v^2/r. Таким образом, формулу $F = ma$ можно переписать:

$$GM_{\text{ЗЕМЛ}}M_{\text{СОЛН}}/r^2 = M_{\text{ЗЕМЛ}}v^2/r.$$

Обратите внимание: масса Земли присутствует и в левой, и в правой части тождества, поэтому ее можно сократить, и останется:

$$GM_{\text{СОЛН}}/r^2 = v^2/r.$$

Это означает, что ускорение Земли ($GM_{\text{СОЛН}}/r^2 = v^2/r$) не зависит от массы Земли. Это примечательный факт. Ускорение силы тяжести не зависит от массы ускоряющегося объекта, это касается и околосолнечных орбит, и тел, падающих на Землю в ее гравитационном поле, – все потому, что масса тела оказывается и в левой, и в правой части уравнения и, соответственно, сокращается. Если я брошу книгу и лист бумаги, то они будут испытывать одно и то же ускорение и должны падать с одинаковой скоростью, хотя книга гораздо массивнее. Галилей утверждал, что именно так и должно быть в вакууме. Так ли это на практике? Нет, книга и лист падают с разной скоростью из-за сопротивления воздуха. Сопротивление воздуха воздействует как на книгу, так и на лист, но поскольку книга гораздо массивнее, сопротивление воздуха ускорению книги будет невелико – в сущности, пренебрежимо. Однако если я положу лист бумаги на толстую книгу, так чтобы книга исключала соприкосновение листа бумаги с воздухом, и брошу их как одно целое, то они упадут вместе. Можете сами проверить!

Когда астронавты экипажа «Аполлона-15» прибыли на Луну, они захватили с собой молоток и перо, чтобы экспериментально проверить этот принцип. На Луне практически нет атмосферы; у ее поверхности – самый настоящий вакуум, соответственно никакого сопротивления воздуха там не будет. Когда астронавты одновременно бросали молоток и перо, те падали абсолютно синхронно, точно как прогнозировал Ньютон (и Галилей). В Интернете можно посмотреть видеозапись этого эксперимента.

Возможно, вам известно, что Аристотель в данном случае ошибался. Он считал, что более массивные тела должны падать быстрее и с большим ускорением. Это казалось ему логичным, но на самом деле он ни разу не поставил эксперимент, чтобы проверить, а верна ли эта идея. Он мог бы взять камень побольше и камень поменьше (ни на один камень сопротивление воздуха практически не действует), бросить их и убедиться, что оба камня упадут практически одновременно. Вывод: в науке исключительно важно экспериментально проверять любые интуитивные догадки!

Рассмотрим смежную проблему. Сила тяготения Земли воздействует

на яблоко, которое вы держите в поднятой руке. В формуле Ньютона есть величина *r* – расстояние от яблока до Земли. Можно было бы подумать, что здесь имеется в виду расстояние от яблока до пола, около 2 метров. Оказывается, это неверно. Ньютон осознал, что нужно учитывать притяжение каждого грамма земной массы; не только той, что у вас под ногами, но и всей остальной, вплоть до противоположного полушария. Ему потребовалось около 20 лет, чтобы выполнить такие вычисления. Пришлось сложить силы притяжения каждого отдельного кусочка Земли, у каждого из которых – свое расстояние и направление от яблока. Для сложения всех этих сил потребовалось изобрести совершенно новую область математики, сегодня именуемую *интегральным исчислением*. Результат такого вычисления показывает, что гравитация шарообразного тела (например, Земли) действует так, как будто вся масса сконцентрирована в центре этого тела, – интуитивно совершенно не очевидно. Чтобы вычислить силу тяготения, действующую на яблоко, нужно представить, что вся масса Земли локализована в одной точке на глубине 6371 километров – таково расстояние от поверхности до центра Земли. Мы уже пользовались таким методом, когда сравнивали падающее яблоко и вращающуюся на орбите Луну.

Но вертикальное падение яблока (прямо вниз) определенно не похоже на орбитальное вращение Луны. Почему Луна летает кругами, а яблоко просто падает на землю? Чтобы забросить яблоко на орбиту, мне бы пришлось горизонтально швырнуть его по прямой так сильно, чтобы оно могло облететь всю Землю. Есть, например, космический телескоп «Хаббл», летающий всего в нескольких сотнях километров над поверхностью Земли. Примерно за полтора часа он облетает околоземную орбиту, окружность длиной около 40 тысяч километров. Можно вычислить его скорость – где-то 8 километров в секунду. Итак, чтобы забросить яблоко на орбиту, нужно швырнуть его строго по горизонтали со скоростью восемь 8 в секунду.

Предположим, вы стоите на вершине высокой горы (где эффект трения атмосферы уже можно не учитывать) и бросаете объекты по горизонтали на все более высокой скорости. Бросьте яблоко так сильно, как сможете, – и оно почти сразу упадет на землю. Пригласите для броска бейсболиста-профессионала – он кинет яблоко немного дальше, но оно все равно упадет. Теперь пусть яблоко бросит Супермен. Он будет бросать все сильнее и сильнее, яблоко будет долетать все дальше, пока криволинейная траектория яблока не упрется в землю. Но поверхность Земли не плоская; на больших расстояниях становится заметно, что она также изгибается книзу. Супермен

действительно может швырнуть яблоко так, чтобы оно летело со скоростью 8 километров в секунду. Такой объект также будет падать под действием гравитации, но его криволинейная траектория будет повторять кривизну Земли. Поэтому этот объект так и не упадет, а окажется на круговой околоземной орбите. Объект на орбите все время падает и при этом не попадает на Землю. Когда вы бросаете яблоко, оно падает под действием земного тяготения. Благодаря все тому же тяготению Земли, и космический телескоп «Хаббл», и Луна вращаются вокруг Земли (орбита Луны гораздо выше, поэтому Луна движется намного медленнее). На низкой околоземной орбите вы падаете со скоростью вращения Земли, поэтому так и не можете упасть. Ньютон понимал это и теоретически описал искусственный спутник Земли – за 270 лет до того, как спутник был сконструирован!

Если вам доводилось ехать на лифте, который вдруг резко уходил вниз, то в течение какого-то мига вы ощущали, что падаете и все вокруг падает вместе с вами. Если бросить яблоко, то оно упадет, а вы нет, так как вас держит земля под ногами. Вы остаетесь в покое относительно окружающих предметов, а яблоко падает под действием гравитационного ускорения. Если бы вы держали в руке яблоко, а вас при этом сшибли с ног, то вы бы увидели, как падаете вместе с яблоком (пока не очутились бы на полу).

Вероятно, вы видели снимки астронавтов, работающих на Международной космической станции на околоземной орбите. Земное притяжение действует как на астронавтов, так и на МКС. Но все тела в пределах МКС падают с одинаковой скоростью – вспомните наши расчеты, демонстрирующие, что гравитационное ускорение не зависит от массы объекта, находящегося на орбите. Когда все падает с одинаковой скоростью, астронавты ощущают невесомость. «Вес» фиксируется на обычных напольных весах, когда вы на них стоите (или, что эквивалентно, фиксируется отдача весов по третьему закону Ньютона). Но если вы падаете вместе с весами, то не давите на них – они покажут «0». Вы будете невесомы.

Это, однако, не означает, что ваша *масса* равна нулю. Масса и вес не одно и то же! Масса, по Ньютону, – это величина, учитываемая во втором законе движения (где соотносятся силы, массы и ускорение); именно благодаря этой величине возникает и тяготение. Когда кто-то говорит, что «хочет избавиться от лишнего веса», на самом деле он хочет сбавить собственную массу. Жир имеет массу, именно от жира человек и избавляется. Тогда, прилагая прежние усилия, человек легче ускоряется и начинает свободнее двигаться.

Давайте подытожим достижения Ньютона. Изучая движения планет,

известных на то время, Кеплер вывел три закона, описывающих планетные орбиты. Затем явился Ньютон и совершенно переосмыслил открытия Кеплера; сформулировав три своих закона движения, он пытался понять, как движется *все на свете*, а не только шесть планет, вращающихся вокруг Солнца. Кроме того, он подвел физическую базу под силу тяготения – важнейшую силу в астрономии. Воспользовавшись третьим законом Кеплера, он показал, что сила тяготения должна ослабевать по формуле $1/r^2$. Он обнаружил, что два тела, пребывающие в гравитационном взаимодействии, притягиваются друг к другу; так, гравитационное взаимодействие Солнца и любой планеты вычисляется по формуле $F = GM_{\text{СОЛН}}M_{\text{ПЛАН}}/r^2$. Резюмируя все это, видим, что третий закон Кеплера можно выразить на уровне ньютоновских законов движения и закона тяготения. Ньютон предложил гораздо более обширное понимание физики, лежащей в основе третьего закона Кеплера, нежели сам Кеплер.

Окончательный триумф Ньютона наступил, когда подтвердилось, что по третьему закону движения планета должна двигаться по идеально эллиптической орбите, причем в одном из фокусов эллипса находится Солнце, а также что линия, проведенная между планетой и Солнцем, будет заметать равные площади за равные промежутки времени. Теперь все три закона Кеплера можно было напрямую вывести из единственного закона гравитационного притяжения, сформулированного Ньютоном, плюс трех его законов движения.

Ньютоновские законы тяготения были первыми физическими законами, которые мы поняли. Важно, что на их основе можно было делать проверяемые прогнозы. Галлей воспользовался законами Ньютона и открыл, что несколько комет, прилетавших в течение веков (в том числе комета 1066 года, изображенная на гобелене из Байё), – это в действительности одна и та же комета, вращающаяся по очень вытянутой эллиптической орбите. Она прилетает примерно раз в 76 лет. На ее движение влияют Юпитер и Сатурн, так как комета пересекает их орбиты, и слегка варьирующиеся сроки прибытия этой кометы можно предсказать при помощи законов Ньютона, тогда как, по законам Кеплера, вращение этой кометы должно быть строго периодическим. Галлей указал, что комета должна вернуться в 1758 году. Он умер в 1742 году, не дождавшись этого события, но комета действительно явилась в 1758 году и уже в следующем году была названа кометой Галлея. Приближение кометы к Солнцу на минимальное расстояние с точностью до месяца смогли спрогнозировать Алекси Клеро, Жером Лаланд и Николь-Рейн Лепот, воспользовавшиеся

законами Ньютона. Это было блестящее подтверждение ньютоновских законов тяготения.

Законы Ньютона помогли совершить еще одно выдающееся открытие. Планета Уран не вполне им подчиняется; ее орбита кажется немного искривленной. Урбен Леверье обнаружил, что эти отклонения можно объяснить, если Уран испытывает тяготение некоей невидимой планеты, расположенной еще дальше от Солнца. Он спрогнозировал, где может находиться эта планета, и в 1846 году Иоганн Готфрид Галле и Генрих Луи д’Арре, воспользовавшись расчетами Леверье, нашли эту планету лишь в 1° небесной сферы от указанной им точки. Законы Ньютона помогли открыть новую планету – Нептун. Репутация Ньютона достигла запредельных высот.

Читая эту книгу и пытаясь постичь Вселенную, мы будем вновь и вновь обращаться к этим базовым понятиям, описывающим силу и тяготение.

Глава 4
Как звезды излучают энергию (I)

Автор: Нил Деграсс Тайсон

Теперь давайте попытаемся осмыслить расстояния до звезд. Как мы уже знаем, расстояние от Земли до Солнца, равное 150 миллионам километров (или 1 а.е.), примерно в 100 раз превышает диаметр самого Солнца. Если уменьшить расстояние от Земли до Солнца до одного метра, то поперечник Солнца составит 1 сантиметр. Ближайшие звезды удалены от нас примерно на 200 000 а.е., поэтому, при описываемом уменьшении, они окажутся в 200 километрах. Межзвездное пространство несравнимо объемнее самих звезд. Такие расстояния удобно пересчитывать не в километрах или сантиметрах, а с учетом времени, за которое их преодолевает свет.

Скорость света, обозначаемая буквой *c*, равна 3×10^8 метров в секунду – еще одно число, которое стоит запомнить. В главе 17 мы подробно рассмотрим, почему эта скорость является абсолютно предельной. Ничто не может двигаться быстрее света. Поскольку мы отслеживаем звезды именно по их свету, кажется естественным измерять расстояние именно в таких единицах. Одна световая секунда – это расстояние, преодолеваемое лучом света за секунду, то есть 3×10^8 метров, или 300 000 километров, – примерно всемеро больше земного экватора. Луна удалена от нас на 384 000 километров, свет проходит это расстояние за 1,3 секунды. Можно сказать, что расстояние до Луны – 1,3 световой секунды. Расстояние от Земли до Солнца (1 а.е.) равно примерно 8 световым минутам; свет преодолевает его за 8 минут. Ближайшие звезды расположены в 4 световых годах от нас. Итак, световой год – это не мера времени, а мера длины: он равен расстоянию, которое свет преодолевает за год. Один световой год равен примерно 10 триллионам километров. Свет ближайших звезд, который мы видим сегодня, покинул их 4 года назад. Во Вселенной мы постоянно смотрим в прошлое. Эти ближайшие звезды мы видим не такими, каковы они сейчас, а такими, каковы они были 4 года назад.

Нечто подобное наблюдается и в повседневной жизни. Можно сказать, что скорость света равна примерно 30 сантиметрам в наносекунду, поэтому два человека, сидящих по разные стороны стола, видят друг друга с

запаздыванием в пару наносекунд. Разумеется, такой крошечной погрешности мы просто не замечаем, но такое запаздывание неотделимо от зрительного контакта.

Как измерить расстояние до ближайших звезд? Четыре световых года – это чрезвычайно много. Нам просто не хватит никакой рулетки, чтобы дотянуться до звезды. Поэтому давайте рассмотрим, что такое *параллакс*. Земля вращается вокруг Солнца (рис. 4.1). В январе Земля находится по одну сторону от Солнца, а полгода спустя, в июле, – по другую. Справа от Земли, в центре рисунка, изображена звезда, расположенная относительно недалеко, а еще правее показаны далекие звезды. Они настолько отдалены от нас, что я просто поставлю их на край страницы в линию. Теперь допустим, что я сфотографировал близлежащую звезду 1 января. В таком случае я увижу на снимке все звезды, которые были на небе, в том числе интересующую нас (на схеме она закрашена). На рис. 4.1 показано, как звездное небо выглядит с Земли 1 января. Сама по себе эта картинка, конечно, ни о чем не говорит. Помните, я не знаю, какие звезды далеко, а какие близко, – пока мне об этом ничего не известно. Но мы выждем полгода и вновь сделаем такую фотографию в июле, когда Земля будет на противоположной стороне орбиты, в совершенно новой точке. Теперь мы увидим точно такой же звездный фон, но интересующая нас звезда (закрашена) словно передвинется со своего прежнего места в точку, соответствующую июльскому положению Земли. Звезда сместится. Все остальные, в принципе, останутся на своих местах. Что произойдет за следующие 6 месяцев? Она вернется на прежнее место, туда, где была в январе. Звезда так и смещается между двумя точками в зависимости от того, в какой день года мы ее наблюдаем.

Промотайте две фотографии одну за другой, как в мультфильме, вперед, потом назад. Если при этом обе фотографии идентичны, за исключением одной звезды, которая смещается, то *именно эта* звезда расположена к вам ближе всех остальных. Если бы эта звезда была еще ближе, то смещение на снимке получилось бы еще заметнее. Ближние звезды сильнее «смещаются». Я пишу это слово в кавычках, поскольку звезда, конечно, никуда не движется – это мы постоянно вращаемся вокруг Солнца; все смещение связано с изменением нашей точки обзора.

Рис. 4.1. Параллакс. Когда Земля вращается вокруг Солнца, расположенная поблизости звезда смещается на фоне более удаленных звезд. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Хотите – убедитесь сами. Закройте левый глаз, вытяните руку и оттопырьте большой палец. Смотрите только правым глазом, и постарайтесь найти такой предмет, который просматривается на одной линии с большим пальцем. Затем приоткройте второй глаз. Что произойдет? Большой палец словно сдвинется. Теперь отставьте палец на половину длины руки и повторите опыт. Палец сдвинется еще значительнее. Открыв этот эффект, люди осознали, что он работает и со звездами. Ближняя звезда подобна большому пальцу, а диаметр земной орбиты – промежутку между двумя глазами. Естественно, если вы попытаетесь определить расстояние до звезды на глаз, это будет неэффективно, ведь несколько сантиметров между зрачками – слишком малое расстояние, чтобы можно было увидеть звезду под явственно разными углами. Но диаметр земной орбиты – 300 миллионов километров. Вполне достаточное расстояние, чтобы подмигнуть Вселенной и измерить, как далеко от тебя расположена та или иная звезда.

Как смотреть стереоскопические трехмерные картинки

Человеческое зрение таково, что мы видим окружающий мир в перспективе, – и все потому, что точки обзора у обоих глаз

немного отличаются. Именно поэтому мы можем «обманываться» и видеть изображение в перспективе даже на плоской книжной странице. Все, что для этого требуется, – рассмотреть бок о бок расположенные картинки, одна из которых изображена «с точки зрения» правого глаза, а другая – левого. В стереопаре с рис. 4.2 изображение для правого глаза расположено слева, а для левого – справа, поэтому линии обзора должны пересекаться. Взглянуть на картинку таким образом проще, чем кажется. Одной рукой держите картинку на расстоянии около 40 сантиметров перед глазами. Указательный палец другой руки поставьте ровно на половине пути от глаз до страницы. Посмотрите на страницу. Вы увидите два нечетких прозрачных изображения пальца (при этом одно фиксируется левым глазом, а другое – правым). Поводите указательным пальцем вперед-назад, пока два «пальца» не сойдутся воедино посередине нижней части картинки. Может быть, придется слегка наклонять голову влево и вправо, пока два изображения пальца не выровняются друг с другом. Теперь внимательно смотрите на палец. Перед вами должен четко вырисовываться палец, а за ним – три расплывчатые копии картинки со страницы. Переключите внимание на среднюю картинку, не меняя положения глаз. Должно получиться красивое объемное изображение, где на звездном фоне просто сияет яркая звезда Вега! Вы заметите, что разные звезды – на разных расстояниях. Мозг автоматически измеряет их смещения и высчитывает параллакс. Разумеется, именно так и можно увидеть трехмерное изображение. Мозг постоянно высчитывает параллаксы, измеряя расстояние до всех видимых объектов. Если просто посмотреть на палец, то глаза сами собой на нем сойдутся. За пальцем окажутся три расплывчатые картинки. Сфокусируйтесь на центральном – и оно станет объемным. Потренируйтесь, здесь нужно немного напрактиковаться. Не каждый в состоянии такое увидеть, но если вы умеете – вас ждет потрясающее зрелище, и такой навык стоит освоить. Мы еще воспользуемся таким искусством на страницах этой книги, когда будем рассматривать рис. 18.1.

На рис. 4.2 показан подобный пример, с созвездием Лиры. Звезды на двух картинках показаны смещенными пропорционально их наблюдаемому параллаксу, как будто перед нами – два снимка, сделанных с земной орбиты

с интервалом 6 месяцев. Мы немного увеличили смещение, чтобы оно было хорошо заметно.

Самая яркая звезда на снимке называется Вега, от нас до нее всего 25 световых лет. Она гораздо ближе к нам, чем соседствующие с ней звезды из центра Лиры. Если внимательно сравнить две картинки и поискать отличия, то будет заметно, что Вега сместилась сильнее других звезд.

Чем дальше звезда, тем меньше такое смещение. Но таким способом можно измерить расстояние до очень многих относительно близких звезд. Для этого придется воспользоваться простейшими геометрическими фактами.

Рис. 4.2. Параллакс Веги. Две смоделированные фотографии созвездия Лиры выглядят так, как будто они сделаны с земной орбиты с интервалом 6 месяцев, пока Земля вращается вокруг Солнца. Параллакс каждой звезды на картинках обратно пропорционален расстоянию до нее. (Смещения параллаксов значительно увеличены, чтобы они были легко заметны.) Вега (самая яркая звезда в созвездии Лира) находится на переднем плане, до нее всего 25 световых лет, она сдвигается сильнее всего. Чтобы оценить смещение параллакса Веги, достаточно сравнить ее положение на двух картинках. Эту картинку также можно смотреть в трехмерном виде – о том, как это делается, рассказано во врезке на с. 58. Постарайтесь, и увидите оба изображения как в стереоочках. Предоставлено Робертом Дж. Вандербеем и Дж. Ричардом Готтом

На рис. 4.1 мы видели, что в январе ближайшая звезда находится на

фоне одной совокупности звезд, а в июле – уже на фоне другой. Половину такого смещения принято называть *углом параллакса*, он соответствует сдвигу, который можно было бы увидеть, если передвинуться всего на 1 а.е., а не на 2 а.е. Мы знаем, чему равен радиус земной орбиты (1 а.е.) в километрах. Можем измерить угол параллакса. Представьте себе треугольник, в вершинах которого расположены Земля, Солнце и звезда. Это будет прямоугольный треугольник, причем в вершине с углом 90° находится Солнце. Смещение угла, фиксируемое в течение года при наблюдении за близлежащей звездой, в точности соответствует тому смещению, которое заметил бы наблюдатель с той звезды, глядящий в вашу сторону. Таким образом, наблюдаемый вами угол параллакса (половина общего смещения) будет равен углу между Солнцем и Землей (в июле), который измерил бы наблюдатель с близлежащей звезды (вновь см. рис. 4.1). Следовательно, построенный нами треугольник имеет угол в 90° у вершины с Солнцем, угол, равный углу параллакса, у вершины с близлежащей звездой, а угол у вершины с Землей равен 90° минус угол параллакса. Это так, поскольку, согласно евклидовой геометрии, сумма углов треугольника равна 180°.

Нам известна длина одного из катетов треугольника (расстояние от Солнца до Земли), и если знать градусные меры всех углов треугольника, то можно измерить и длину катета, соединяющего Солнце и близлежащую звезду. Таким образом мы напрямую измеряем расстояние до звезды. Теперь давайте изобретем новую меру расстояния. Возьмем в качестве данной меры такое расстояние, чтобы удаленная на это расстояние звезда имела параллакс в одну угловую секунду. Естественно, 1 угловая секунда равна 1/60 угловой минуты, а угловая минута равна 1/60 градуса. Таким образом, угловая секунда равна 1/3600 градуса. Известно, каково может быть расстояние до звезды, параллакс которой составляет 1 угловую секунду. Такое расстояние называется 1 *парсек*. Нравится такое название? Угол параллакса в 1 угловую секунду равен 1/(360 × 60 × 60) полной окружности. Если звезда расположена на расстоянии d, то длина такой окружности будет равна $C = 2\pi d$. Отрезок между Землей и Солнцем $r = 1$ а.е. противолежит 1/(360 × 60 × 60) данной окружности, таким образом, 1 а.е./$2\pi d$ = 1/(360 × 60 × 60). Следовательно, для параллакса в 1 угловую секунду d = 206 265 а.е. = = 1 парсек. Все это – просто евклидова геометрия.

В сериале «Звездный путь» эта единица длины используется довольно часто. Сколько это в световых годах? 3,26 светового года. Парсек – классная и интересная единица, но в этой книге мы будем оперировать

прежде всего световыми годами. Если вам когда-нибудь встретится термин «парсек», то знайте его этимологию. Астрономы составили это слово из фрагментов двух других терминов: «*пар*аллакс» и «угловая *сек*унда». Звезда с параллаксом 1/2 угловой секунды удалена от нас на 2 парсека, звезда с параллаксом 1/10 угловой секунды – на 10 парсеков. Все просто. В астрономии встречаются некоторые очень емкие термины, например «*квазар*». Дословно он означает «квазизвездный радиоисточник». «*Пульсар*» – это пульсирующая звезда. Мы придумали, а людям нравится. Есть часы Pulsar.

Какая звезда самая близкая к Земле? Это Солнце. Если вы ответили «альфа Центавра» – значит, я вас провел. Альфа Центавра – это ближайшая к Солнцу звездная система. *Альфа* – это самая яркая звезда конкретного созвездия, в данном случае речь идет о созвездии Центавр, что на Южном полушарии неба. На самом деле, альфа Центавра – это система из трех звезд, и одна из этих звезд расположена ближе всего к Солнцу. Тройная звездная система – это очень круто. В нее входят альфа Центавра А, звезда, схожая по типу с Солнцем, ее диаметр – 123 % солнечного; альфа Центавра В, ее диаметр – 86,5 % солнечного, и Проксима Центавра – тусклая красная звезда, диаметр которой – всего 14 % солнечного. Из трех этих звезд ближе всего к Солнцу расположена Проксима Центавра. Поэтому она и называется «Проксима» – в переводе с латыни «ближайшая». До нее примерно 4,1 светового года, ее параллакс – 0,8 угловой секунды.

Одна угловая секунда – это очень, очень мало. Вспомните практически любую фотографию ночного неба, которую вам доводилось видеть, сделанную с Земли при помощи профессионального телескопа, – видимый размер звезды на таком снимке обычно составляет около одной угловой секунды. Это типичный показатель для наземных телескопов. Качество фотографий с космического телескопа «Хаббл» в десять раз лучше. Когда мы работаем с наземными телескопами, нам страшно мешает атмосфера, из-за которой все звезды выглядят размытыми. Звездный свет прилетает к нам в виде идеально очерченной точки, строго следуя выбранному курсу. Затем он врезается в атмосферу, рассеивается, переливается и размазывается – вот и получается такое пятнышко. Мы на Земле говорим: «Как красиво! Звездочка мерцает». Но мерцание – просто погибель для астронома, рассматривающего звезду, а типичная ширина такого мерцания – 1 угловая секунда.

Обратите внимание: расстояние в 1 парсек меньше, чем до ближайшей звезды. Вот почему прошли тысячи лет, прежде чем удалось измерить параллакс. Первый звездный параллакс лишь в 1838 году измерил

немецкий математик Фридрих Бессель. (Если атмосфера искажает звезду более чем на 1 угловую секунду в ширину, то астроном должен сделать при помощи телескопа множество замеров, чтобы достичь точности *выше* 1 угловой секунды.) На самом деле аргументы в пользу вращения Земли вокруг Солнца, выдвинутые Аристархом более 2000 лет назад, опровергались именно потому, что в те времена не удавалось наблюдать параллакс. Древние греки были смышленые ребята. «Ладно, – говорили они, – вам не нравится наша геоцентрическая Вселенная, где Солнце вращается вокруг Земли?» Они знали, что если бы Земля действительно вращалась вокруг Солнца, то ближайшие звезды просматривались бы под разными углами, в зависимости от того, с какой стороны от Солнца находится Земля. То есть они считали, что мы должны были бы замечать такой эффект параллакса. До изобретения телескопа было еще далеко, поэтому они просто внимательно смотрели на небо и продолжали смотреть. Как бы внимательно они ни вглядывались, ровно никакой разницы они заметить не могли. На самом деле, поскольку такой эффект невозможно измерить без телескопа, отсутствие параллакса использовалось в качестве мощного аргумента против гелиоцентрической Вселенной. Но отсутствие доказательств далеко не всегда равноценно доказательству отсутствия.

Даже рассмотрев все эти звезды в ночном небе и заметив, что среди них попадаются размытые объекты, напоминающие облака тумана, мы еще не вполне представляли себе Вселенную вплоть до начала XX века. К тому времени звездный свет уже пропустили через призму, разложили и посмотрели, какими характеристиками он обладает. Тогда стало известно, что некоторые звезды можно использовать в качестве «эталонных источников света». Давайте об этом подумаем. Если бы все звезды в небе были совершенно одинаковы – например, нарезаны формочкой для печенья и заброшены на небо, – то сравнительно тусклые обязательно находились бы дальше сравнительно ярких. Все было бы просто. Все яркие звезды – близко. Все тусклые звезды – далеко. Но на деле все иначе. Среди всего этого звездного многообразия, независимо от того, где какие звезды расположены, мы ищем и находим звезды одной и той же категории. Итак, если найдется звезда, для спектра которой характерна какая-то специфическая особенность, и эта звезда находится достаточно близко, чтобы можно было измерить ее параллакс, – нам повезло. Теперь мы можем взять ее светимость в качестве отсчетной и определить яркость других подобных ей звезд как «вчетверо меньше» или «вдевятеро меньше», а затем вычислить, как далеко они находятся. Но сперва надо найти такой эталонный источник, мерило. Вплоть до 1920-х годов таких мерил не было.

До тех пор мы совершенно не представляли, насколько удалены от нас те или иные тела во Вселенной. На самом деле, в книгах того времени Вселенная описывается просто как «область, заполненная звездами», о более крупной Вселенной за пределами этой области ничего не было известно.

Когда пытаешься понять звезды, непременно нужны дополнительные математические инструменты. Один из них – *функции распределения*. В них заложены мощные и полезные математические идеи. Я хотел бы рассказать о них на простом примере, поэтому давайте начнем с так называемой гистограммы. Например, на такой диаграмме можно распределить количество человек в типичной аудитории американского колледжа в зависимости от их возраста (рис. 4.3).

Чтобы построить такой график, нужно спросить присутствующих, есть ли в аудитории кто-либо в возрасте 16 лет или моложе. Если никто не отзовется, то на графике этим возрастам будут соответствовать нулевые значения. Далее спросим, сколько 17–18-летних. Допустим, наберется 20 человек. Отметим этот возраст планкой, высота которой – ровно 20 единиц. А сколько тех, кому 19–20 лет? Тридцать пять человек. Так и продолжим, пока не учтем всех присутствующих.

Теперь давайте вернемся к рис. 4.3. Гистограмма позволяет кое-что сказать о распределении слушателей по возрасту в типичной аудитории. Например, большинству из них около 20 лет – из графика сразу ясно, что речь идет о группе из колледжа. Затем следует пробел, несколько одиночных значений и еще один всплеск, в районе 75 лет. На этом графике два всплеска, они называются модами. Такое распределение называется *бимодальным*. Большинство представителей «старшей» группы – никакие не студенты; вероятно, это вольнослушатели. Если человек может в дневное время посещать лекции в колледже, это значит, что он не обязан работать с девяти до шести, то есть это пенсионер. Можно представить себе демографическую картину, просто взглянув на такое распределение. Если бы мы построили такую гистограмму сразу для всего колледжа, то, вероятно, некоторые пробелы заполнились бы, но я готов поспорить, что общая картина осталась бы почти такой же: в основном младшие студенты, небольшое количество пожилых. Чисто случайно могут попадаться подростки-вундеркинды – может быть, один на тысячу, – поскольку, кажется, на каждом новом потоке хоть один да попадется. На такой гистограмме картинка будет повторяться с интервалом в 2 года. Думаю, если бы удалось достаточно увеличить размер выборки и включить в график всех студентов колледжей в США, интервал удалось бы уменьшить

до 1 дня. Я мог бы собрать такое количество данных, что столбики на диаграмме вообще перестали бы просматриваться. При таком объеме данных интервалы на диаграмме стали бы слишком узки, и мне пришлось бы перерисовать эту диаграмму в виде сплошной кривой. Если вы переходите от гистограммы к плавной кривой и можете представить ее в математической форме, то гистограмма превращается в функцию распределения.

Рис. 4.3. Гистограмма, демонстрирующая распределение слушателей в аудитории по возрасту. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Сколько всего человек в этой группе? Это легко узнать – идем по шкале слева направо и складываем цифры. В данном случае получается 109. При работе с гладкими функциями можно пользоваться интегральным исчислением, суммировать площадь под кривой и узнавать, сколько всего элементов на ней представлено. Исаак Ньютон изобрел интегральное

исчисление в возрасте 26 лет, – я считаю, он вообще был умнейшим человеком, когда-либо жившим на Земле!

Какое отношение все это имеет к звездам? Возьмем, к примеру, Солнце. Я скажу ему: «Солнце, поведай мне, сколько частиц света ты излучаешь?» Еще я мог бы добавить, что Исаак Ньютон задолго до Эйнштейна высказал идею, что свет состоит из частиц (корпускул). Эти частицы называются «фотоны» – не протоны, а именно фотоны. Корень «фото» тот же самый, что и в слове «фотография», еще можно вспомнить «фотонные торпеды», – фанаты сериала «Звездный путь» знают, что это такое.

Фотоны бывают самыми разными. Исаак Ньютон пропустил белый свет через призму и перечислил те цвета радуги, которые увидел: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, индиго (так называется синий краситель, популярный во времена Ньютона) и фиолетовый. Вы можете запомнить эту последовательность с помощью мнемонической фразы для запоминания цветов радуги: «Каждый охотник желает знать, где сидит фазан».

Английский астроном Уильям Гершель открыл совершенно иную часть спектра, которая сегодня называется *инфракрасным излучением*. Человеческий глаз его не воспринимает. С энергетической точки зрения он находится «ниже» красного. Гершель пропускал солнечный свет через призму и заметил, что термометр нагревается, если поместить его у красного конца спектра. В некоторых ресторанах используются инфракрасные лампы; под ними держат картофель-фри, поэтому гость всегда получает его теплым. Можно выйти за пределы видимого спектра и с другой стороны, тогда мы попадем в область *ультрафиолетового (УФ) излучения*. Об этих областях спектра вы слышали ранее, поскольку они упоминаются повсюду. Ультрафиолетовое излучение – причина загара и солнечных ожогов.

Таким образом, спектр гораздо шире видимой части. За ультрафиолетовым спектром расположен рентгеновский. В нем – свои фотоны. За рентгеновским – гамма-излучение. Об этих частях спектра вы тоже слышали. Отправимся в противоположную часть спектра – за инфракрасный. Что там? Микроволны. А за ними? Радиоволны. Раньше микроволны считались подмножеством радиоволн, но теперь классифицируются как самостоятельная часть спектра. Вот и все области спектра, для которых есть названия. За гамма-излучением ничего нет, только гамма-излучение, и за радиоволнами тоже ничего нет, только радиоволны.

Фотон – это частица. Но его можно трактовать как волну, это свойство называется «корпускулярно-волновой дуализм». Что же это значит, спросите вы, фотон – это волна или частица? Этот вопрос не имеет смысла. Скорее можно спросить о том, почему наш мозг не может изловчиться и представить себе объект, которому присуща такая двойственная природа. Это проблема. Можно изобрести новое слово, например «волница». Такой термин уже предлагали, но он так и не прижился, поскольку вопрос «что это такое?» по-прежнему актуален. Все зависит от того, как измерять свет. Можно считать его волной, а у волны есть длина. Длина волны обозначается греческой буквой «лямбда». Мы пользуемся строчной буквой, именно ею обычно обозначается длина волны.

Какова длина радиоволны? Представьте себе: давным-давно, если вы хотели переключить телевизионный канал, нужно было встать с дивана, подойти к телевизору и повернуть ручку. Да, были времена. На таких телевизорах стояла «рогатая» антенна – с двумя телескопическими уловителями, которые выдвигались из нее в форме буквы V. Если сигнал был плохой, нужно было потрогать эти рога. Они имели строго определенную длину, около метра. На самом деле, длина волн, обеспечивающих телесигнал, – тоже около метра. Антенна принимала телевизионные волны прямо из воздуха. Да, сегодня телесигнал обычно идет по кабелю, но вообще любые фотоны (в том числе радиоволны) совершенно свободно распространяются и в вакууме.

Поговорим о сотовых телефонах. У них большие антенны? Нет, совсем маленькие. Они работают в диапазоне микроволн, длина которых – около сантиметра. Сегодня антенну встраивают в сам телефон, но раньше, если вы собирались позвонить по сотовому, из него нужно было выдвинуть короткую толстую антенну.

Какой величины отверстия в переднем щитке вашей микроволновки? Да, там есть отверстия, поэтому вы и видите пищу, подогреваемую внутри. Может быть, вы и не обращали внимания, но они совсем маленькие – всего пара миллиметров в диаметре, гораздо меньше тех самых микроволн, что разогревают вам еду. Поэтому микроволны просто не могут вырваться из печки наружу. А знаете, где еще используются микроволны? В полицейских радарах, при помощи которых отслеживается превышение скорости. Микроволны отражаются от металлического корпуса автомобиля. Есть способ от них защититься: знаете такие плотные черные чехлы от насекомых («мухобойки»), которые любят надевать на передок своих машин некоторые водители, обычно владельцы спортивных автомобилей? Такой чехол отлично поглощает микроволны, поэтому если он попадет под

радар, то сигнал получится настолько слабым, что полиция его просто не заметит. Естественно, автомобильное ветровое стекло прозрачно для микроволн. Откуда известно, что микроволны свободно сквозь него проникают? А где водитель ставит антирадар? Обычно – в салоне машины, прямо на приборном щитке. Итак, очевидно, что микроволны проникают сквозь стекло. Именно поэтому вполне можно готовить в микроволновке блюда в стеклянной посуде – стекло прозрачно для микроволн. Полиция, фиксируя вашу скорость, пользуется так называемым *доплеровским смещением*, это явление мы обсудим чуть ниже. Пока сформулируем так: в данном случае доплеровское смещение – это степень изменения длины волны при отражении сигнала от движущегося тела. Смещение можно измерить максимально точно, если измерительное устройство расположено прямо на пути движущегося объекта. На практике радар измеряет скорость машины лишь приблизительно – чтобы измерить ее точно, полицейский должен был бы стоять прямо посреди трассы, а они так обычно не делают. Они стоят на обочине, поэтому (к сожалению) их радары всегда фиксируют заниженную скорость. Поэтому если вас остановят за превышение, то вам нечем крыть. Платите штраф и поезжайте дальше.

Полицейский радар испускает сигнал, отражающийся от автомобиля. Допустим, вы взглянули на собственное отражение в зеркале. В этот момент зеркало находилось в 3 метрах от вас, но оно движется в вашу сторону со скоростью 30 сантиметров в секунду. Ваше отражение появляется в 6 метрах от вас (свет успевает пройти 3 метра от вас до зеркала, а потом – 3 метра от зеркала до вас). Но всего через секунду зеркало уже на 30 сантиметров ближе к вам, и вы видите свое отражение на расстоянии всего 5,5 метра. Ваше отражение мчится к вам со скоростью 60 сантиметров в секунду. Аналогично, полицейский, который фиксирует у себя на радаре скорость вашего автомобиля, получает показатель, вдвое превышающий *вашу* скорость. Попробуйте объяснить это судье! Разумеется, радары откалиброваны так, что показывают вдвое уменьшенный показатель доплеровского смещения и, соответственно, точную скорость «зеркала» – вашего автомобиля. Кстати, слово «радар» в английском языке – это аббревиатура, означающая «радиообнаружение и измерение дальности», ведь радары появились еще в те времена, когда микроволны считались подмножеством радиоволн.

Поскольку мы говорим о микроволнах, упомяну, что молекула воды H_2O очень к ним чувствительна; волны в вашей микроволновой печи переворачивают эту молекулу с частотой самой волны. Если у нас есть

капелька воды, то это будет происходить со всеми молекулами в ней. С миллиардами триллионов молекул. Вскоре вода нагреется – из-за трения, возникающего между этими молекулами. Также нагреются любые попадающие в микроволновку продукты, в которых есть вода. Все, что мы едим (кроме соли), содержит воду. Вот почему в микроволновке так удобно разогревать и готовить, и по этой же причине она не нагревает стеклянные тарелки, на которых нет еды.

Человеческое тело реагирует на инфракрасное излучение. Кожа поглощает его, преобразует в тепло, и мы это чувствуем. Видимый свет нам хорошо известен. Люди с разным цветом кожи обладают разной восприимчивостью к ультрафиолету. Ультрафиолет может повредить глубокие слои кожи и вызвать рак. Атмосферный озон поглощает большую часть солнечного ультрафиолета. В атмосфере содержится обычный молекулярный кислород (O_2) плюс небольшое количество озона (O_3) – это молекулы, состоящие из двух и трех атомов кислорода соответственно. Озон находится в верхних слоях атмосферы, он постоянно «готов к распаду». Прилетает фотон ультрафиолета, молекула озона «впитывает» его и распадается. Ультрафиолета не осталось – озон просто поглотил его. Если убрать озон, то солнечный ультрафиолет будет беспрепятственно достигать поверхности Земли, и заболеваемость раком кожи резко повысится. На Марсе нет озона, и его поверхность постоянно купается в потоках солнечного ультрафиолета. Именно поэтому мы полагаем (и, думаю, не ошибаемся), что на поверхности Марса нет никакой жизни, хотя под поверхностью она и может существовать. Любой биоматериал, подвергшийся такому ультрафиолетовому воздействию, быстро бы разложился.

Практически каждый из нас подвергался рентгеновскому облучению. Помните, что делает рентгенолог, прежде чем сделать снимок? Он ставит вас в правильную позу, говорит «Вдохнуть – не дышать!», а затем выходит за свинцовую дверь и только после этого включает аппарат. Врач не хочет попасть под рентгеновское излучение. Логично предположить, что это вредная процедура. Но обычно рентгеновское облучение – меньшее зло, чем отказ от него. Например, оно может понадобиться для диагностики; если у вас сломана рука, то рентген это покажет. Рентгеновские лучи проникают не только под кожу, но и гораздо глубже; они могут вызывать рак внутренних органов. Но если вы получаете небольшую дозу такого излучения, то риск невелик.

Гамма-лучи еще хуже. Они бьют прямо по ДНК и могут устроить там

хаос. Даже в комиксах пишут, что гамма-лучи – это плохо. Помните Невероятного Халка? Как он стал Халком? Что с ним случилось? Помните, был эксперимент, в ходе которого он получил большую дозу гамма-излучения. Теперь, когда Халк злится, он превращается в огромного уродливого зеленого монстра. Поэтому берегитесь гамма-лучей – не хотелось бы, чтобы с вами произошло нечто подобное. По мере движения в коротковолновую часть спектра – от ультрафиолетовых лучей к рентгеновским и далее к гамма-излучению – энергия каждого отдельного фотона возрастает, равно как и его вредоносность.

Сегодня нас повсюду окружают радиоволны. Постоянно. Чтобы в этом убедиться, достаточно поставить простой эксперимент. Включите радио и настройтесь на станцию. На любую, в любое время. Радиосигнал ловится везде, станции вещают круглосуточно. Как убедиться, что вокруг нас – постоянные потоки микроволн? Ваш мобильник может позвонить в любой момент, например прямо сейчас. Если вы не станете засовывать голову в мощное поле работающей микроволновой печи, то микроволны совершенно безопасны по сравнению с тем, что творится в высокоэнергетической части спектра.

Все эти фотоны перемещаются в вакууме со скоростью света. Это не просто хорошая идея, а закон. Видимый (для нас) свет находится в средней части электромагнитного спектра, но все фотоны летят со скоростью 300 тысяч километров в секунду (если быть точным – 299 792 458 метров в секунду). Это одна из наиболее важных фундаментальных констант, которые нам известны.

Скорость фотонов во всех диапазонах спектра одинакова, но длина волны у них разная. Если я встану и буду смотреть, как мимо меня пролетают электромагнитные волны, то *частоту* волны можно определить как количество гребней этой волны в секунду. Чем короче волна – тем больше гребней в секунду. Поэтому короткие волны обладают высокой частотой и, наоборот, длинные волны обладают низкой частотой. Отличная ситуация, чтобы вывести тождество: скорость света (c) равна частоте, умноженной на длину волны (λ). Частота обозначается греческой буквой *ню*: ν. Получается уравнение:

$$c = \nu\lambda.$$

Допустим, мы имеем дело с радиоволнами, длина которых – 1 метр. Скорость света приблизительно равна 300 000 000 метров в секунду, что равно ν раз на метр. Таким образом, частота составляет 300 000 000

гребней (или циклов) в секунду (или 300 мегациклов).

На самом деле, есть еще одно уравнение, связывающее частоту и энергию фотона. Энергия E фотона равна h:

$$E = h\nu.$$

Это уравнение открыл Эйнштейн. В уравнении используется постоянная Планка h, названная в честь немецкого физика Макса Планка. В этом уравнении она служит *константой пропорциональности*, описывая, как взаимосвязаны частота и энергия фотона. Чем выше частота – тем больше будет энергия отдельно взятого фотона. В рентгеновских фотонах содержится огромное количество энергии, а в фотонах радиоволн – малая толика.

Теперь спросим Солнце: сколько фотонов каждой конкретной частоты ты нам даешь? Сколько зеленых фотонов прилетает с твоей поверхности, сколько красных, инфракрасных, микроволновых, радиоволновых и гамма-лучевых? Хочу знать. От Солнца мы получаем столько фотонов, что можно построить гораздо более точную картину, нежели простую гистограмму, – ведь данные поступают сплошным потоком. Я могу сделать гладкую кривую, и на этом графике я отложу интенсивность как функцию длины волны. В данном случае *интенсивность*, обозначаемая по оси ординат, соответствует количеству фотонов, за секунду поступающих с каждого квадратного метра поверхности Солнца, на единичный интервал длин волн, *умноженному* на энергию, которой обладает каждый фотон. Мы могли бы просто подсчитать фотоны, но, в конечном счете, нас интересует именно энергия, которую они несут. По оси ординат можно оценить *мощность* (количество энергии в единицу времени), поступающую с солнечной поверхности на единицу площади на единичный интервал длин волн. По оси абсцисс откладывается длина волны, возрастающая слева направо. Итак, давайте изобразим на графике рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи, видимый спектр (цвета радуги), инфракрасные волны (ИК) и микроволны (обозначим их μ-волны). На рис. 4.4 показана функция распределения интенсивности солнечного излучения.

Жаркое Солнце излучает энергию с температурой около 5800 К. Распределение было построено Максом Планком. Пиковая часть графиков приходится на видимую часть спектра, и это не случайно: наши глаза развивались таким образом, чтобы улавливать максимальное количество солнечного света. Для сравнения с другими звездами давайте выберем «средний» квадратный метр и воспользуемся им в качестве примера. Не так

важно, на какой именно мере площади мы остановимся, – главное пользоваться ею во всех примерах. Иногда мы говорим, что Солнце желтое, но оно не желтое. Нам нравится называть его желтым, поскольку пик светимости лежит в районе желтого цвета, однако с тем же успехом можно считать, что пик находится в районе зеленого; но никто же не скажет, что у нас в небе – зеленая звезда. Кроме желтого в солнечном

Рис. 4.4. Излучение, испускаемое звездами и людьми. По оси ординат откладывается энергия в единицу времени (то есть мощность), излучаемая различными объектами на единицу поверхностной площади на единичный интервал длин волн. По оси абсцисс откладывается длина волны. Показана звезда с температурой поверхности 30 000 K, Солнце (5800 K), коричневый карлик (1000 K) и человек (310 K). Показаны длины волн, соответствующие рентгеновским лучам, ультрафиолету, видимому свету (полоса, окрашенная в цвета радуги), инфракрасному и микроволновому диапазонам.

Предоставлено Майклом Строссом

свете необходимо в равной степени учесть фиолетовый, синий, голубой, зеленый и красный, об этом свидетельствует график. Сложите их все – и у вас получится смесь, где все эти цвета присутствуют практически в равных долях. Вспомним Исаака Ньютона. Что это за смесь? Это белый цвет. Если пропустить *обратно* через призму все цвета спектра в равных долях, то на выходе получим белый свет. Кстати, Ньютон ставил такой эксперимент. Неважно, каким Солнце рисуют в книгах, неважно, что говорят люди, – на практике у нас в небе светит белая звезда, вот так все просто. Кстати, если бы Солнце действительно было желтым, то в совершенно ясную погоду все белые предметы, в том числе снег, казались бы желтыми.

Температура поверхности Солнца – около 5800 K. Чтобы узнать температуру в кельвинах, нужно взять величину в градусах Цельсия (C) и прибавить к ней 273. Вода замерзает при 0 °C (или 273 K). Вода кипит при 100 °C (или 373 K). Значения по Цельсию и по Кельвину отличаются всего на 273 единицы, и чем более высокие температуры мы рассматриваем, тем менее существенной становится эта разница. В любом случае, 5800 K – очень жарко. При такой температуре вы просто испаритесь. Для полноты картины расскажу, что такое 0 K (возможно, вы слышали выражение «*абсолютный ноль*»). Это минимальная возможная температура. При 0 K любое движение молекул прекращается.

Рассмотрим другую звезду. Вот сравнительно «холодная», поверхностная температура которой – всего 1000 K (см. рис. 4.4). Где пик излучения такой звезды? В инфракрасном спектре. Так что, эта звезда невидима? Нет. Небольшая часть ее излучения приходится на видимый спектр. Интенсивность ее излучения в видимой части спектра стремительно падает, то есть она излучает гораздо больше красного, чем голубого. Нам такая звезда покажется красной. Теперь рассмотрим звезду с поверхностной температурой 30 000 K. Напоминаю: о распределении света я задаю тот же вопрос, что и о распределении слушателей в аудитории по возрасту. Где пик излучения этой звезды? В ультрафиолетовой области. Она излучает в ультрафиолетовой части спектра больше энергии, чем в какой-либо другой. Мы не видим ультрафиолет, но сможем ли увидеть такую звезду? Да, естественно. Она отдает огромное количество энергии и в видимой части спектра, гораздо больше, чем отдает поверхность Солнца. Но, в отличие от Солнца, смесь цветов в данном случае не равномерна, а выраженно смещена к голубой части спектра. Если сложить всю цветовую

гамму такой звезды, получится голубой цвет. Любой астрофизик знает, что самый холодный свет – красный, а самый жаркий – голубой.

Пик излучения нашей звезды с поверхностной температурой 30 000 К приходится на ультрафиолетовую часть спектра. Если бы я выбрал еще более горячую звезду, она также казалась бы нам голубой. Когда мы видим голубой цвет, это означает, что рецепторы голубого на сетчатке просто получают больше энергии, чем рецепторы зеленого и красного. Звезда с поверхностной температурой 30 000 К голубая, с поверхностной температурой 5800 К – белая, а с поверхностной температурой 1000 К – красная.

Что насчет человеческого тела? Какая у вас температура? Если не повышенная, то примерно 36,6 °С, или 310 К. Пик нашего излучения приходится на инфракрасную часть спектра. Сколько видимого спектра обычно отражает человек? Мы видим других людей именно потому, что их тела отражают свет в видимом спектре. Но если выключить свет, все в комнате становится черным. На диаграмме видно, что при выключенном свете тела с температурой 310 К практически не излучают свет в видимом спектре. Но при этом они все равно излучают инфракрасный. Если вооружиться тепловизором или инфракрасными очками ночного видения, то вы легко увидите в темноте людей, которые «ярко светят» в инфракрасном спектре. В следующей главе мы изобразим на подобной диаграмме целую Вселенную.

Глава 5
Как звезды излучают энергию (II)

Автор: Нил Деграсс Тайсон

Теперь давайте отправимся в большую Вселенную. В главе 4 мы рассмотрели графики теплового излучения звезд. На рис. 5.1 изображена очень похожая диаграмма, но с некоторыми дополнениями. По оси ординат откладывается интенсивность (мощность на единицу площади на единичный интервал длин волн), а по оси абсцисс – длина волны (увеличивается слева направо). Часть спектра, которую мы именуем «видимый свет», как и выше, обозначена радужной полосой.

На рисунке показаны кривые теплового излучения для Солнца (температура 5800 K), горячей звезды (температура 15 000 K), холодной звезды (3000 K) и человека (310 K). Пик кривой теплового излучения человека находится на уровне около 0,001 см. Гораздо ниже и правее этой кривой находим новую кривую – график, соответствующий средней температуре примерно 2,7 K. Это температура всей Вселенной! Именно такой температурой обладает знаменитое реликтовое излучение, льющееся на нас со всего неба. Поскольку его пик относится к микроволновой части спектра, его также называют «*космический микроволновый фон*». Реликтовое излучение было открыто в штате Нью-Джерси, в *Bell Laboratories* в середине 1960-х годов. Арно Пензиас и Роберт Вильсон работали с радиотелескопом, который называли «микроволновая рупорная антенна». Направив радиотелескоп в небо, они обнаружили, что отовсюду поступает микроволновый сигнал, и температура такого излучения должна составлять около 3 K (по современным уточненным данным, эта величина равна 2,725 K). Это тепловое излучение, сохранившееся после Большого взрыва. Мы гораздо подробнее поговорим об этом в главе 15.

Как и в предыдущем случае, эти графики можно рассматривать по-разному. Где пик каждой кривой? Эти пики расположены в разных местах. Сколько всего энергии излучается в секунду? Нужен способ просуммировать площадь под каждой кривой и определить, сколько всего энергии в секунду излучается в данном случае. Во-первых, давайте определимся с терминами.

Рис. 5.1. Тепловое излучение Вселенной. Спектры абсолютно черных тел, имеющих разную температуру, показаны как функции длины волны. По оси ординат откладывается энергия в единицу времени (то есть мощность), излучаемая различными объектами на единицу поверхностной площади при заданной температуре; единицы выбраны произвольно. Кривые соответствуют звездам с поверхностной температурой около 15 000 K (такая звезда покажется голубовато-белой), 5800 K (таково Солнце, которое покажется белым) и 3000 K (такая звезда покажется красной). Видимая часть спектра обозначена как радужная полоса. Также приведены графики излучения человеческого тела (310 K) и реликтового излучения (РИ, 2,7 K). О реликтовом излучении мы подробнее поговорим в главе 15. Предоставлено Майклом Строссом

Абсолютно черное тело – это объект, поглощающий все входящее

излучение. Абсолютно черное тело, имеющее определенную температуру, будет испускать так называемое «*излучение черного тела*», повторяющее контуры рассматриваемых кривых. Термин «абсолютно черное тело» может показаться неудачным, но это не так. Никто не спорит, что звезды – не черные; одна звезда сияет голубым, другая – белым, третья – красным. Но все они считаются абсолютно черными телами, как я и показал на рисунке. Абсолютно черное тело устроено просто: оно поглощает всю энергию, которую получает. Оно всеядно. Ему по вкусу и гамма-лучи, и радиоволны. Черные предметы поглощают всю попадающую на них энергию. Вот почему летом не стоит наряжаться в черное. Затем абсолютно черные тела переизлучают эти кривые – вот и всё. Контур и положение кривой зависят лишь от температуры абсолютно черного тела.

Можно нагреть предмет, повысить его температуру, а затем останется определить: какова новая температура? Затем мы возвращаемся к нашим кривым и смотрим, какой график соответствует новой температуре. Есть чудесное уравнение, описывающее эти кривые. Они являются функциями распределения и также именуются *планковскими функциями* в честь Макса Планка, который первым вывел уравнения для них. В правой части уравнения имеем энергию в единицу времени на единицу площади на единичный интервал длин волн при конкретной длине волны; эта величина называется «интенсивность» ($I\lambda$) и зависит только от температуры T абсолютно черного тела:

$$I_\lambda (T) = (2hc^2/ \lambda^5)/(e^{hc}/ \lambda^{kT} – 1).$$

Давайте разберемся, какие элементы входят в это эпохальное уравнение. Во-первых, здесь есть λ (лямбда), это длина волны, с ней все понятно. Постоянная e – это основание натуральных логарифмов, под нее выделена специальная клавиша на любом инженерном калькуляторе, на которой обычно написано «e^x» (e в степени x). Значение числа e равно 2,71828…; как и в числе π, в нем бесконечное количество десятичных знаков. Это просто число. Буква c означает скорость света, с ней мы уже встречались. Буква k – это постоянная Больцмана. Буква T – это просто температура, а буква h означает постоянную Планка, с которой мы познакомились в главе 4. Если присвоить объекту температуру T, то единственным неизвестным в уравнении остается λ – длина волны. Так, постепенно присваивая λ разные значения, от очень малых до очень больших, мы получаем значение I_λ. Это будет функция от длины волны,

строго повторяющая показанные кривые. Макс Планк предложил это уравнение в 1900 году, и оно произвело революцию в физике.

Предложив свою постоянную, Планк положил начало *квантовой физике*; в то же время Макс Планк является и отцом-основателем квантовой механики. Обратите внимание на первый член в скобках: $2hc^2/\lambda^5$. Что происходит с энергией по мере увеличения длины волны? Она падает. С ростом λ член $1/\lambda^5$ стремится к нулю. При больших λ член $hc/\lambda kT$ уменьшается. Математик сказал бы, что e^x по мере уменьшения x становится примерно равен $1 + x$.Так, при больших λ член $hc/\lambda kT$ уменьшается, а член e^{hc}/λ^{kT} становится примерно равен $1 + hc/\lambda kT$, и, если вычесть отсюда 1, член $(ehc/\lambda kT–1)$ становится равен $hc/\lambda kT$. Соответственно в пределе, когда λ становится большим, все выражение приобретает вид $I\lambda(T) = (2hc^2/\lambda^5)/(hc/\lambda kT)= 2ckT/\lambda^4$. Это тождество было известно и до Планка. Оно называлось «Закон Рэлея – Джинса» в честь открывших его лорда Рэлея и сэра Джеймса Джинса. По мере роста λ интенсивность $I\lambda$ начинает падать в строгом соответствии с формулой $1/\lambda^4$.Что происходит, когда мы двигаемся в сторону все более коротких волн? По мере уменьшения λ^4 $1/\lambda^4$ возрастает, в результате чего уравнение рушится (перестает согласовываться с экспериментами). В свое время это явление было названо «ультрафиолетовая катастрофа». Здесь явно была какая-то ошибка. Вильгельм Вин сформулировал закон, объяснявший экспоненциальный спад при малых длинах волн и согласовывавшийся с данными в коротковолновом диапазоне, но не согласовывавшийся в длинноволновом. Мы не имели четкого представления об этих температурных кривых абсолютно черного тела вплоть до 1900 года, когда Макс Планк вывел формулу, согласовывавшуюся с данными и в коротковолновом, и в длинноволновом пределе спектра, а также везде между ними. Формула содержит постоянную h, которая позволяет *квантовать энергию* так, что любая энергия учитывается в виде дискретных пучков. Если трактовать энергию как дискретные пучки, то по мере перехода ко все более коротким волнам формула Планка начинает возрастать по экспоненте и член $1/\lambda^5$ превращается в ничто. Когда λ мала, $hc/\lambda kT$ возрастает, а число e, возведенное в такую степень (e^{hc}/λ^{kT}), очень быстро становится очень большим. Оно настолько больше –1, что этот член можно игнорировать, а при e^{hc}/λ^{kT} в знаменателе ответ получается маленьким. Две эти части уравнения, член $1/\lambda^5$ и член $1/e^{hc}/\lambda^{kT}$, словно состязаются друг с другом. По мере того как λ стремится к нулю, $1/e^{hc}/\lambda^{kT}$ стремится к нулю гораздо быстрее, чем успевает расти член $1/\lambda^5$, поэтому и

вся кривая стремится к нулю. Без экспоненциального члена вся формула быстро устремилась бы к бесконечности, а длина волны – к нулю, но эксперименты показывают, что на практике это не подтверждается. Феномен кванта потребовался, чтобы понять природу теплового излучения, и уравнение Планка объясняет устройство этих кривых.

Формула Планка позволила все это учесть. Она верно показывает, где будет пик кривой. Исаак Ньютон изобрел математику, позволяющую вычислить пик функции: там, где крутизна кривой стремится к нулю при максимальном значении этой кривой. Ньютоновское дифференциальное исчисление позволяет взять производную функции и найти это место. В таком случае получим очень простой ответ: $\lambda_{пик} = C/T$, где C – новая константа, которую можно вывести из констант исходного уравнения. C = 2,898 мм, если T выражена в кельвинах. Где будет пик? Если T = 2,7 К, как в случае с РИ, то $\lambda_{пик}$ будет чуть выше 1 мм или 0,1 см. Можно в этом убедиться, сверившись с кривой РИ на рис. 5.1. Человек примерно в 100 раз горячее; пик человеческого излучения приходится примерно на 0,001 см (см. рис. 5.1), в инфракрасном диапазоне.

Это красиво. С повышением температуры постоянно уменьшается длина волны, при которой кривая достигает пикового значения. Чтобы в этом убедиться, достаточно всего лишь рассмотреть свойства уравнения $\lambda_{пик} = C/T$. При T в знаменателе имеем, что вдвое более горячее тело даст пик функции при вдвое меньшей длине волны (эту зависимость обнаружил Вильгельм Вин, поэтому она называется «закон Вина»).

Как определить общую энергию на единицу времени на единицу поверхности, соответствующую площади под одной из этих кривых? Мне потребовалось бы просуммировать вклад от всех различных длин волн, то есть всю площадь под конкретной кривой. Для этого можно воспользоваться интегральным исчислением – опять же, спасибо Исааку Ньютону. Если интегрировать функцию Планка по всем длинам волн, то получится еще одно красивое уравнение.

Общая энергия, излучаемая в секунду на единицу площади = σT^4, где $\sigma = 2\pi^5 k^4/(15c^2h^3) = 5{,}67 \times 10^{-8}$ ватт на квадратный метр, причем T – это температура в кельвинах. Перед нами *закон Стефана – Больцмана*. Йозеф Стефан и Людвиг Больцман были двумя титанами физики XIX века. К сожалению, Больцман свел счеты с жизнью, когда ему было 62 года. Но сохранился этот закон. Если интегрировать функцию Планка, то получится значение постоянной (греческая буква «сигма»). Это колоссально. Как Стефану и Больцману удалось сформулировать этот закон, если Планк еще

не вывел свою формулу? Стефан открыл закон экспериментально, а Больцман сформулировал, исходя из соображений о термодинамике.

Если общая энергия, излучаемая в секунду на единицу площади равна σT^4, то, если удвоить температуру, поток излучаемой энергии возрастет с коэффициентом $2^4 = 16$.Утроим температуру, и что получится? $3^4 = 81$.Учетверим – и получится $4^4 = 256$.Эта тенденция прослеживается на рис. 5.1, где видно, насколько увеличиваются кривые при возрастании температуры.

Вот как можно запомнить принцип работы этой формулы. Допустим, мы взяли какое-то количество теплового излучения и положили его в коробочку. Теперь будем медленно сжимать коробочку, пока она не станет вдвое меньше. Количество фотонов в коробочке останется тем же, но объем коробочки уменьшится в 8 раз и, соответственно, количество фотонов на кубический сантиметр возрастет в 8 раз. Но при сжатии коробочки длина волны каждого фотона также укорачивается вдвое. В результате тепловое излучение коробочки становится вдвое жарче, так как пиковое значение длины волны уменьшилось вдвое. Удваивается энергия каждого фотона и, соответственно, энергия коробочки. Увеличение энергии каждого фотона происходит за счет той энергии, что затрачивается на сжатие коробочки, эта энергия противодействует давлению излучения, что внутри коробочки. Таким образом, плотность энергии в коробочке будет в $8 \times 2 = 16$ раз выше, чем ранее, а $16 = 2^4$. Следовательно, энергетическая плотность теплового излучения пропорциональна температуре в четвертой степени, или T^4.

Давайте определимся еще с некоторыми терминами. *Светимость* – это общая энергия, излучаемая звездой в единицу времени. Светимость измеряется в ваттах, точно как у лампочки накаливания. Светимость 100-ваттной лампочки равна 100 ватт. Светимость Солнца равна $3{,}8 \times 10^{26}$ ватт. Мощная такая лампочка.

Теперь предложу задачку. Допустим, Солнце обладает такой же светимостью, что и другая звезда, чья поверхностная температура – 2000 К. Какова температура Солнца? В данном примере давайте округлим ее до 6000 К. Температура другой звезды всего 2000 К, то есть она гораздо прохладнее и не может излучать столько же энергии на единицу площади в единицу времени, сколько Солнце, но я заявляю, что светимость у этой звезды точно как у Солнца. Как такое может быть? Беру вторую звезду, вырезаю с нее лоскут площадью 1 см^2, с температурой 2000 К, затем вырезаю с Солнца такой же лоскут площадью 1 см^2, с температурой 6000 К – втрое жарче. Сколько энергии в единицу времени будет излучать такой

лоскут на Солнце по сравнению с лоскутом такой же площади на звезде с температурой 2000 К? В 81 раз больше энергии. Каким же образом вторая звезда может излучать в секунду такую же суммарную энергию, как и Солнце? Если у этих звезд одинаковая светимость, то они должны отличаться чем-то еще, кроме температуры. Дело в том, что вторая звезда, сравнительно холодная, должна иметь гораздо более обширную *поверхностную площадь*, с которой льется излучение. Фактически ее поверхностная площадь должна быть в 81 раз больше, чем у Солнца. Это должен быть красный гигант, который за счет огромной поверхностной площади восполняет дефицит температуры. Теперь вернемся к нашим уравнениям. Чему равна площадь поверхности сферы? Она равна $4\pi r^2$, где r – радиус сферы. Возможно, вы изучали это уравнение в средней школе. Дальше начинается самое интересное. Если светимость – это энергия, излучаемая в единицу времени, а энергия, излучаемая в единицу времени *на единицу площади*, равна σT^4, то мы получили уравнение, позволяющее вычислить светимость Солнца:

$$L_{\text{Солн}} = \sigma T_{\text{Солн}}^4 \times (4\pi r_{\text{Солн}}^2).$$

Можно составить схожее уравнение и для другой звезды. Обозначим ее светимость звездочкой, L_*. В таком случае уравнение для вычисления светимости этой звезды – $L_* = \sigma T_*^4 \times (4\pi r_*^2)$. Теперь у меня есть уравнения для обеих. Более того, я постулировал, что $L_{\text{Солн}}$ равна L_*. Я привел именно такой пример, чтобы подчеркнуть, что мне даже не требуется знать поверхностную площадь Солнца – в данной задаче речь идет лишь о соотношениях величин. Можно удивительно много узнать о Вселенной, просто присмотревшись к соотношениям.

Давайте разделим два уравнения: $L_{\text{Солн}}/L_* = \sigma T_{\text{Солн}}^4 \times (4\pi r_{\text{Солн}}^2)/ \sigma T_*^4 \times (4\pi r_*^2)$. Что дальше? Я сокращу равные множители в числителе и знаменателе дроби в правой части уравнения. Первым делом сокращу постоянную. Меня не интересует ее конкретное значение, поскольку мы сравниваем два объекта и эта константа присутствует в характеристиках обеих звезд. Поэтому ее можно сократить. Кроме того, сокращается число 4 и число π. Переходим в левую часть уравнения: что такое $L_{\text{Солн}}/L_*$? Это выражение равно 1, поскольку, как было заявлено, две звезды обладают одинаковой светимостью и их соотношение равно 1. Итак, остается значительно более простое уравнение: $1 = T_{\text{Солн}}^4 \times r_{\text{Солн}}^2/T_*^4 \times r_*^2$.

Температура Солнца равна 6000 К, а температура другой звезды – 2000 К. Естественно, 6000^4, деленное на 2000^4, равно 3^4, то есть 81. Получается, $1 = 81r_{\text{Солн}}^2/r_*^2$. Умножим обе части уравнения на r_*^2. Имеем $r_*^2 = 81r_{\text{Солн}}^2$. Извлечем квадратный корень из обеих частей уравнения, получится $r_* = 9r_{\text{Солн}}$. Радиус более холодной звезды в 9 раз больше, чем у Солнца! Это ответ. Если переосмыслить его в терминах площади, то поверхностная площадь у этой звезды должна быть в 81 раз больше солнечной, а радиус – в 9 раз больше солнечного. Члены в уравнении остаются прежними, но мы подставляем разные переменные в разные части уравнения. Вот и все, чем мы здесь занимались.

Как вы помните (из главы 2), самое жаркое время суток наступает не в полдень, а несколько позже, так как земля поглощает видимый свет. Видимый свет постепенно разогревает грунт, после чего грунт начинает испускать инфракрасное излучение. Грунт ведет себя как черное тело – впитывает солнечную энергию, а затем переизлучает ее согласно функции Планка. Температура грунта – примерно 300 К (то есть 273 К + температура грунта по Цельсию, примерно 27 °С, получается ровное значение 300 К).

Возможен вопрос: а какова светимость нашего тела? Подставим в выражение температуру тела в кельвинах, 310 К, возведем ее в четвертую степень, умножим на постоянную сигма – и узнаем, сколько энергии мы излучаем в единицу времени на единицу площади. Если подставить в формулу общую площадь вашей кожи (у взрослого человека – в среднем 1,75 $м^2$), то получится ваша светимость, ваша мощность в ваттах. Эта энергия излучается не в видимом диапазоне, а преимущественно в инфракрасном, но мощность в ваттах у вас определенно есть. Посчитаем. Постоянная Больцмана $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ ватт на квадратный метр, если измерять температуру в кельвинах. Умножим на $(310)^4$. 310^4 равно $9{,}24 \times 10^9$. Умножим это значение на $5{,}67 \times 10^{-8}$ и получим 523 ватта на квадратный метр. Умножим это значение на 1,75 $м^2$ и получим 916 ватт. Это много. Однако учтите, что если вы сидите в комнате при температуре 300 К (27 °С), то по той же формуле ваша кожа поглощает 803 ватта энергии. На поддержание температуры тела уходит около 100 ватт. Эту энергию мы получаем при приеме и переваривании пищи. Теплокровные животные, чья температура тела выше температуры окружающей среды, должны есть больше, чем холоднокровные. Включая в комнате кондиционер, нужно задать два основных вопроса: 1) насколько велика комната и 2) какие еще источники энергии есть в комнате? В частности, нас

интересует, сколько в комнате горит лампочек и сколько в ней находится человек, так как человека можно сравнить с лампочкой – он тоже имеет мощность в ваттах, выделяет тепло, и это также нужно учитывать при охлаждении. Чтобы определить настройки кондиционера для поддержания нужной температуры в комнате, нужно учесть, сколько человек (в ваттах) в ней соберется.

Перейду к следующему феномену под названием *яркостью*[5]. Наблюдаемая яркость звезды – это ее энергия на единицу площади в единицу времени, фиксируемая вашим телескопом. Яркость говорит о том, насколько яркой звезда вам *кажется*. Это зависит от светимости звезды, а также от того, на каком расстоянии от вас она находится. Давайте попытаемся интуитивно осмыслить яркость. Насколько ярким должен вам показаться объект? Логично, что если вы наблюдаете объект с постоянной яркостью, а потом я отодвину этот объект подальше, его яркость снизится. В свою очередь, светимость – это энергия, излучаемая объектом в единицу времени. Она никак не зависит от расстояния до вас, это просто излучаемая энергия. Она никак не зависит от измерений. Светимость 100-ваттной лампочки равна 100 ватт независимо от того, в какой точке Вселенной ее подвесить. Однако яркость зависит от расстояния между объектом и наблюдателем.

Яркость – простая штука, мне она нравится. Хотите расскажу? Опишу устройство, которое сам я не собирал, но вы можете запатентовать, если желаете. Это устройство называется масломет: заряжается куском масла. Спереди у него такой носик, откуда разбрызгивается масло (см. рис. 5.2).

Расположим ломтик хлеба в 30 см от масломета. Я откалибровал орудие так, чтобы порция масла полностью, до краешков, покрывала ломтик, расположенный на расстоянии 30 см. Если вам нравится намазывать масло на хлеб до самого края, то вы оцените такое изобретение. Теперь допустим, что я хочу сэкономить деньги, как любой хороший бизнесмен: хочу замазать тем же количеством масла несколько ломтиков хлеба. Но масло все равно должно распределяться по ломтику равномерно. Первый ломтик мы отставляли на 30 см, а эти отставим на 60 см. Масляный аэрозоль разлетится на большую площадь. На двойном расстоянии один залп поможет замаслить площадь в 2 ломтика шириной и 2 ломтика высотой. То есть масляный аэрозоль накроет решетку размером 2 × 2 хлебных ломтика, всего намажет 4 ломтика. Всего лишь удвоили расстояние – и уже смогли намазать маслом 4 ломтика. Если утроить расстояние, то можно побиться о заклад, что аэрозоля хватит, чтобы намазать 3 × 3 = 9 ломтиков хлеба. Один ломтик, четыре ломтика, девять

ломтиков. Сколько масла попадает на один ломтик хлеба, расположенный на расстоянии 90 см, по сравнению с ломтиком, который был удален всего на 30 см? Одна девятая. Хлеб все равно орошается маслом, но вдевятеро слабее. Клиент будет недоволен, зато понятно, к чему я клоню.

Рис. 5.2. Масломет. Он может размазать порцию масла по одному ломтику хлеба, удаленному на расстояние 30 см, по четырем ломтикам хлеба, удаленным на 60 см, или по девяти ломтикам, удаленным на 90 см. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Я хочу показать, что в работе такого масломета заложен важный закон природы. Если бы вместо масла у нас был свет, то его интенсивность уменьшалась бы ровно такими же темпами, что и количество масла на один ломтик. В конце концов, свет летит по прямой линии, как и капельки масляного аэрозоля, и распределяется по тому же принципу. На расстоянии 60 см интенсивность света 100-ваттной лампочки будет составлять всего 1/4 от ее же интенсивности на расстоянии 30 см. На расстоянии 90 см останется всего 1/9 интенсивности, на расстоянии 120 см – 1/16 интенсивности, на расстоянии 150 см – 1/25 интенсивности и так далее. Интенсивность падает *пропорционально квадрату расстояния* – обратно квадрату. На самом деле, мы только что вывели важный физический закон, описывающий, как с увеличением расстояния ослабевает интенсивность излучения, *закон обратных квадратов*. Помните ньютоновскую формулу $Gm_a m_b/r^2$? «Эр в квадрате» в знаменателе демонстрирует отношение по закону обратных квадратов, принцип тот же, что и в масломете. Гравитация и масломет обладают схожими свойствами.

Рис. 5.3. Солнце – это сфера. Солнечное излучение распределяется по площади $4\pi r^2$, перед этим проходя через сферу радиусом r. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Представьте себе источник света, подобный Солнцу, излучающий во всех направлениях (рис. 5.3). Далее предположим, что я заключу Солнце в огромную сферу, равную по радиусу земной орбите (1 а.е.). Солнце излучает свет во всех направлениях, и часть светового потока я перекрываю. Я получаю лишь ничтожную долю того света, что проходит через сферу, в центре которой находится Солнце, причем радиус этой сферы равен расстоянию от Солнца до меня. Чему равна площадь этой большой сферы? Она равна $4\pi r^2$, где r – радиус сферы. Из всего солнечного света та доля, что попадает в мой детектор, равна площади детектора, деленной на площадь этой огромной сферы ($4\pi r^2$). Если я отодвинусь на вдвое большее расстояние, то размер моего детектора не уменьшится, а радиус сферы увеличится вдвое (2 а.е.) и площадь, через которую будут проникать лучи Солнца, станет вчетверо больше. В мой детектор попадет лишь четверть фотонов от того количества, что мне удавалось поймать, когда я был на расстоянии 1 а.е. от Солнца. Яркость выражается в ваттах на квдратный метр, улавливаемых моим детектором. Чтобы вычислить яркость, которую я буду наблюдать в радиусе r от Солнца, я беру светимость Солнца (в ваттах) и делю ее на площадь сферы – $4\pi r^2$. Таким образом я узнаю, сколько ватт от Солнца получаю в пересчете «количество ватт на квадратный метр». Умножаю это значение на площадь моего детектора (скажем, телескопа) и узнаю, сколько энергии в секунду он

получает. Если L – светимость Солнца, то яркость Солнца (B), которую я буду наблюдать, вычисляется по формуле $B = L/4\pi r^2$, где r – расстояние от Солнца до меня. По мере увеличения этого расстояния знаменатель ($4\pi r^2$) растет, и яркость снижается. На Нептуне, который расположен в 30 раз дальше от Солнца, чем Земля, Солнце кажется в 900 раз тусклее, чем у нас.

Допустим, две звезды на небе обладают одинаковой яркостью, но я знаю, что светимость у одной из них в 10 000 раз выше, чем у другой. Что можно сказать об этих звездах? Звезда с большей светимостью должна находиться дальше. Во сколько раз? В 100 раз. Как у меня получилось 100? Да, 100 в квадрате равно 10 000.

Вы только что изучили некоторые из глубочайших проблем астрофизики конца XIX – начала XX века. Так, Больцман и Планк стали героями науки, поскольку осознали материал, изложенный в двух предыдущих главах.

Глава 6
Звездные спектры

Автор: Нил Деграсс Тайсон

Что на самом деле происходит внутри звезды? Звезда – это не просто маячок, который достаточно включить, чтобы с его поверхности полился свет. Глубоко в недрах звезды протекают термоядерные процессы, в результате которых выделяется энергия, и эта энергия постепенно пробивается к поверхности звезды, где высвобождается и со скоростью света летит на Землю, а также во всю Вселенную. Давайте проанализируем, что происходит при продвижении такой тучи фотонов сквозь материю – ведь без сопротивления при этом не обходится.

Для начала нужно понять, через что пробиваются фотоны на пути к поверхности Солнца. Наша звезда и большинство остальных состоят преимущественно из водорода – самого распространенного элемента во Вселенной. 90 % всех атомных ядер – это ядра водорода, 8 % – ядра гелия, а оставшиеся 2 % приходятся на все остальные элементы Периодической системы. История всего водорода и большей части гелия прослеживается вплоть до Большого взрыва, тогда же появилось ничтожное количество лития. Остальные элементы уже позже синтезировались в звездах. Если вы – поклонник той точки зрения, что земная жизнь есть нечто уникальное, то должны считаться со следующим важным фактом: если расставить по частоте встречаемости пять важнейших элементов во Вселенной – водород, гелий, кислород, углерод и азот, то этот набор будет очень напоминать химический состав человеческого организма. Какова основная молекула в теле человека? Это вода – вы на 80 % состоите из H_2O. Если расщепить воду, то выделится водород, элемент номер один в человеческом организме. В вас совершенно нет гелия – за исключением того, что вы вдыхаете из наполненного гелием шарика, чтобы изменить голос на писклявый. Но гелий химически инертен. Он расположен в крайнем правом столбце Периодической таблицы; это значит, что его внешняя электронная оболочка целиком заполнена, там нет свободных «парковочных мест», куда можно было бы вставить электроны от других атомов, поэтому гелий ни с чем не реагирует. Даже если бы у вас был гелий, вам было бы не на что его применить.

Далее в человеческом организме идет кислород – опять же, его много, так как он присутствует в молекуле воды H_2O. После кислорода идет углерод – основа всей органической химии. Далее идет азот. Если не считать гелия, который ни с чем не реагирует, то в земном человеческом организме наиболее распространены те же элементы, что и в космосе. Если бы мы состояли из какого-то редкого элемента, например из изотопа висмута, то могли бы утверждать, что на этой планете произошло что-то уникальное. Но учитывая, что мы состоим как раз из тех элементов, что наиболее распространены в космосе, приходится смиренно признать, что с химической точки зрения мы ничем не примечательны. С другой стороны, есть нечто поучительное и даже вдохновляющее в осознании, что все мы действительно сотворены из звездного вещества. Как будет рассказано в нескольких следующих главах, кислород, углерод и азот синтезируются в звездах спустя миллиарды лет после Большого взрыва. Мы родились во Вселенной, живем в этой Вселенной, и Вселенная живет внутри нас.

Рассмотрим газовое облако – космическую смесь водорода, гелия и остальных элементов – и обратим внимание на то, что там происходит. В центре атома находится ядро, состоящее из протонов и нейтронов, вокруг ядра вращаются по орбитам электроны. Удобно, пусть и графически неверно, представлять себе простую классическую квантовую модель атома, которую Нильс Бор предложил около 100 лет назад. У такого атома есть основное состояние – такая орбита, на которой электрон обладает наименьшей внутренней энергией; назовем это основное состояние «*энергетический уровень 1*». На следующей возможной орбите электрон будет уже в возбужденном состоянии, это будет *энергетический уровень 2*. Давайте изобразим атом с двумя энергетическими уровнями, чтобы не усложнять картину (рис. 6.1). В атоме есть ядро и облако электронов, находящихся «на орбитах» вокруг ядра. Но эти орбиты не похожи на планетные, о которых мы говорили, обсуждая гравитацию, планеты и Ньютона. Вообще, здесь было бы правильнее говорить не об орбитах, а об *орбиталях*. Они называются *орбиталями*, поскольку похожи на орбиты, но могут принимать самые разные формы. На самом деле, это «вероятностные облака», в разных частях которых с той или иной вероятностью может находиться электрон. Электронные облака. Некоторые из них сферические, другие – продолговатые. Орбитали объединяются в семейства, для одних семейств характерны более высокие энергии, чем для других. Давайте абстрагируемся от этого и поговорим просто об энергетических уровнях, но на самом деле будем рисовать орбитали, занятые электронами,

вращающимися вокруг атомных ядер.

Рис. 6.1. Энергетические уровни в атоме. Показан простой атом с двумя электронными орбиталями, $n = 1$ и $n = 2$. Если электрон переходит со второго энергетического уровня на более низкий первый энергетический уровень, он излучает фотон с энергией $\Delta E = h\nu$, где $\Delta E = E_2 - E_1$ – это разница в энергии между первым и вторым энергетическим уровнем. После того как электрон окажется на первом энергетическом уровне, он может поглотить фотон с энергией $\Delta E = h\nu$ и вновь подняться на энергетический уровень 2.

Предоставлено Майклом Строссом

Ядро – это точка в центре атома. Энергетический уровень $n = 1$ соответствует сферической орбитали, расположенной ближе всего к ядру.

Энергетический уровень $n = 2$ – это сферическая орбиталь, расположенная чуть дальше от ядра. Электрон на энергетическом уровне $n = 2$ уже не так плотно связан с ядром. Электроны и протоны притягиваются; нужна энергия, чтобы отодвинуть электрон от ядра на более отдаленную орбиталь. Энергетический уровень 2 обладает более высокой энергией, чем энергетический уровень 1.

Допустим, есть электрон в основном состоянии, на энергетическом уровне 1. Он не может зависнуть где-нибудь между первым и вторым энергетическими уровнями. Там просто нет места. Это же *квантовый* мир. Плавных изменений там не бывает. Чтобы электрон мог перескочить на следующий уровень, ему необходимо сообщить энергию. Он должен каким-то образом поглотить энергию, и в данном случае отличным источником энергии был бы фотон. Фотон попадает в электрон, но электрону подойдет не любой фотон, а только такой, энергия которого равна энергетической разнице между двумя уровнями. Заметив такой фотон, электрон проглатывает его и перескакивает на энергетический уровень 2. Если в фотоне чуть больше или чуть меньше энергии, электрон его просто пропустит. Еще отмечу, что атомам, в отличие от людей, не нравится пребывать в возбужденном состоянии. Спустя достаточное время электрон с энергетического уровня 2 спонтанно спустится на более низкий энергетический уровень 1 (как показано прямой стрелкой на рис. 6.1).

Бывает, что достаточное время – это миллионная доля секунды. Электрон недолго пребывает в возбужденном состоянии, будучи в атоме. Итак, что должно произойти, когда электрон опускается на более низкий энергетический уровень? Он должен испустить фотон – новый, но с той же энергией, которую принял с предыдущим фотоном. При переходе на более высокий энергетический уровень фотон поглощается. При переходе на более низкий энергетический уровень фотон излучается, как показано волнистой стрелкой на рис. 6.1. Согласно знаменитому уравнению Эйнштейна, энергия E этого фотона равна $h\nu$, где h – постоянная Планка, а ν – частота фотона. Энергия излученного фотона в точности равна разнице между двумя энергетическими уровнями ΔE.(Заглавная греческая буква «дельта», Δ, часто используется для обозначения разницы или изменения величины). В результате получаем тождество $\Delta E = h\nu$, позволяющее вычислить частоту того фотона, который был излучен электроном, когда тот опустился со второго на первый энергетический уровень.

Вы когда-нибудь играли с фосфоресцирующими фрисби? Чтобы они светились в темноте, их сначала нужно подержать на свету. Например, подвесить перед лампочкой. Что при этом происходит? Электроны в атомах

и молекулах игрушки переходят на более высокие энергетические уровни (в таких сравнительно больших атомах много энергетических уровней) и поглощают фотоны света. Создатели игрушки подобрали такой материал, в котором эти электроны каскадируют не сразу, а постепенно, излучая при этом видимый свет. Конечно, такой процесс продолжается не вечно. Свечение прекращается после того, как все электроны вернутся в исходное состояние. Фосфоресцирующие фрисби и светящиеся костюмы скелетов, которые так нравятся детям, светятся благодаря одному и тому же принципу.

Энергия, поглощаемая электроном, может поступить от фотона, но бывают и другие источники энергии. Возможно, пролетающий мимо атом ударит по электрону, и электрон в результате такого воздействия будет заброшен на более высокий энергетический уровень. В данном случае переход осуществляется за счет кинетической энергии. Как подобный механизм работает в облаке газообразного водорода? Во-первых, нужно выяснить, а какова температура этого водородного облака? Температура в кельвинах пропорциональна средней кинетической энергии молекул или атомов в облаке. Переносное движение облака не влияет на эти измерения. Естественно, кинетическая энергия – это энергия движения, поэтому чем выше температура, тем быстрее эти частицы носятся взад-вперед. Если бы я был электроном в основном состоянии и мне дали под зад, то я мог бы проверить энергию этого пинка. Если бы такого пинка хватило, чтобы я пролетел лишь часть пути до второго энергетического уровня, то я остался бы на месте. Но если энергия пинка именно такая, какая нужна для перехода на второй энергетический уровень, то я приму эту энергию, поглощу ее и перейду на второй уровень.

При достаточной температуре можно обеспечить, чтобы вся совокупность атомов и некоторая доля их электронов находились в сравнительно высоком состоянии. Можно поддерживать такое равновесие, так, чтобы любой упавший электрон сразу выталкивался на уровень выше. Примерно так действует жонглер, удерживающий несколько мячиков в воздухе. Все это – функция температуры. При низких температурах абсолютное большинство электронов остается на энергетическом уровне $n = 1$ и лишь немногие электроны – на энергетическом уровне $n = 2$. По мере повышения температуры все больше электронов выталкивается на энергетический уровень $n = 2$.

Резюме. Допустим, межзвездное газовое облако подсвечивается сиянием звезды, температура которой составляет 10 000 К. У большинства атомов – множество очень сложных энергетических уровней, таково

устройство природы; энергетические уровни водорода при этом сравнительно просты. Эта разнородная смесь совершенно искажает чистый тепловой спектр, излучаемый звездой с температурой 10 000 К. Посмотрим, какой же хаос получается.

Во-первых, рассмотрим полноценный атом водорода. В нем – бесконечное количество энергетических уровней, соответствующих концентрическим орбиталям, расположенным все дальше и дальше от ядра: $n = 1$ (основное состояние; ближайшая к ядру орбиталь), $n = 2$ (первый уровень возбуждения), $n = 3$, $n = 4$, $n = 5$, $n = 6$ … $n = \infty$. Схема энергетических уровней напоминает лестницу, поэтому называется «*лестничная диаграмма*». Нижние энергетические уровни, расположенные на которых электроны теснее связаны с ядром, на диаграмме также располагаются внизу (рис. 6.2).

Первое возбужденное состояние водорода – $n = 2$, на три четверти пути вверх, за ним следует $n = 3$, затем $n = 4$, $n = 5$ и так далее. Электрон с высоким n занимает очень высокую орбиталь и имеет очень слабую связь с протоном. На самом верху диаграммы энергия связи электрона равна нулю. Энергия в атомах измеряется в *электрон-вольтах*, эВ. Это энергия, требуемая электрону, чтобы преодолеть разность потенциалов в 1 вольт. Допустим, у вас есть фонарик, работающий от девятивольтной батарейки. Каждый электрон, проходя по проводам в фонарике, генерирует 9 эВ энергии в виде света и теплоты. По проводам фонарика может проходить $6{,}24 \times 10^{18}$ электронов в секунду, при этом будет генерироваться энергия в $9 \times (6{,}24 \times 10^{18})$ эВ (или 9 ватт) световой и тепловой энергии в секунду. Следовательно, один электрон-вольт – очень малая энергия; просто такими единицами удобно оперировать, когда речь идет о небольших порциях энергии, обмен которыми происходит при электронных переходах. Например, –13,6 эВ на рисунке соответствует энергетическому уровню $n = 1$. Эта энергия показана как отрицательная. Чтобы вывести этот электрон из атома, ему нужно сообщить энергию 13,6 эВ. Говорят, что 13,6 эВ – это *энергия связывания* для основного состояния электрона $n = 1$. Что будет, если электрон в основном состоянии заметит фотон с энергией более 13,6 эВ? Он сможет поглотить этот фотон? Вот фотон с таким количеством энергии, что электрону с ним делать? Если электрон поглотит такой фотон, то ему хватит энергии, чтобы заскочить выше $n = \infty$. Что выше $n = \infty$? Свобода. Если электрон выскочит туда на уровень энергии выше нуля, то покинет атом и расстанется со своим протоном. В таком случае мы *ионизируем* атом – оторвем у него электрон.

Рис. 6.2. Схема энергетических уровней водорода. Горизонтальными линиями обозначены различные энергетические уровни в атоме водорода в электрон-вольтах (эВ). Стрелками обозначены переходы электрона, при которых он может перескочить с одного энергетического уровня на другой, излучая фотон, энергия которого равна разности потенциалов между этими уровнями. Показаны переходы на первый энергетический уровень (серия Лаймана, где излучаются фотоны в ультрафиолетовой части спектра), на второй энергетический уровень (серия Бальмера, где излучаются фотоны

видимого света) и на третий уровень (серия Пашена, ближний инфракрасный диапазон). На схеме показано, как электроны спускаются между энергетическими уровнями и излучают фотоны. Если электрон был на энергетическом уровне $n = 3$ и опустился на энергетический уровень $n = 2$, то он испустит фотон H_α (серия Бальмера) с энергией 1,9 эВ.

Предоставлено Майклом Строссом

(Теперь у атома появился заряд, и это уже не атом, а *ион*.) Энергия ускользнувшего электрона выше нуля; она преобразуется в кинетическую энергию движения, при помощи которой электрон вырывается из атома. Как вы, возможно, уже догадались, атом может ионизироваться и в том случае, если в него врежется другой атом.

Теперь, имея представление об энергетических уровнях, мы понимаем, как светится звезда, имеющая температуру 10 000 К. При температуре 10 000 К она настолько горяча, что у небольшой, но значительной доли атомов водорода электроны окажутся в первом возбужденном состоянии $n = 2$. Вот почему я выбрал звезду именно с такой температурой – она максимально наглядно иллюстрирует ситуацию, которую я собираюсь описать. Глубоко внутри звезды складывается спектр теплового излучения, красивая кривая Планка. Она пытается проявиться во внешних слоях звезды; этот сплошной тепловой спектр в 10 000 К выдавливает атомы водорода в верхние слои, причем некоторые электроны в этих атомах находятся в первом возбужденном состоянии; это голодные электроны. Можно спросить: сколько энергии у отдельных фотонов в таком тепловом спектре? Энергии многих из этих фотонов соответствуют видимой части спектра, просто так сложилось. И в водороде, разогретом до 10 000 К, есть атомы с голодными электронами, расположеными на энергетическом уровне $n = 2$; эти электроны, как бешеные, глотают подходящие фотоны, а после этого поднимаются на более высокие энергетические уровни.

Но поглощаются не все фотоны, а лишь те, чья длина волны позволяет электрону подняться на строго определенный энергетический уровень. Например, электрон на уровне $n = 2$ (с энергией –3,4 эВ) может поглотить фотон, энергии которого как раз хватает для перехода на уровень $n = 3$ (это энергия –1,5 эВ; см. рис. 6.2). Разница потенциалов между двумя этими энергетическими уровнями составляет 1,9 эВ. Именно столько энергии нужно электрону для перехода со второго на третий энергетический уровень. Такой электрон поглотит фотон с энергией 1,9 эВ. Такой фотон обозначается H_α. Длина его волны составляет 6563 ангстрем, или 656,3

нанометра, а цвет его волны – темно-красный. Фотон изымается из спектра, проталкивая при этом электрон со второго на третий энергетический уровень. Поскольку это происходит сразу с множеством электронов, в планковском спектре возникает провал, соответствующий длине волны 6563 ангстрем; он называется *линией поглощения Н-альфа* (H_α). Фотоны с длиной волны 4861 ангстрем могут поднять электрон со второго на четвертый уровень; возникает другой провал под названием *линия поглощения Н-бета* (H_β). Есть и другие такие линии: *Н-гамма* (H_γ) на 4340 ангстрем, *Н-дельта* (H_δ) на 4102 ангстрем и так далее; фотоны с такими длинами волн изымаются из спектра, поднимая электроны с энергетического уровня $n = 2$ на уровни $n = 5$, $n = 6$,… Получается сплошной спектр, так называемый *спектр поглощения*, в котором выбиты узкие линии на уровне тех фотонов, что поглощаются наиболее активно. Такие глубокие расщелины в спектре именуются *линиями поглощения*. Вся группа этих линий называется серией Бальмера: H_α, H_β, H_γ, H_δ, H_ε, далее H_6, H_7, H_8 (никто не собирается запоминать столько греческих букв). Пространство между этими линиями соответствует различиям в разнице потенциалов на лестничной диаграмме. На рис 6.3 показан спектр звезды с поверхностной температурой 10 000 К. На вставке крупным планом показана коротковолновая часть спектра.

Рис. 6.3. Звездный спектр, в котором показаны линии поглощения серии Бальмера. Спектр звезды A, зафиксированной проектом «Слоановский цифровой обзор неба», содержит линии поглощения водорода из серии Бальмера; они называются H_α, H_β, H_γ и так далее. Линии наиболее густо расположены в районе самых коротких волн; во вставке крупным планом показан спектр, в котором обозначены линии вплоть до H_{10} (после H_ε принято использовать цифры, а не греческие буквы). Есть еще одна линия, связанная с присутствием слегка ионизированного кальция; она обозначена «Ca».

Материал лаборатории Слоановский цифровой обзор неба», предоставлено Майклом Строссом

Если рассмотреть звезду, поверхность которой немного жарче, скажем 15 000 K, то ситуация драматически меняется: при пинке электрон получает такое количество энергии, что вообще улетает из атома водорода. Электроны и протоны летают по отдельности друг от друга, атомы становятся *ионизированными*. В ионизированном водороде нет дискретных энергетических уровней, поэтому он перестает поглощать фотоны из серии Бальмера. Вот почему серия Бальмера четко просматривается в звездах с температурой 10 000 K, но не в более горячих звездах.

До сих пор мы обсуждали лишь водород. Однако свои роли в этом процессе играют и кальций, и углерод, и кислород, и другие элементы. Обращусь к моей любимой аналогии – к дереву. Внешний уровень звезды можно уподобить дереву. Знаете, что летит к этому дереву (из недр звезды)? Ореховая смесь. В недрах звезды установлена пушка, стреляющая в дерево разными орешками (фотонами, имеющими разную частоту), а на дереве живут белки. Моим белкам нравятся желуди (фотоны H_α). Они видят этот шквал орехов, но выбирают из них только желуди; поэтому из звезды вылетает ореховая смесь, но без желудей (тепловое излучение минус фотоны H_α). Допустим, на дереве живут и другие грызуны: бурундуки, которые любят орех-макадамию. Что мы имеем на выходе? Ореховую смесь без желудей и макадамии. Если на дереве будет обитать множество разных грызунов и каждый вид предпочитает конкретный вид орехов, то можно логически догадаться, кто живет на дереве, если изучить, каких орехов не хватает на выходе, то есть какие орехи поедаются на этапе пролета через крону (если знать, кто чем питается).

Именно с такой проблемой мы сталкиваемся в астрофизике. Поскольку мы не можем проникнуть в звезду (там слишком жарко), мы анализируем ее издалека, наблюдая, какой свет изымается из сплошного теплового спектра. Мы рассматриваем этот спектр и спрашиваем: совпадает ли он с линиями водорода? В основном да, но там есть и другие элементы. Идем в лабораторию, исследуем кальций, другие элементы, проверяем, свет с какими частотами они поглощают в лабораторных условиях. Затем проверяем каждый элемент – укладывается ли он в систему спектральных линий данной звезды; ведь каждый элемент оставляет характерные именно для него «отпечатки пальцев». Такие энергетические уровни, лестничные диаграммы, уникальны для каждого элемента и молекулы. (Например, на рис. 6.3 показана линия поглощения, присущая кальцию, дополнительно к линиям поглощения водорода.)

Чтобы пример получился более универсальным, давайте рассмотрим не звезду, а газовое облако в межзвездном пространстве. Это облако из водорода, обладающее сплошным энергетическим спектром благодаря тому, что его освещает расположенная поблизости яркая звезда. Свет звезды попадает в облако и выходит из него с другой стороны, поэтому в облаке складывается спектр поглощения, в котором не хватает некоторых линий. Теперь нужно каким-то образом учесть энергию. Поглощается свет, волны которого имеют такую длину, и электроны поднимаются на более высокие энергетические уровни. Эти электроны также могут падать на

более низкие энергетические уровни, излучая при этом фотоны. Следовательно, между электроном и фотоном возникает краткосрочная связь. Когда электрон возвращается на исходный энергетический уровень, в случайном направлении улетает точно такой фотон, как и тот, который ранее был поглощен этим электроном. Представьте себе, что у белок и бурундуков несварение желудка, и они отрыгивают во все стороны только что проглоченные орехи. Если газовое облако находится в равновесии и среднее количество электронов на втором энергетическом уровне со временем не изменяется, то количество съеденных и отрыгнутых орехов должно быть равным. Если вы стоите на линии огня ореховой пушки (смотрите на звезду вдоль луча зрения), то заметите, как на вас летит густой поток разнообразных орехов, в которых, однако, нет желудей и макадамии. Однако если бы вы стояли в произвольной точке и смотрели на дерево, а не на линию огня (то есть располагались относительно звезды не вдоль луча зрения), то увидели бы, как с дерева вылетают желуди и макадамия. Это были бы яркие *линии эмиссионного спектра* как раз на тех длинах волн, которые в предыдущем примере поглощались. Из этого следует вывод, что на дереве живут белки и бурундуки. Аналогично, по линиям эмиссионного спектра, выходящим из газового облака, можно отчасти узнать, из каких элементов оно состоит. На рис. 6.4 показан снимок туманности Розетка – видно, что эта туманность красная. Газ лучится светом на эмиссионной линии водорода-альфа (H_α) с длиной волны 6563 ангстрем. Итак, в этом облаке содержится водород. Астрономы получают превосходные снимки таких эмиссионных туманностей, как Розетка, используя фильтр, пропускающий свет только с длиной волны H_α. Такой фильтр практически полностью блокирует засветку – свет, возникающий в результате рассеяния в земной атмосфере. Свет молодых и ярких голубых звезд, расположенных в центре туманности Розетка (они хорошо заметны на рисунке), закидывает атомы водорода на энергетический уровень $n = 3$, и при падении обратно на уровень $n = 2$ они во всех направлениях излучают фотоны с длиной волны H_α. Поэтому туманность сияет красным светом H_α. По тому же принципу некоторые неоновые рекламы сияют оранжевым.

Рис. 6.4. Туманность Розетка – газовое облако, в котором образуются звезды. Красный цвет обусловлен излучением водорода, в частности, переходом с $n = 3$ на $n = 2$ (H_α). Предоставлено Робертом Дж. Вандербеем

Мы обсуждаем совокупность переходов водорода H_α, H_β, H_γ, H_δ, так называемую *серию Бальмера*. Эта серия переходов была открыта в 1885 году и названа в честь исследовавшего их Иоганна Якоба Бальмера. Неважно, в какую сторону нарисовать острие стрелки на схеме энергетических уровней, – речь идет об одном и том же фотоне, входящем или исходящем. Он может быть поглощен (вверх) или излучен (вниз), но у всех переходов в серии Бальмера первое возбужденное состояние

(основание) – это $n = 2$, и соответствующие фотоны относятся к видимой части спектра (см. рис. 6.2 – там показана эмиссия фотонов при переходе электронов на нижние энергетические уровни). Именно потому, что эти фотоны находятся в видимой части спектра, серия Бальмера была открыта раньше других. Но есть еще две подобные серии. Одна из них называется *серией Пашена*, ее основное состояние – $n = 3$. В ней масштаб энергетических переходов меньше, поэтому энергия у всех фотонов этой серии ниже, чем у фотонов видимого спектра (см. рис. 6.2). Серия Пашена целиком относится к инфракрасному спектру. После того как появились хорошие детекторы для надежного измерения инфракрасного излучения, обнаружилась и серия Пашена. Следует учитывать, что есть и другие подобные семейства, но я упомяну всего три серии: Пашена, Бальмера и еще одну, *серию Лаймана* (как и выше, в соответствии с греческой номенклатурой выделяются Лайман-альфа, Лайман-бета и так далее). Основное состояние этой серии – $n = 1$, все эти переходы относятся к ультрафиолетовому спектру. Самый низкоэнергетический переход в серии Лаймана обладает большей энергией, чем самый высокоэнергетический в серии Бальмера (вновь отсылаю вас к рис. 6.2).

Соответственно когда мы рассматриваем такие переходы, серия Бальмера обособлена от остальных серий, серия Лаймана обособлена от остальных и серия Пашена также обособлена от остальных, поэтому их легко изолировать и понять. Я мог бы нарисовать атом, в котором все было бы не так просто. Я мог бы «сконструировать» атом – в мире немало странных атомов, – в котором энергетические переходы и три серии, Лаймана, Бальмера и Пашена, были бы похожи, три эти семейства в спектре перекрывались бы. Размышляя об этих линиях и о том, как определять их для еще не открытых элементов, возможность существования такого атома нельзя сбрасывать со счетов.

На протяжении нескольких тысяч лет мы могли измерить лишь яркость звезды, ее положение в небе и, может быть, отметить ее цвет. Такова была классическая астрономия. Она превратилась в современную астрофизику, когда мы начали определять звездные спектры, ведь спектры позволяют понять химический состав звезд, а точная интерпретация спектра возможна благодаря квантовой механике. Я хотел бы подчеркнуть, насколько это важно. Мы не понимали спектров до того, как была разработана квантовая механика. Планк ввел свою постоянную в 1900 году, а в 1913 году Бор предложил свою модель атома водорода, положение электронов и орбиталей в которой было объяснено при помощи квантовой механики. Это позволило объяснить серию Бальмера. На самом деле,

современная астрофизика началась только после этого события, в 1920-е годы. Подумайте, насколько недавно это было. Сегодня еще живы старики, родившиеся на заре существования астрофизики. Тысячелетиями люди, в сущности, не имели никакого понятия о звездах, но за срок всего одной человеческой жизни мы исследовали звезды достаточно хорошо. У меня есть книга по астрономии, вышедшая в 1900 году, и материал в ней изложен на уровне «вот созвездие», «вот красивая звезда», «там много звезд», «а здесь звезд меньше». Там есть целая глава о фазах Луны, глава о солнечных затмениях – вот и все, о чем могли рассуждать астрономы. Однако в научных книгах, написанных после 1920-х годов, уже идет речь о химическом составе Солнца, источниках ядерной энергии, судьбе Вселенной. В 1926 году Эдвин Хаббл открыл, что Вселенная обширнее, чем кто-либо мог подумать, – ведь он обнаружил, что другие галактики находятся гораздо дальше, чем звезды нашего Млечного Пути. В 1929 году он же открыл, что Вселенная расширяется. Эти эпохальные открытия произошли при жизни людей, некоторые из которых живы еще сегодня. Потрясающе. Иногда я задаюсь вопросом: а какие революции ждут нас в следующие несколько десятилетий? Свидетелями каких космологических открытий окажетесь вы – и сможете рассказать о них своим потомкам?

Учитывая такие уроки истории, просто старайтесь не делать таких идиотских прогнозов, как французский философ Огюст Конт, который в своей книге «Положительная философия», вышедшей в 1842 году, заявил о звездах следующее: «Мы никогда не сможем определить ни их химический состав, ни, в случае некоторых из них, как теплота поглощается их атмосферой».

Глава 7
Жизнь и смерть звезд (I)

Автор: Нил Деграсс Тайсон

Два астронома, работавших независимо друг от друга, Генри Норрис Расселл и Эйнар Герцшпрунг, решили схематически расположить все звезды так, чтобы диаграмма позволяла соотнести их светимость и цвет (рис. 7.1). Неудивительно, что эта схема называется «*диаграмма Герцшпрунга – Рассела*». Можно количественно выразить цвет звезд, если знать их спектры. Сегодня известно (а Герцшпрунг и Расселл знали это и в свое время), что цвет позволяет измерить температуру (по функции Планка). По оси ординат на диаграмме Герцшпрунга – Рассела откладывается светимость, а по оси абсцисс – цвет или температура. Самые горячие звезды (голубые) расположены слева, а наиболее прохладные (красные) – справа.

Генри Норрис Расселл был деканом факультета астрофизики в Принстонском университете. Многие считают его первым американским астрофизиком. В его раннем варианте диаграммы температура звезд возрастала справа налево, мы придерживаемся такой же традиции и сегодня. Он располагал данными по тысячам и тысячам звезд. Эту информацию собрали прежде всего сотрудницы обсерватории Гарвардского колледжа. Они занимались работой, считавшейся слишком непрестижной для мужчин, – классифицировали спектры всех этих звезд. Это были времена, когда словом «компьютер» называли людей-вычислителей. Люди были компьютерами. Были такие большие залы, в которых сидели эти женщины. В начале XX века у женщин не было ученых степеней, и они попросту не могли рассчитывать на работу, которая считалась желанной для мужчин. Но в таких вычислительных залах попадались умные и мотивированные женщины, которые, занимаясь анализом этих спектров, чисто логически обнаружили важные свойства Вселенной, о которых мы поговорим в следующих главах. Среди этих женщин была Генриетта Ливитт. Сесилия Пейн также проработала в Гарварде около десяти лет ассистентом Харлоу Шепли, занимаясь исследованием звездных спектров, пока, наконец, не получила профессорскую должность. Она была одной из тех, кому удалось открыть, что Солнце состоит в основном из водорода. Удивительная история, и вклад женщин в развитие астрономии

действительно очень интересен.

Рис. 7.1. Звездная диаграмма Герцшпрунга – Расселла. Светимость звезд показана в зависимости от температуры их поверхности. Обратите внимание: по традиции, поверхностная температура на этой диаграмме уменьшается слева направо. Сравнительно прохладные звезды красные, а самые горячие – голубые, как показано здесь. Звезды, расположенные вдоль конкретной диагональной линии, имеют примерно одинаковый радиус. Иллюстрация сделана по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J.

Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Вооружившись каталогами звезд с данными об их светимости и температуре, Герцшпрунг и Расселл принялись заполнять диаграмму. Они обнаружили, что звезды располагаются на схеме не в произвольном порядке. В некоторых областях звезд не было – на диаграмме заметны пустые места, – но по диагонали, прямо в центре диаграммы, вырисовывался яркий звездный пояс. Астрономы назвали его «*главная последовательность*» – как принято в этой науке, выбрали максимально простое наименование.

Девяносто процентов каталогизированных звезд оказались в этой зоне. Россыпь звезд видна в правом верхнем углу. Эти звезды относительно холодные, но обладают огромной светимостью. Если их температура невелика, какого цвета они должны быть? Красного. Что можно сказать о красной звезде с очень большой светимостью? Наверняка? Звезда должна быть колоссальной. Действительно, это очень большие красные звезды. Они называются *красными гигантами*. Благодаря функции Планка мы знаем, что эти звезды должны быть красными и большими. Подобная дедукция – мой хлеб с маслом. Еще правее и выше расположены *красные сверхгиганты*. Теперь мы можем перейти на новое астрономическое поприще и проанализировать всю эту ситуацию при помощи одной лишь прикладной физики. На самом деле, пользуясь *законом Стефана – Больцмана* и радиусом звезды r (получается формула $L = 4\pi r^2 T^4$), можно начертить на диаграмме диагональные линии, вдоль которых будут располагаться звезды с фиксированным диаметром: 0,01 солнечного, 0,1 солнечного, 1 солнечный, 10 солнечных, 100 солнечных. Теперь мы знаем, каковы размеры этих звезд. Естественно, Солнце находится на линии «один солнечный диаметр». Диаметр красных сверхгигантов более чем в 100 раз превышает солнечный. Под главной последовательностью находим еще одну группу звезд. Они жаркие, но не слишком; это белые звезды. Они обладают крайне низкой светимостью, то есть должны быть мелкими. Они называются *белыми карликами*.

Когда диаграмма Герцшпрунга – Расселла была опубликована впервые, мы не знали, почему звезды группируются именно таким образом. Может быть, звезда рождается с очень высокой светимостью и со временем угасает, пока не становится тусклой и холодной. Может быть, жизненный цикл звезды направлен вниз вдоль главной последовательности (звезда одновременно стареет и теряет светимость). Логичная версия, но, исходя из нее, возраст Солнца был оценен в триллион лет, что гораздо больше

возраста Земли. На протяжении десятилетий для ответа на этот вопрос выдвигались те или иные обоснованные догадки, пока не удалось выяснить, что же происходит на самом деле. Первый шаг к ответу был сделан, когда ученые присмотрелись к различным небесным объектам (рис. 7.2 и 7.3).

На этих картинках показаны множества звезд, именуемые астрономами *звездными скоплениями*. В некоторых скоплениях сотни звезд, в других – сотни тысяч. Если в скоплении всего несколько сотен звезд (как в Плеядах, см. рис. 7.2), то оно называется *рассеянным*; если в скоплении сотни тысяч звезд, то оно обычно приобретает шарообразную форму, как M13 (см. рис. 7.3) и называется *шаровым*.

В шаровых скоплениях насчитываются сотни тысяч звезд, а в рассеянных – до тысячи. Когда рассматриваешь подобные объекты в небе, сразу понятно, скопление какого типа перед тобой. Споров нет, так как нет промежуточных вариантов: либо там небольшое количество звезд, либо целая куча. У всех звезд в конкретном скоплении один и тот же день рождения – они одновременно образовались из газового облака.

Рис. 7.2. Рассеянное звездное скопление Плеяды. Это молодое

скопление (вероятно, ему менее 100 миллионов лет). Предоставлено Робертом Дж. Вандербеем

Рис. 7.3. Шаровое звездное скопление M13. Иллюстрация сделана по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Плеяды – молодое звездное скопление. Оно напоминает детсадовскую группу. Там повсюду молодые яркие голубые звезды. Но на диаграмме Герцшпрунга – Расселла это скопление равномерно представлено во всей главной последовательности, и в нем нет красных гигантов. Голубые звезды в верхней части главной последовательности настолько яркие, что именно они задают тон всей последовательности, но красные звезды, расположенные на главной последовательности ниже, там также присутствуют. Плеяды выглядят именно так, как должно выглядеть звездное скопление вскоре после рождения. Плеяды демонстрируют, что некоторые звезды при рождении обладают высокой температурой и высокой светимостью, а другие звезды рождаются холодными и тусклыми

– просто именно в таком виде они и рождаются, – поэтому скопление распределено по всей главной последовательности.

В шаровых звездных скоплениях, таких как M13, представлена главная последовательность без верхнего конца плюс несколько красных гигантов, не входящих в главную последовательность. Фотография M13 напоминает день встречи выпускников в честь пятидесятой годовщины окончания колледжа – все звезды там старые. Самые яркие звезды, выделяющиеся на фоне общей картины, – красные гиганты. В главной последовательности скопления M13 все еще есть сравнительно холодные и тусклые объекты, но куда девались яркие голубые? Сошли со сцены? Что произошло? Вероятно, вы догадываетесь: они просто «превратились» в красные гиганты. Верхняя часть главной последовательности отсеялась, и голубые звезды с максимальной светимостью стали красными гигантами.

Также встречаются «средневозрастные» скопления, где исчезла лишь часть главной последовательности и появилось всего несколько красных гигантов.

Определить массы звезд различных типов – хитрое дело. Мы измеряли доплеровское смещение спектральных линий в системах двойных звезд, вращающихся друг вокруг друга, и применяли ньютоновский закон тяготения. Такой опыт показал, что главная последовательность – это еще и последовательность масс, которая начинается с тяжелых ярких голубых звезд в верхней левой части и заканчивается легкими тусклыми красными звездами в правой нижней части. Легкие звезды рождаются сравнительно тусклыми и прохладными, а массивные при рождении обладают высокой светимостью и температурой.

Массивные голубые звезды из верхней части главной последовательности живут примерно по 10 миллионов лет. Это не так много. Примерно в середине главной последовательности находятся такие звезды, как Солнце. Они живут по 10 миллиардов лет, то есть в 1000 раз дольше. Продолжая путь по главной последовательности вниз и вправо, добираемся до тусклых красных звезд, живущих триллионы лет. Девяносто процентов звезд относится к главной последовательности. Почему? Оказывается, на протяжении 90 % своего жизненного цикла звезда обладает такой температурой и светимостью, при которых мы относим ее к главной последовательности. Приведу аналогию: я практически уверен, что каждый вечер вы идете в ванную и чистите зубы. Но если я буду фотографировать вас в течение дня, то вряд ли застану вас за этим делом, поскольку пусть вы и чистите зубы ежедневно, но тратите на это совсем немного времени. Выяснилось, что некоторые области диаграммы

Герцшпрунга – Расселла малонаселены, так как звезды «проскакивают» эти зоны в процессе изменения светимости и температуры, но проскакивают очень быстро. Очень редко удается застать звезду за чисткой зубов.

Что происходит глубоко в недрах звезд? Мы уже знаем, что при повышении температуры частицы движутся все быстрее и быстрее. Мы также знаем, что 90 % атомных ядер во Вселенной – это водород, такова же и доля водорода в звездах. Возьмем газовый пузырь, на 90 % состоящий из водорода, – это еще не звезда. Сожмем его и сделаем звезду. Как легко догадаться, самая жаркая часть звезды будет в центре. Если сжать что угодно, оно разогревается. В недрах звезд достаточно жарко (мы в этом убедимся), чтобы там разгорались ядерные печи и температура не падала. На поверхности звезды температура гораздо меньше. В недрах звезд так жарко, что все электроны там оторваны от атомов, вместо атомов остаются голые ядра.

В ядре водорода один протон. Когда к нему приближается другой протон, две эти частицы отталкиваются. Протон имеет положительный заряд, а одинаковые заряды отталкиваются с силой $1/r^2$. Чем ближе они сходятся, тем сильнее отталкиваются. Но давайте еще повысим температуру. Чем выше температура, тем больше средняя кинетическая энергия и тем выше скорость протонов. Высокие скорости позволяют протонам подлетать все ближе друг к другу, прежде чем электростатические силы оттолкнут их. Оказывается, существует «волшебная» температура – около 10 миллионов кельвинов, – при которой протонам удается сближаться настолько, что в игру вступает совершенно новое короткодействующее сильное ядерное взаимодействие, притягивающее и связывающее друг с другом эти протоны; я упоминал об этом взаимодействии в главе 1. Такая ядерная сила притяжения еще 100 лет назад была неизвестна, она должна быть достаточно мощной, чтобы преодолеть естественное электростатическое отталкивание протонов. Как же еще ее назвать, если не *сильным ядерным взаимодействием*? Именно эта сила обеспечивает так называемый *термоядерный синтез* (кроме того, сильное ядерное взаимодействие удерживает от распада сравнительно крупные ядра. В ядре гелия – два протона и два нейтрона. Два протона отталкиваются под влиянием электростатических сил, но именно сильное ядерное взаимодействие удерживает их в ядре. Аналогичные ситуации складываются с ядрами углерода [шесть протонов и шесть нейтронов] и ядрами кислорода [восемь протонов и восемь нейтронов]).

Когда два протона слипаются вместе при температуре 10 миллионов кельвинов, происходит достаточно забавная реакция. Получаются

сцепленные воедино протон и нейтрон – один из протонов спонтанно превращается в нейтрон, – и при этом извергается положительно заряженная частица, напоминающая электрон, – она называется *позитроном*. Эта частица состоит из антивещества, очень экзотической материи. Позитрон весит столько же, сколько и электрон, но стоит ему столкнуться с электроном – и обе частицы аннигилируют. Масса этих частиц преобразуется в энергию, которая уносится в виде двух фотонов. Данное явление полностью согласуется с эйнштейновским уравнением $E = mc^2$, описывающим взаимосвязь массы с энергией, об этом Рич гораздо подробнее расскажет в главе 18. Также при описанной реакции извергается электронное *нейтрино*, нейтральная частица (с нулевым зарядом). Нейтрино настолько слабо взаимодействуют с остальной материей во Вселенной, что просто улетают с Солнца. Обратите внимание на сохранение заряда в этой реакции. Мы начали с двух положительных зарядов (по одному у каждого протона) и на выходе также получили два положительных заряда (один – у протона, один – у позитрона). При реакции выделяется энергия, так как сумма масс исходных частиц больше, чем сумма масс конечных. Масса теряется и преобразуется в энергию по формуле $E = mc^2$. Как называется ядро с одним протоном и одним нейтроном? Если в нем один протон – значит, это водород, но в данном случае – тяжелый водород. Выражение «тяжелый водород» употребляется часто, но у такого атома есть и собственное название: *дейтерий*.

Итак, у меня есть дейтерий. Если дейтерий сольется с еще одним протоном, то получится ядро ppn (с двумя протонами и одним нейтроном) плюс выделится еще энергия. Что у меня получилось? В ядре два протона, а когда в ядре два протона – это гелий. Слово «*гелий*» происходит от Гелиоса, древнегреческого бога Солнца. Гелий – это элемент, названный в честь Солнца. Дело в том, что открыли его на Солнце благодаря спектральному анализу и лишь впоследствии обнаружили на Земле. Ядро ppn легче обычного гелия и называется *гелий-3*, поскольку в нем три элементарные частицы (два протона и один нейтрон). Теперь сплавим два ядра гелия-3: ppn + ppn = ppnn + p + p + энергия. Получившееся в результате ядро ppnn – это полноценный обычный гелий (тот самый, которым наполняют гелиевые шары).

Все это происходит при температуре 15 миллионов кельвинов в центре Солнца, каждую секунду 4 миллиона тонн материи там превращаются в энергию. Мы осознали, что звезды из главной последовательности преобразуют водород в гелий. В конце концов весь водород в ядре звезды

будет израсходован, и после этого начинается хаос: звездная оболочка расширяется, и звезда превращается в красный гигант. Примерно через 5 миллиардов лет Солнце станет красным гигантом, отбросит свою газовую оболочку и постепенно превратится в белый карлик. Более массивные звезды превратятся в красные гиганты, а затем – в красные сверхгиганты. Они могут взорваться как сверхновые, и на месте их ядер останутся нейтронные звезды или черные дыры. Мы вернемся к этой теме в главе 8.

Пока давайте вновь поговорим о диаграмме Герцшпрунга – Расселла. На ней есть главная последовательность, красные гиганты и белые карлики, причем температура звезд увеличивается справа налево, а светимость – снизу вверх. Спектральные классы звезд имеют буквенные обозначения. Некоторые из них сохранились со времен старой классификации, когда спектральные классы именовались в алфавитном порядке, но, как бы то ни было, система по-прежнему в ходу: OBAFGKMLTY. Каждая буква обозначает класс звезд с определенной температурой поверхности; Солнце относится к спектральному классу G. Приблизительные поверхностные температуры и цвета звезд таковы:

O (> 33 000 K, голубые)
B (10 000–33 000 K, бело-голубые)
A (7500–10 000 K, белые или бело-голубые)
F (6000–7500 K, белые)
G (5200–6000 K, желтые)
K (3700–5200 K, оранжевые) и
M (2000–3700 K, красные),

все они есть на рис. 7.1. Еще правее, за пределами нашей диаграммы, будут звезды остальных классов: L (1300–2000 K, красные), T (700–1300 K, красные) и Y (< 700 K, инфракрасные). Если обратить внимание на шкалу температур в нижней части рисунка, то понятно, какие звезды к каким классам относятся. Спика – звезда класса B, Сириус – звезда класса A, Процион – звезда класса F, а Глизе 581 – звезда класса M. Каждая звезда занимает на диаграмме определенную позицию как по горизонтали, соответствующую ее температуре (чем левее – тем жарче), так и по горизонтали, в зависимости от светимости (чем выше – тем ярче). Естественно, Солнце обладает ровно одной солнечной светимостью по определению. Это хорошо заметно, если обратить внимание на светимость Солнца по вертикали. На этой диаграмме используется логарифмическая шкала, на которую можно нанести огромный диапазон наблюдаемых

значений светимости. Каждое деление соответствует возрастанию светимости в 10 раз.

По верхнему краю на рис. 7.1 расположены звезды, светимость которых в миллион раз превышает солнечную. По нижнему краю находятся звезды со светимостью в 1/100 000 от солнечной. Разброс светимости звезд в пределах главной последовательности просто ошеломляет. Оказывается, что звезды в верхнем конце главной последовательности всего в 60 раз превосходят Солнце по массе, но не в миллион раз. В нижней части главной последовательности находятся звезды вдесятеро легче Солнца, но, как я уже говорил, они гораздо, гораздо тусклее Солнца. Итак, диапазон масс велик, однако он не идет ни в какое сравнение с диапазоном светимости. На самом деле, можно описать формальное отношение, характеризующее, как светимость звезды в главной последовательности зависит от ее массы, но эта зависимость нелинейна: светимость пропорциональна массе, возведенной в степень 3,5. Таким образом, две звезды, масса которых слегка отличается, могут обладать очень разной светимостью.

А теперь – классные расчеты. Начнем с $E = mc^2$. Эту формулу помнят все. Все знают, что ее придумал Эйнштейн, но немногие понимают ее смысл. Дедушка Альберт вывел ее в 1905 году. Как мы уже обсуждали, это уравнение означает следующее: некоторую массу можно преобразовать в энергию согласно такому отношению, где c соответствует колоссальной скорости света, а если ее возвести в квадрат – получается очень большая величина. Именно эта формула описывает мощь, заключенную в атомных бомбах. О происхождении этого уравнения и о Специальной теории относительности Эйнштейна речь пойдет в главе 18.

Если звезда обладает определенной массой и определенной светимостью – сколько она просуществует? Разумеется, то же самое можно спросить и о вашей машине с бензиновым двигателем: вы знаете, какова полная емкость бака, знаете, каков расход топлива на километр в литрах. Зная эти данные, можно предположить, как скоро в машине кончится бензин. Светимость звезды характеризует то, сколько энергии она излучает в единицу времени. Если умножить срок жизни звезды t на ее светимость L, то можно вычислить общее количество энергии, которую она сгенерирует в течение жизни, – tL. Нам известна светимость звезды, темпы расхода ее топлива, а также мы знаем, каковы запасы ее топлива (водорода). Таким образом, какова продолжительность жизни звезды на главной последовательности? Общая энергия, которую может выделить звезда в ходе термоядерного водородного синтеза, пропорциональна ее массе M.

Как вы помните, $E = mc^2$. Общая энергия, излучаемая звездой, пропорциональна M, а также пропорциональна tL, поэтому M пропорциональна tL. Соответственно t пропорциональна M/L. Если L пропорциональна $M^{3,5}$, как я говорил выше, то t пропорциональна $M/M^{3,5}$, либо, что то же самое, пропорциональна $1/M^{2,5}$. Чем массивнее звезда, тем меньше она просуществует!

Посмотрим, что это значит. Если срок жизни звезды пропорционален $1/M^{2,5}$, то звезда, которая вчетверо тяжелее Солнца, просуществует $1/4^{2,5}$ солнечного века. Число $1/4^{2,5}$ равно: один разделить на четыре в квадрате, умножить на квадратный корень из четырех. Квадратный корень из четырех равен двум, а четыре в квадрате равно 16. Соответственно срок жизни такой звезды, которая вчетверо тяжелее Солнца, составит 1/32 от солнечного. Солнце проведет в главной последовательности около 10 миллиардов лет. Соответственно звезда вчетверо тяжелее Солнца проведет в главной последовательности лишь 1/32 этого срока, или примерно 300 миллионов лет. Это недолго.

Другой пример: $1/40^{2,5}$ – это примерно 1/10 000, поэтому звезда, которая в 40 раз тяжелее Солнца, просуществует всего около миллиона лет – крошечный срок по сравнению с миллиардами лет. Теперь сделаем шаг в противоположную сторону. Рассмотрим звезду, масса которой равна 1/10 солнечной. Один разделить на 1/10 равно 10, а 10 в степени 2,5 – это примерно 300. Такая звезда просуществует в 300 раз дольше Солнца. Сколько будет – 10 миллиардов умножить на 300? Получится 3000 миллиардов, или 3 триллиона, лет – это гораздо больше нынешнего возраста Вселенной. Такая звезда будет жечь свое топливо очень экономно. Звезда в 10 раз тяжелее Солнца проживет в 300 раз меньше Солнца, звезда в 10 раз легче Солнца – в 300 раз дольше Солнца.

Гелий синтезируется из водорода в звездах главной последовательности. В ядрах красных гигантов образуются другие элементы. Термоядерный синтез там идет активнее, и формируются такие элементы, как углерод, кислород и другие элементы таблицы Менделеева вплоть до железа (в атоме которого 26 протонов и 30 нейтронов). Девяносто процентов своего жизненного цикла звезда проводит на главной последовательности, после чего превращается в красный гигант и начинает выплавлять эти дополнительные элементы. Последний этап протекает быстро, он занимает каких-то 10 % жизненного цикла звезды. Всякий раз при слиянии легких элементов (легче железа, № 26 в таблице Менделеева) с образованием более тяжелых теряется масса, реакция термоядерного

синтеза продолжается в соответствии с формулой $E = mc^2$, при этом выделяется энергия. Такой процесс термоядерного синтеза называется *экзотермическим* именно потому, что выделяется энергия. Но известны и другие ядерные реакции, протекающие с выделением энергии. Возьмем, например, уран (№ 92), расщепим его ядро – и тоже получим экзотермическую реакцию. Она была осуществлена во Вторую мировую войну, когда на Хиросиму сбросили урановую бомбу. На Нагасаки сбросили бомбу с плутонием (это элемент № 94). Эти элементы имеют огромное ядро и нестабильные *изотопы* – атомы с одинаковым количеством протонов, но разным количеством нейтронов. Если расщепить изотопы, чтобы из них образовались более легкие элементы, при этом выделяется энергия. Такая реакция также экзотермическая, она называется *делением ядра*. Большая часть мирового ядерного арсенала, накопленного за годы холодной войны, – это ядерные заряды, при взрыве которых происходило бы деление ядра. В наше время основная ядерная мощь приходится на такие бомбы, при взрыве которых начнется термоядерный синтез гелия из водорода. Для того чтобы вы могли соотнести мощь таких бомб, отмечу: обычная ядерная бомба используется в термоядерной в качестве инициирующего заряда, – то есть термоядерные бомбы сулят поистине тотальное уничтожение. Известно, насколько эффективно материя в них преобразуется в энергию, ведь именно такой процесс обеспечивает горение звезд. Солнце – это огромная термоядерная бомба, с той оговоркой, что вся его умопомрачительная энергия связана массой, давящей на солнечное ядро. Нам пока не удается сконструировать термоядерную электростанцию. Все атомные электростанции в США, Франции и других странах работают на реакциях деления ядра.

Нельзя просто расщеплять атомы и получать неисчерпаемую энергию; вечно поддерживать реакцию термоядерного синтеза также не удастся. На рис. 7.4 показано почему. По оси абсцисс откладывается *атомный номер*, количество *нуклонов* (то есть протонов или нейтронов), содержащихся в ядре каждого существующего в природе элемента. Все начинается с одного нуклона – это атом водорода. В ядре водорода один протон. Схема продолжается вплоть до 238, это атомный номер урана: в его ядре 92 протона и 146 нейтронов. У некоторых элементов, в частности у урана, есть разные изотопы: например, уран-235, в котором всего 143 нейтрона. Он очень радиоактивен и быстро распадается (именно этот изотоп урана использовался в атомной бомбе, сброшенной на Хиросиму). Все остальные элементы располагаются на схеме между водородом и ураном. По оси ординат откладывается *энергия связи* на каждый нуклон. Чем выше энергия

связи, тем ниже на схеме расположен элемент.

Рис. 7.4. Энергия связи на нуклон в атомных ядрах. Для всех элементов показаны лишь стабильные изотопы. Энергия связи дана в миллионах электрон-вольт на нуклон (то есть протон или нейтрон). В результате получаем энергию, выделяемую при синтезе такого ядра из свободных протонов. Чем выше энергия связи на нуклон (чем ниже ядро расположено на схеме), тем меньше массы на нуклон будет в ядре (по уравнению Эйнштейна $E = mc^2$).

Предоставлено Michael A. Strauss; G. Audia, O. Bersillon, J. Blachot, and A.H. Wapstra, Nuclear Physics A 729 (2003): 3–128

Чтобы составить впечатление об энергии связи, представьте себе два сцепленных магнита: северный полюс одного притягивается к южному

полюсу другого. При такой конфигурации нам придется затратить энергию, чтобы расцепить магниты. Вместе их удерживает энергия связи. На рис. 7.4 водород расположен на самой вершине графика – у него нулевая энергия связи. При синтезе гелия атом водорода словно «катится со склона», при этом высвобождается энергия. Гелий обладает большей энергией связи по сравнению с водородом: он словно находится чуть ниже ко дну долины. Обратите внимание на шкалу: значения энергии связи огромны (измеряются в миллионах электрон-вольт на нуклон). Как вы помните, в главе 6 рассказывалось, что такое электрон-вольт (эВ). Чтобы разложить гелий обратно на водород, потребуется более чем по 7 миллионов электрон-вольт на каждый из 4 нуклонов, всего более 28 миллионов электрон-вольт. В середине графика кривая достигает минимума. Уран, расположенный в правой оконечности графика, выше этого минимума в середине. Если вы – химический элемент, то с вами может происходить экзотермическая реакция деления ядра либо экзотермическая реакция термоядерного синтеза, пока вы не окажетесь в самой нижней точке. Эту нижнюю точку занимает железо с 26 протонами и 30 нейтронами (то есть с 56 нуклонами). Если я попытаюсь запустить термоядерный синтез на основе железа, то реакция получится *эндотермической* – в ходе нее энергия будет поглощаться. Если я попытаюсь запустить деление ядра железа, то снова получится эндотермическая реакция. На железе все стопорится: никакой энергии из него не извлечь.

Звезды заняты синтезом энергии. Если звезда кочегарит себе, выплавляя по порядку один элемент за другим, и в результате получает энергию, то перед вами довольная звезда. Благодаря извлекаемой энергии недра звезды остаются горячими, а тепловое давление раскаленного газа не дает звезде схлопнуться под собственным весом. Допустим, у меня есть главная последовательность таких звезд, которые вдесятеро массивнее Солнца: они состоят в основном из водорода и гелия, а в ядре водород по-прежнему преобразуется в гелий. Это акт 1. В акте 2 ядро звезды состоит уже из чистого гелия, но в газовой оболочке звезды по-прежнему присутствуют водород и гелий. Термоядерный синтез в ядре прекращается, ядро больше не в состоянии удерживать оболочку – и что происходит со звездой? Она сжимается, нарастает давление, и температура достигает значений, достаточных для слияния гелия. Для слияния ядер гелия (ppnn + ppnn) требуется более высокая температура, чем для слияния ядер водорода (p + p), так как в каждом ядре гелия (ppnn) по два протона, соответственно количество взаимно отталкивающихся положительных зарядов удваивается. В следующей сцене второго акта (при 100 миллионах

кельвинов) начинается термоядерный синтез элементов из гелия, и звезда остается стабильной. В самом центре очень горячего ядра гелий превращается в углерод; вне ядра продолжается термоядерный синтез на основе водорода. В итоге получается шар с углеродной сердцевиной, и там недостаточно жарко, чтобы продолжать синтез уже на основе углерода, поэтому синтез прекращается. Ядро продолжает сжиматься, температура вновь возрастает, и начинается синтез на основе углерода. Это акт 3. Теперь, в результате углеродного синтеза, в центре углеродного ядра образуется кислород, а углеродное ядро находится в центре гелиевого. Гелиевое ядро, в свою очередь, окружено звездной оболочкой, в которой есть водород и гелий. Получилась такая луковица, в которой элементы расположены послойно, причем в центре луковицы жарче всего. При каждой из реакций выделяется энергия. В конце концов в центре образуется железное ядро, обернутое слоями все более и более легких элементов. Все это – новая химическая присадка к Галактике.

Но эти элементы по-прежнему заключены в звезде, у них должен быть шанс каким-то образом из нее вырваться – ведь именно из этих элементов мы с вами и состоим! Сегодня известно, что железо – это тупик синтеза. Когда в ядре накапливается железо, синтез останавливается и звезда схлопывается. Когда звезда пытается запустить синтез на основе железа, ее энергия попросту истощается, и схлопывание ускоряется. Звезды должны генерировать энергию, а не поглощать ее. В результате ускоряющегося схлопывания звезда претерпевает гравитационный коллапс, и в центре ее остается сверхплотная нейтронная звезда. При образовании нейтронной звезды выделяется такая кинетическая энергия, которой хватает, чтобы просто сдуть всю оболочку и внешнее ядро. Происходит колоссальный взрыв, звезда несколько недель сияет в миллиарды раз ярче Солнца. Внутренность звезды развеивается по галактике, то есть в *межзвездном пространстве*, при этом происходит химическое обогащение газовых облаков тяжелыми элементами. В результате эти облака становятся интереснее, чем банальная смесь чистого водорода и гелия.

На рис. 7.5 показана красивая спиральная галактика M51, в которой насчитывается 100 миллиардов звезд. Там все стройно и красиво (сверху), пока не происходит взрыв сверхновой (снизу).

Рис. 7.5. Спиральная галактика M51 и сверхновая. Иллюстрация сделана по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Как будет рассказано в главе 12, мы живем в спиральной галактике, чем-то напоминающей M51. До взрыва (верхний снимок) видна и галактика, и, на переднем плане, некоторые звезды Млечного Пути, которые гораздо ближе к нам и (естественно) обладают гораздо меньшей светимостью, чем галактика. Когда происходит такой взрыв, мы видим в галактике новую звезду (нижний снимок). Раньше ее и видно не было, а теперь она – самая яркая точка в галактике. Это всего одна звезда. Будь вы

планетой, вращающейся вокруг этой звезды, от вас осталась бы головешка. Без преувеличения, вот так просто. Такие звезды называются *сверхновыми*. В древности считалось, что при подобном взрыве в небе загорается новая звезда. Сегодня известно, что на самом деле это звездная агония. Не всем звездам такое суждено; лишь относительно массивные могут превратиться в сверхновые. После взрыва на месте сверхновой остается крошечная сверхплотная нейтронная звезда – это происходит, когда все внешние оболочки звезды разлетятся в стороны. Бывают и еще более массивные звезды. И они тоже взрываются. Но при коллапсе такой звезды пространство в ее центре искривляется под действием гравитации настолько сильно, что эта область отсекается от всей остальной Вселенной, и получается… вы угадали, черная дыра. Иногда черная дыра может формироваться в центре звезды уже на этапе отбрасывания газовых оболочек – в таких случаях также происходит взрыв сверхновой.

Стивен Хокинг занимается исследованием черных дыр; он совершил важнейшие открытия, связанные с их странными свойствами. Рич гораздо подробнее расскажет вам о черных дырах и об открытиях Хокинга в главе 20. В «Симпсонах» Хокинга назвали самым умным из живущих ныне людей. Большинство из нас с этим согласны.

Теперь позвольте рассказать о рождении звезд. Туманность Ориона – это «звездная колыбель» – область звездообразования. Это газовое облако, уже насыщенное тяжелыми элементами, выплавленными в ядрах более древних звезд, уже погибших.

В центре туманности – яркие новорожденные массивные звезды, относящиеся к классам O и B. Они ярко светят в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Такое жаркое УФ-излучение состоит из фотонов, обладающих достаточной энергией, чтобы ионизировать водород в центре туманности (то есть отрывать электроны от ядер). Газ стремится сконцентрироваться в виде новых звезд, но этому мешает огромная светимость массивных звезд, расположенных в центре туманности. Тем временем этот газ, насыщенный тяжелыми элементами, уже может порождать и более интересные объекты, нежели просто туманные облачка. В нем также могут формироваться твердые шарообразные тела, содержащие кислород, кремний, железо, – такие тела напоминают землеподобные планеты. Возле некоторых новорожденных звезд планетарные системы также могут образовываться из окутывающего их газа. Это юные солнечные системы, возникающие на месте вращающихся газопылевых дисков (рис. 7.6). В туманности Ориона эти процессы продолжаются и прямо сейчас. В некоторых звездных колыбелях

рождаются тысячи и тысячи солнечных систем. В нашей Галактике 300 миллионов звезд, многие из них имеют собственные планетные системы.

Какова наша роль в этой картине? Мы крошечные и несущественные в космических масштабах. Удручающее известие для тех, кому нравится чувствовать себя великим. У этой проблемы богатая история. Всякий раз, когда мы претендовали на космическую исключительность (мы в центре Вселенной и она вращается вокруг нас; либо мы состоим из особой материи, либо существуем с начала времен), оказывалось, что все в точности наоборот. На самом деле, мы живем в далеком захолустье ничем не примечательной галактики. Каждый астрофизик привык к такой реальности.

Рис. 7.6. Протопланетные диски вокруг новорожденных звезд в туманности Ориона. Фотография космического телескопа «Хаббл». Снимки предоставлены: M.J. McCaughrean (Институт астрономии общества Макса Планка), C.R. O'Dell (Университет Райса), NASA

Рис. 7.7. Глубокое поле телескопа «Хаббл». На этой фотографии с длительной экспозицией, сделанной с космического телескопа «Хаббл», показано около 10 000 галактик. Но Область глубокого обзора занимает лишь 1/13 миллионных всего неба. Следовательно, в области обзора телескопа «Хаббл» на всем небе находится примерно 130 миллиардов галактик. Снимки предоставлены: NASA, Европейское космическое

агентство, С. Беквит (Научный институт космического телескопа) и группа изучения Области глубокого обзора. Цветные снимки подготовлены Nick Wherry, Michael Blanton, David W. Hogg (университет Нью-Йорка), Robert Lupton (Принстонский университет)

Позвольте мне еще более уничижительное сравнение. На рис. 7.7 показан один из снимков, сделанных космическим телескопом «Хаббл». Каждое пятнышко на картинке – это целая галактика. Галактики настолько далекие, что каждая из них занимает лишь крошечную часть снимка. В каждом из этих пятнышек кроется более 100 миллиардов звезд. И это всего лишь небольшой закоулок Вселенной. Этот участок, именуемый Глубоким полем «Хаббла», – снимок наиболее далекого предела Вселенной, который нам известен. В этой области около 10 тысяч галактик. Вся эта область занимает примерно 1/65 от площади полной Луны или 1/13 миллионной всего неба. Поскольку этот участок неба ничем не примечателен, потенциально количество галактик может оказаться в 13 миллионов раз больше, чем на этом снимке. То есть в пределах досягаемости обзора космического телескопа «Хаббл» находится 130 миллиардов галактик.

Карл Саган в своей книге «Голубая точка» писал, что все, кого мы знали, все, о ком когда-либо читали в исторических книгах, жили на Земле – этой крошечной пылинке во Вселенной. Я часто об этом задумываюсь. Ведь разум подсказывает: «я так мал», сердце говорит «я так мало», но теперь вы сильны и, читая эту книгу, будете все увереннее мыслить масштабно, а не мелко. Почему? Потому что теперь вы в курсе законов физики, знаете о механизмах устройства Вселенной. Фактически знания астрофизики вдохновляют, позволяют вам взглянуть в небо и сказать: «*Нет, я чувствую себя не малым, а великим, поскольку человеческий мозг – какой-то килограмм серого вещества – смог все это осознать. А какие тайны меня еще только ожидают!*»

Глава 8
Жизнь и смерть звезд (II)

Автор: Майкл Стросс

В этой главе мы немного подробнее обсудим, как устроены звезды, и поможет в этом информация, которую вы получили из предыдущей главы. В каком случае объект можно считать звездой? Астрономы определяют звезду как самогравитирующий объект, в центре которого протекают термоядерные реакции. «*Самогравитирующий*» – означает «такой, целостность которого поддерживается благодаря гравитации». Земля также остается целостной благодаря силе гравитации. На самом деле, у объекта, сравнимого по массе с Землей, сила гравитации гораздо больше внутренней прочности горных пород. Посудите сами: ведь Земля шарообразная, как и звезды. Гравитация действует одинаково во всех направлениях, и если целостность объекта обусловлена гравитацией, то этот объект напоминает по форме шар. Более мелкие объекты, например астероиды, сохраняют целостность именно благодаря прочности горных пород либо вообще представляют собой бесформенные кучи щебня – зачастую довольно глыбистые и продолговатые (рис. 8.1).

Но у больших массивных объектов, например Солнца, гравитация настолько превосходит остальные силы, что вся масса спрессовывается в виде сферы – это наиболее компактная конфигурация. Если большой самогравитирующий объект быстро вращается, то он будет не совсем круглым. Из-за вращения сфера уплощается. Сам Исаак Ньютон это понимал. Юпитер довольно быстро вращается, поэтому напоминает по форме эллипс; его экваториальный радиус примерно на 7 % больше полярного. Наиболее грандиозные примеры такого сплющивания при вращении – это спиральные галактики, которые мы обсудим в главе 13.

Если газ, из которого состоит звезда, удерживается в виде единого целого под действием гравитации, то почему весь этот газ не сжимается в одну точку? Все дело во внутреннем давлении газа. Гравитация тянет вглубь каждую частицу газа, а давление выталкивает эту частицу наружу, и две силы уравновешивают друг друга.

Рис. 8.1. Солнце (слева) и астероид 25143 Итокава (справа), масштаб не соблюден. Форма двух тел очень разная. Солнце диаметром 1,4 млн километров под действием собственной гравитации приняло форму шара. Обратите внимание на хорошо заметные солнечные пятна. Диаметр астероида – всего полкилометра; его самогравитация слишком мала, чтобы это тело приняло сферическую форму.

Считается, что этот астероид – непрочная каменистая структура, и вещество, из которого он состоит, постепенно собралось в процессе аккреции. Снимок Солнца сделан космическим аппаратом SOHO (Солнечная и гелиосферная обсерватория), специально предназначенным для наблюдения Солнца. Снимок астероида сделан с аппарата «Хаябуса», запущенного Японским аэрокосмическим агентством (JAXA). Снимки предоставлены: Солнце: NASA, см. https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/mdi20031028_prev.jpg; астероид Итокава: JAXA, см. https://apod.nasa.gov/apod/ap051228.html

Аналогичный пример – воздушный шарик. Он имеет шарообразную форму, но причина не в гравитации, а в натяжении резины. Шарик стремится скукожиться, как резиновая полоска, но (как и в звезде)

внутреннее давление газа этому препятствует. Давление воздуха и натяжение резины уравновешивают друг друга, и шарик остается шарообразным.

Давление внутри звезды возрастает к центру и ослабевает с увеличением расстояния от центра. Падение давления газа с увеличением высоты известно и на Земле. Атмосферное давление на уровне моря составляет примерно 760 мм рт. ст. – на столько поднимается столбик ртути под весом столба воздуха, простирающегося до верхней границы атмосферы. Когда вы поднимаетесь вверх и все большая часть земной атмосферы оказывается под вами, столб воздуха над вами укорачивается и, соответственно, давит все слабее. То есть атмосферное давление уменьшается с высотой.

Давление звездного газа зависит от температуры и плотности звезды; и плотность, и температура стремительно возрастают по направлению к центру звезды.

Теперь поговорим о ядре. Ядро невозможно наблюдать напрямую, но о его свойствах можно косвенно судить по уравнениям, описывающим звездную структуру. Эти уравнения учитывают эффект давления и гравитации. Они выводятся с учетом того, что Солнце стабильно, давление и гравитация взаимно уравновешиваются в каждой точке звезды. Согласно таким расчетам, температура в самом центре Солнца должна составлять 15 миллионов кельвинов, как мы уже говорили. Эти расчеты также показывают, что плотность солнечного вещества в центре нашей звезды составляет примерно 160 г/см^3, то есть Солнце в 160 раз плотнее воды. Для сравнения: из всех элементов, встречающихся на Земле, наибольшей плотностью (22,6 г/см^3) обладает осмий, он примерно вдвое плотнее свинца. При столь колоссальной температуре газ в недрах Солнца ионизирован, то есть электроны оторваны от атомов, ядра и электроны в такой среде носятся с огромной скоростью. Такое состояние вещества называется «*плазма*». Именно давление этих стремительно движущихся частиц противодействует гравитации, не дает Солнцу схлопнуться и поддерживает его в стабильном состоянии.

Мы уже знаем об одном базовом свойстве вещества при заданной температуре: вещество излучает фотоны. Это справедливо и для недр Солнца, разогретых до 15 миллионов кельвинов. Пик спектра абсолютно черного тела при такой температуре находится в рентгеновском диапазоне. Означает ли это, что Солнце ярко светит в рентгеновском спектре? Нет. Допустим, рентгеновский фотон был излучен в недрах Солнца. Может ли

он беспрепятственно вырваться из центра? Вспомните, как ходили к врачу на рентген: те части тела, которые не требуется облучать, вам накрывали тяжелым свинцовым фартуком. Следовательно, тонкий слой свинца, плотность которого равна жалким 11,34 г/см3, поглощает практически все попадающие на него рентгеновские лучи. Если этого достаточно для нейтрализации рентгеновских лучей, то логично сделать вывод, что из центра Солнца рентгеновским лучам далеко не уйти. На самом деле они успевают пролететь всего около сантиметра – и полностью поглощаются.

Но энергия поглощенного фотона должна куда-то потратиться. Она нагревает материю, впитавшую фотон, а эта материя потом излучает в спектре абсолютно черного тела – новые рентгеновские лучи испускаются повторно. Можно себе представить, как фотончик поглощается материей, после чего переизлучается снова и снова. Если учесть все цифры, то получится, что энергия, выделившаяся в ядре Солнца, достигает солнечной поверхности примерно через 170 тысяч лет. Расстояние от центра Солнца до его поверхности составляет всего 2,3 световой секунды – то есть фотон пролетал бы его за 2,3 секунды, если бы ему ничто не мешало. Но поскольку фотон насилу пропихивается наружу, траектория у него кривая, как у пьяницы. Солнце его поглощает, снова излучает, и так он постепенно добирается от ядра к поверхности.

Исходный фотон, излученный в центре звезды при 15 миллионах кельвинов, относился бы к рентгеновскому спектру. Будет ли он рентгеновским, когда достигнет поверхности? Нет. Всякий раз при переизлучении энергии ее спектр соответствует температуре той точки в звезде, где она была переизлучена. Пока энергия пробивается от центра к поверхности, температура снижается и отдельные фотоны теряют первоначальный облик. Энергия распределяется между более низкоэнергетическими фотонами, что соответствует более низкой температуре. Итак, пусть недра Солнца и излучают рентгеновские лучи, на поверхности мы рентгеновских лучей не находим. Они медленно превращаются в фотоны видимого света, который и льется на нас от Солнца.

Если бы в центре Солнца не было ядерной печи, поддерживающей в недрах высокую температуру и давление, то Солнце стало бы медленно сжиматься под действием гравитации, постепенно теряя энергию, излучаемую с поверхности. Такое гравитационное сжатие с постепенным проседанием газовой оболочки звезды к центру происходит с выделением энергии. То же самое происходит с куском мела, падающим на пол, – при падении он набирает скорость. Гравитационной энергии сжатия как

таковой хватило бы, чтобы поддерживать нынешнюю светимость Солнца на протяжении примерно 20 миллионов лет. Еще до Эйнштейна Герман фон Гельмгольц в 1856 году предположил, что именно такое медленное гравитационное сжатие и служит источником энергии, подпитывающей Солнце. На тот момент эта гипотеза казалась правдоподобной, поскольку явление термоядерного синтеза было неизвестно – его предстояло открыть лишь через 82 года. Но теперь, на основе датировки по радиоактивным изотопам (при этом мы отмечаем, сколько урана в конкретной породе успело превратиться в свинец), уже известно, что возраст Земли – несколько миллиардов лет. Более того, окаменелости демонстрируют, что температура земной поверхности практически не менялась на протяжении значительной части всего этого периода. Следовательно, Солнце светит примерно с той интенсивностью, что и сегодня, уже гораздо дольше 20 миллионов лет, поэтому гипотеза о гравитационном сжатии как об источнике солнечной энергии не подтверждается.

Когда стала понятна важность формулы $E = mc^2$, вопросов не осталось. Солнце сжигает в своих недрах ядерное топливо, и от этого выделяется энергия. Такой приток ядерной энергии выравнивает светимость Солнца и поддерживает давление внутри звезды. Солнце стабильно и не сжимается. Термоядерный синтез – столь эффективный источник энергии, что Солнце ровно светит на протяжении последних 4,6 миллиарда лет, в течение длительного времени обеспечивая Земле стабильные условия развития. Солнце провело уже примерно половину своего жизненного цикла в главной последовательности.

Кстати, а как определить основные параметры Солнца: радиус, массу и светимость? Солнечный радиус измеряется в несколько этапов. Радиус *Земли* известен со времен древнегреческого математика и географа Эратосфена, вычислившего его около 240 года до н. э. Каждый год, ровно в полдень 21 июня Солнце проходит прямо над египетским городом Сиеной. Эратосфену это было известно. В то же время он измерил, что Солнце на 7,2° отклоняется от вертикали в городе Александрия, что лежит прямо на север от Сиены. Аристотель утверждал, что Земля, независимо от ориентации, во время лунного затмения всегда отбрасывает на Луну круглую тень. Единственное тело, которое всегда отбрасывает круглую тень, – это сфера; следовательно, Эратосфен знал, что Земля должна иметь форму шара. Он также понимал, что смещение высоты Солнца на 7,2° при одновременном измерении высоты в двух разных городах обусловлено тем, что между этими городами – примерно 7,2° широты, либо 1/50 всей окружности Земли (360°). Нанимаем землемера – посчитать расстояние от

Александрии до Сиены, умножаем это расстояние на 50 и узнаем длину земной окружности – около 40 тысяч километров. Делим на 2π и получаем радиус. Все было просто, достаточно было догадаться, как это сделать!

Из разных обсерваторий, находящихся в различных точках Земли, мы получаем немного разное положение Марса на фоне далеких звезд. Зная радиус Земли и измеряя такие смещения вызванные параллаксом, можно измерить расстояние до Марса. Впервые это сделал Джованни Кассини. Работа Кеплера позволила определить размеры планетных орбит – и построить масштабную модель Солнечной системы. Зная расстояние между Землей и Марсом, можно вывести размеры всех орбит, в том числе радиус земной орбиты – одну астрономическую единицу. Следовательно, в 1672 году Кассини определил, что расстояние от Земли до Солнца составляет примерно 140 миллионов километров – что не слишком отличается от истинного значения 150 миллионов километров.

Известен и угловой размер Солнца при наблюдении с Земли (примерно полградуса). Зная эту величину и расстояние от Земли до Солнца, можно определить радиус Солнца. Он равен половине углового диаметра Солнца в градусах (1/4°), разделить на 360°, умножить на 2π и на расстояние от Земли до Солнца. Итак, радиус Солнца – примерно 700 тысяч километров, что примерно в 109 раз больше радиуса Земли. Светимость Солнца также легко определить: измеряем, какова яркость Солнца при наблюдении с Земли, и, с учетом расстояния *r*, по закону обратных квадратов вычисляем светимость Солнца: около 4×10^{26} ватт.

Также можно вычислить массу Солнца. Законы Ньютона позволяют вывести соотношение между массами Земли и Солнца. Мы знаем, какое ускорение возникает на расстоянии, равном земному радиусу (то есть ускорение на поверхности Земли), $GM_{\text{ЗЕМЛ}}/r_{\text{ЗЕМЛ}}^2 = 9{,}8$ метра в секунду за секунду, эту величину можно узнать, наблюдая, как падают яблоки. Мы также знаем, какое ускорение дает Солнце на расстоянии 1 а.е.: GMСОЛН/(1 а.е.)2 = 0,006 метра в секунду за секунду, эту величину мы уже вычислили в главе 3. Берем отношение двух этих значений ускорения: 0,006 метра в секунду за секунду/9,8 метра в секунду за секунду = 0,0006 = $[GM_{\text{СОЛН}}/(1\ \text{а.е.})^2]/[GM_{\text{ЗЕМЛ}}/r_{\text{ЗЕМЛ}}^2] = (M_{\text{СОЛН}}/M_{\text{ЗЕМЛ}}) = (r_{\text{ЗЕМЛ}}/1\ \text{а.е.})^2$. Подставив в эту формулу известные значения радиуса Земли и одной астрономической единицы и решив выражение, узнаем, что масса Солнца примерно в 330 000 раз превышает массу Земли. Поскольку постоянная *G* сокращается, ее не обязательно знать, чтобы определить соотношение масс Солнца и Земли.

Но какова масса Земли в килограммах? Массу можно было бы вычислить на основе тождества с ускорением свободного падения на поверхности Земли, равного 9,8 метра в секунду за секунду = $GM_{ЗЕМЛ}/r_{ЗЕМЛ}^2$, если бы только мы знали числовое значение ньютоновской постоянной G. Генри Кавендиш, первооткрыватель водорода, самого распространенного элемента во Вселенной, поставил хитроумный эксперимент, чтобы определить значение G. Он воспользовался крутильными весами, чтобы определить соотношение сил, воздействующих на экспериментальный шар со стороны Земли и со стороны находящегося рядом свинцового шара, который весит 159 кг. Земля тянет экспериментальный шар вниз, а свинцовый шар тянет его вбок, и две эти силы можно сравнить, измерив угол отклонения крутильных весов. Зная расстояние до свинцового шара и до центра Земли, Кавендиш определил соотношение масс Земли и свинцового шара. Так в 1798 году он смог вычислить значение ньютоновской постоянной G и массу Земли в килограммах. Умножим ее на 330 000 – и получим массу Солнца. Оказывается, Солнце весит 2×10^{30} кг. Это много!

Здесь мы говорим прежде всего о Солнце, но я хотел бы рассказать и о природе других звезд. Мы пользуемся параметрами земной орбиты для определения массы Солнца по законам Ньютона – точно так же можно наблюдать двойные звезды (две звезды в паре вращаются одна вокруг другой) и вычислять их массы.

Наименее массивные звезды в главной последовательности (относящиеся к спектральному классу M) в 12 раз легче Солнца. А что насчет еще более легких звезд? При меньшей гравитации они, соответственно, будут обладать меньшей температурой и плотностью ядра. Что происходит с газообразной массой, удерживаемой вместе такой гравитацией, которая попросту недостаточна для запуска термоядерного синтеза на основе водорода? Получается звезда, которую называют «*коричневый карлик*» (на самом деле такие звезды не коричневые, а очень красные на вид, и светят они в основном в инфракрасном спектре; иногда астрономическая номенклатура бывает далека от истины). Такие звезды бывают, но найти их сложно. Они тускло отсвечивают благодаря остаточному теплу, сохраняющемуся от гравитационного сжатия (именно такую модель Гельмгольц строил для Солнца). В их недрах нет ядерной печи, поэтому светимость их невелика. Еще такие звезды холодные, с температурой поверхности от 600 до 2000 K, именно поэтому они излучают в основном в инфракрасной, а не в видимой части спектра. Для сравнения:

обычная духовка разогревается до 500 K.

Большинство наиболее мощных телескопов предназначены для наблюдения видимого света, и лишь в последние пару десятилетий мы стали конструировать телескопы, позволяющие рассматривать небо в инфракрасном диапазоне (по всевозможным техническим причинам оказалось, что изготавливать такие аппараты гораздо сложнее). Такие объекты, как коричневые карлики, удалось обнаружить только с появлением мощных телескопов, чувствительных к ИК-излучению.

Спектральные классы звезд O, B, A, F, G, K и M известны уже около 100 лет, но с 1999 года, когда были открыты коричневые карлики, к этому списку добавились еще два класса: L и T. Совсем недавно новый космический инфракрасный телескоп WISE открыл еще более холодные звезды, отнесенные к спектральному классу Y. Их поверхностная температура – всего около 400 K, чуть выше точки кипения воды. Коричневые карлики с массой от 1/80 до 1/12 солнечной (то есть в 13–80 раз тяжелее Юпитера) едва теплятся, сжигая крупицы дейтерия, имеющиеся в их ядрах. Таким образом, поскольку в этих телах все-таки идет термоядерный синтез, они называются «звездами». Еще более мелкие объекты, превышающие по массе Юпитер не более чем в 13 раз, совершенно наверняка не смогут поддерживать в ядре никакого термоядерного синтеза. Такие объекты называются планетами!

Давайте обсудим гибель звезд немного подробнее, чем в главе 7. Даже на последних этапах жизненного цикла в пределах главной последовательности светимость Солнца будет постепенно расти, и через миллиард лет земные океаны выкипят. На этом прекратится земная жизнь в том виде, как мы ее знаем. Примерно через 5 миллиардов лет в ядре Солнца не останется водорода (весь он превратится в гелий), и солнечная ядерная печь потухнет. Спадет давление, благодаря которому звезда сопротивлялась гравитации. Гравитация ее одолеет, и звезда начнет сжиматься. Но, как вы помните, энергия, синтезированная в ядре, поднимается до поверхности звезды за пару сотен тысяч лет. Внутренние области звезды начнут сжиматься, когда через внешние еще будет течь энергия, поддерживающая их форму. Пройдет пара сотен тысяч лет, пока до внешних областей звезды дойдут печальные новости о том, что энергия в центре Солнца иссякла.

Представьте себе водородную оболочку, непосредственно прилегающую к ядру (теперь уже состоящему из чистого гелия). Вне ядра все еще полно водорода, но эта область до сих пор не участвовала в термоядерном синтезе, поскольку там попросту не хватало для этого плотности и температуры. Но по мере сжатия эта водородная оболочка

становится все гуще и жарче. Очень быстро давление и температура повышаются настолько, что позволяют запустить в этой оболочке термоядерный синтез гелия из водорода. Появляется новый источник топлива для ядерной печи: начинает выгорать водород из звездной оболочки.

Вдруг у звезды открывается второе дыхание. Темпы синтеза энергии в сгорающей водородной оболочке зашкаливают – гораздо выше, чем были в ядре, когда звезда еще не покинула главную последовательность. Более того, объем сгорающей водородной оболочки гораздо больше, чем объем ядра.

Итак, как минимум на краткий период, звезда приобретает огромную светимость, но излучение пробивается к поверхности очень долго, и возросшее давление начинает тягаться с гравитацией. Поэтому внешние оболочки звезды расширяются (и немного остывают) даже в то время, пока внутренние области сжимаются. Солнце превращается в *красный гигант*, об этом мы говорили в главе 7. Те оболочки звезды, что находятся вокруг выгорающего водородного слоя, раздуваются до колоссального радиуса, около 1 а.е. (что в 200 раз превышает нынешний радиус Солнца). Примерно через 8 миллиардов лет с сегодняшнего дня Земля под влиянием приливных воздействий по спирали свалится в газовую оболочку Солнца, превратившегося в красный гигант, и сгорит.

В то время, пока горят внешние водородные оболочки звезды, в ее гелиевом ядре отсутствует собственный источник энергии; звезда продолжает сжиматься под действием гравитации, поэтому температура растет. Когда она достигает примерно 100 миллионов кельвинов, в звездном ядре начинается термоядерный синтез на основе гелия – из гелия образуются ядра углерода и кислорода. Такой этап термоядерного гелиевого синтеза в истории Солнца продлится 2 миллиарда лет, но, в конце концов весь гелий в ядре израсходуется, и звезда снова начнет сжиматься[6].

На этом этапе история звезды, сопоставимой по массе с Солнцем, близится к завершению. Внешние оболочки звезды находятся очень далеко от ядра, следовательно, гравитация на них почти не действует. Достаточно минимальной энергии, чтобы внешние газовые оболочки отслоились от звезды и обнажили жаркое и плотное углеродно-кислородное ядро звезды. В отброшенном газе возникают возмущения, вызванные ультрафиолетовым излучением звезды, поэтому газ флуоресцирует примерно как в туманности Гантель, изображенной на рис. 8.2. Такие объекты (достаточно неудачно) именуются *планетарными туманностями*, поскольку астрономы, впервые

обнаружившие их в телескоп, усматривали в них какое-то сходство с планетами. Так название и закрепилось. Астрономы немного консервативны, они предпочитают придерживаться старой терминологии, даже когда та становится старомодной и не вполне точной.

Такая разбухшая оболочка, которая некогда входила в состав звезды, теперь потихоньку расширяется. Иногда звезды отбрасывают внешние оболочки сложным образом, и так возникают планетарные туманности, состоящие из различных газовых оболочек. Разные слои такой туманности до всплытия из недр звезды находились на разной глубине, и поэтому они могут быть обогащены разными элементами. Звезда вращается, вот почему эти слои выдуваются преимущественно вдоль оси вращения, как это происходит в туманности Гантель (рис. 8.2).

Сияющее ядро звезды, теперь уже ничем не прикрытое, виднеется в самом центре туманности. Оно небольшое (размером примерно с Землю) и настолько жаркое, что кажется белым. Поэтому такое тело называется «белый карлик». У белого карлика нет внутреннего источника энергии, поэтому за миллиарды лет он медленно остывает. Белый карлик все равно считается звездой, хотя никакого ядерного горения в нем не происходит (согласен, здесь номенклатура немного хромает!).

Почему же белый карлик не коллапсирует? Все дело в *принципе запрета Паули*, названном в честь физика Вольфганга Паули. Согласно этому принципу, два электрона не могут находиться в атоме в одном и том же квантовом состоянии. Этот принцип критически важен для понимания строения атомов. В атомах с большим количеством электронов этим электронам приходится занимать все более высокие энергетические уровни, поскольку нижние уже заполнены. В белых карликах принцип запрета Паули приводит к тому, что электроны стремятся не слишком кучковаться, и из-за этого возникает давление, позволяющее белому карлику противодействовать гравитации. Наше Солнце в конце своего жизненного пути превратится в белый карлик.

Как рассказывалось в главе 7, те звезды, масса которых превышает солнечную более чем в 8 раз, претерпевают гораздо более драматичную последовательность реакций. Их массы хватает на то, чтобы в ядре синтезировался углерод и кислород. Если бы массы было меньше, то вещество оставалось бы инертным, пока звезда медленно превращалась бы в белый карлик. Но в массивных звездах оно разогревается в достаточной степени, чтобы начался термоядерный синтез гелия, кремния и остальных элементов Периодической системы вплоть до железа.

Рис. 8.2. Туманность Гантель. Раньше на ее месте был красный гигант, сбросивший внешние оболочки, и из-за этого обнажилось его плотное горячее ядро. На месте ядра сияет белый карлик, а внешние оболочки образуют планетарную туманность, которая подсвечивается ультрафиолетовым сиянием белого карлика. Иллюстрация сделана по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Внешние слои таких массивных звезд разбухают значительно сильнее, чем у обычных красных гигантов. Эти звезды превращаются в красные сверхгиганты, радиус которых достигает нескольких астрономических единиц.

В ночном небе некоторые яркие звезды легко различить невооруженным глазом. Красные звезды из главной последовательности обладают малой светимостью; ни одна из них невооруженным глазом не видна. Красный гигант, в свою очередь, огромен и обладает чрезвычайной светимостью, поэтому заметен издалека. Все яркие красные звезды в небе –

это либо красные гиганты (например, Арктур в созвездии Волопаса и Альдебаран в созвездии Тельца), либо красные сверхгиганты (Бетельгейзе в созвездии Ориона).

Ученые злоупотребляют приставкой *сверх*. Мы добавляем ее куда ни попадя, поскольку продолжаем открывать объекты, более крупные или более грандиозные, чем все, что мы знали ранее. Это и сверхновые звезды, и сверхмассивные черные дыры, и, разумеется, так и не воплощенный на практике ускоритель частиц, который называли сверхпроводящим суперколлайдером. Самый известный сверхгигант в небе называется Бетельгейзе. Его радиус примерно в 1000 раз больше солнечного, а по массе он превышает Солнце как минимум в 10 раз. В его ядре из гелия синтезируются углерод, кислород и более тяжелые элементы. Ядро окружено тонкой оболочкой практически чистого гелия, который пока недостаточно густ и разогрет, чтобы гореть, поэтому он сейчас более или менее стабилен. Этот слой окружен оболочкой водорода, из которого синтезируется новый гелий, а за пределами водородного слоя раскинулась львиная доля объема звезды – это огромное газовое облако, состоящее из водорода и гелия.

История эволюции тех звезд, что покинули главную последовательность, была восстановлена в деталях в 1940-е и 1950-е годы, когда мы начали в подробностях понимать физику ядерных реакций, протекающих в недрах звезд, а также смогли задействовать первые компьютеры для решения уравнений, описывающих строение звезд. Значительная часть этой работы была проделана в Принстонском университете под руководством профессора Мартина Шварцшильда. Нил, Рич и я успели с ним поработать на закате его карьеры; это был чудесный человек.

На снимке (рис. 8.3) вы видите Шварцшильда в компании Лаймана Спитцера и Рича Готта. Когда Генри Норрис Рассел (прославленный соавтор диаграммы Герцшпрунга – Рассела) в 1947 году оставил пост руководителя обсерватории Принстонского университета и удалился на покой, он привел на свое место двоих молодых астрономов – Мартина Шварцшильда и Лаймана Спитцера. Обоим было слегка за тридцать. Спитцер, возглавивший факультет, принялся за разработку современных представлений о межзвездной среде (это газ и пыль в межзвездном пространстве) и основал Принстонскую лабораторию физики плазмы, где ученые пытаются запустить управляемый термоядерный синтез, который может стать новым источником энергии. Спитцер всегда останется в нашей памяти как отец космического телескопа «Хаббл»; именно он разработал

первичную концепцию и потратил несколько десятилетий, чтобы убедить астрономическое сообщество и Конгресс США в том, что такой телескоп следует сконструировать. Спитцер и Шварцшильд тащили на себе факультет астрофизики Принстонского университета в течение следующих 48 лет. Они оба скончались в 1997 году с разницей в 11 дней, что крайне шокировало всех нас.

Рис. 8.3. Слева направо: Лайман Спитцер, Мартин Шварцшильд и Рич Готт в 1990-е годы. Снимок из личного архива Дж. Ричарда Готта

В 1950-е годы Шварцшильд и его студенты проработали все детали той истории, которую я сейчас рассказываю. Он был одним из первых, кто понял весь цикл звездной эволюции от начала и до конца. Отец Мартина, Карл Шварцшильд, сыграл ключевую роль в изучении черных дыр; мы вновь вспомним о нем в главе 20.

Вернемся к истории звезд. Давление электронов удерживает белый карлик от коллапса. Однако если масса звездного ядра превышает 1,4 солнечных, то даже этого давления не хватает для противодействия гравитации. Под натиском гравитации протоны и электроны сливаются вместе и превращаются в нейтроны (при этом испускаются электронные нейтрино). Получается *нейтронная звезда* – в сущности, это гигантское

атомное ядро, состоящее почти из одних нейтронов. Принцип запрета Паули действует на нейтроны с тем же успехом, что и на электроны, и теперь давление нейтронов позволяет звезде пересиливать действие гравитации. Однако поскольку нейтроны гораздо массивнее электронов, размер нейтронной звезды в устойчивом состоянии (около 25 км) гораздо меньше, чем у белого карлика. Представьте себе, что масса, превышающая солнечную, втиснута в объем, сопоставимый по размеру с островом Манхэттен (вспомните 100 миллионов слонов в наперстке из главы 1)! Вещество нейтронных звезд – наиболее плотная известная нам субстанция. Плотность в центре нейтронной звезды может достигать почти 10^{15} г/см^3.

Если ядро крупной звезды более чем вдвое превышает по массе Солнце, то образующаяся из него нейтронная звезда будет неустойчива и начинает сжиматься дальше. Давления нейтронов не хватит, чтобы противостоять гравитации, и возникает черная дыра. Независимо от того, во что превратится звездное ядро – в нейтронную звезду или в черную дыру, – вещество в процессе падения подвергается чрезвычайно сильному сжатию, что запускает дальнейшее ядерные реакции (как вы помните, оболочка, окружающая ядро, все еще содержит элементы легче железа). Внезапно выделяющаяся при этом энергия может полностью рассеять в пространстве внешние слои звезды, что наблюдается как взрыв сверхновой. Так погибают Звезды, которые на стадии главной последовательности имеет массу около 8 солнечных или больше. После вспышки сверхновой на их месте остаются нейтронные звезды или черные дыры. Взрывы таких массивных звезд называют сверх новыми типа II, чтобы отличать их другого типа звездных взрывов. Допустим, три звезды вращаются друг вокруг друга, причем две из этих звезд – белые карлики. Гравитационные взаимодействия между ними могут привести к столкновению двух белых карликов. Из-за нагрева при таком столкновении их ядерное горючее детонирует и дает взрыв сверхновой. В другом случае красный гигант в двойной звездной системе может сбросить часть своей массы на белый карлик. Да, так описывали процесс раньше. А сейчас говорят, что термоядерный взрыв обычно происходит еще до достижения предельной массы. Такие взрывы называются *сверхновыми типа Ia*, и их следует отличать от взрывов массивных коллапсирующих звезд. Мы еще вкратце обсудим их в главе 23, поскольку с помощью таких звезд удобно измерять ускоряющееся расширение Вселенной.

Так или иначе, при взрыве сверхновой газ разлетается во все стороны. Это совсем не такой неспешный процесс, как медленное отслоение внешних частей планетарной туманности. Нет, это исключительно бурный

взрыв. Звезда целиком или большей частью уничтожается при взрыве, и звездное вещество устремляется во все стороны со скоростью около 10 % от световой. Тяжелые элементы, образовавшиеся в звездном ядре, теперь возвращаются в межзвездную среду, после чего могут войти в состав звезд нового поколения и планет.

В 1054 году китайские астрономы заметили новую звезду в созвездии, которое мы называем Тельцом. Древние китайцы внимательно наблюдали за небом, выискивая там предзнаменования грядущих событий, поэтому их особенно впечатлила эта «звезда-гостья», которая хорошо просматривалась в течение нескольких недель и поначалу была настолько яркой, что ее было видно даже днем. Интересно, но в европейских манускриптах нет совершенно никаких упоминаний об этой звезде, несмотря на то что несколько недель это была ярчайшая звезда на небе. Возможно, в течение всего этого периода в Европе стояла облачная погода, либо все письменные европейские свидетельства были утрачены, либо китайские астрономы просто внимательнее вглядывались в небо.

Фотографии Крабовидной туманности в созвездии Тельца (рис. 8.4), сделанные с интервалом в несколько десятилетий, явно свидетельствуют, что она расширяется. Учитывая наблюдаемую скорость расширения и современные размеры туманности, можно рассчитать, когда должно было начаться это расширение. Получается, это произошло около тысячи лет назад – именно в тот период, когда китайцы наблюдали свою «звезду-гостью». Поскольку Крабовидная туманность находится именно в той части неба, что упоминается в китайских источниках, эта туманность определенно является остатком той самой сверхновой, которую они открыли. Еще через несколько сотен тысяч лет этот газ настолько рассеется, что станет практически невидим – он полностью перемешается с межзвездной средой.

В центре Крабовидной туманности открыли стремительно вращающуюся нейтронную звезду, совершающую около 30 оборотов в секунду. Когда звезда сжимается, она сохраняет угловой момент и вращается все быстрее, подобно фигуристу, прижимающему руки к телу. Ее магнитные поля также сжимаются и становятся интенсивнее. Магнитное поле на поверхности нейтронной звезды в центре Крабовидной туманности примерно в 10^{12} раз сильнее, чем на поверхности Земли. Благодаря вращению нейтронной звезды ее северный и южный магнитные полюса поворачиваются и испускают радиоволны двумя лучами, подобно маяку. Всякий раз, когда такой луч пролетает мимо Земли, мы фиксируем радиоимпульс. Поэтому нейтронная звезда называется «*радиопульсар*».

Первый радиопульсар открыла в 1967 году аспирантка Джослин Белл.

Рис. 8.4. Крабовидная туманность. Это расширяющийся остаток взрыва сверхновой (которую наблюдали на Земле около 1054 года н. э.). Снимок космического телескопа «Хаббл», NASA

Период его вращения составлял 1,33 секунды. Научный руководитель Белл, Энтони Хьюиш, получил за это открытие Нобелевскую премию по физике. Мне кажется возмутительным, что Белл не разделила с ним эту премию.

Пульсар Крабовидной туманности действует во всем электромагнитном спектре, от радиоволн вплоть до гамма-излучения.

Пульсар можно заметить и в видимом спектре как стремительно мерцающую звезду (60 раз в секунду, с такой частотой мимо нас пролетают лучи этого маяка), но астрономы не обращали внимания на это явление до тех самых пор, пока не были открыты радиоимпульсы. Пульсар казался всего лишь тусклой звездой в центре Крабовидной туманности. Крабовидная туманность удалена от нас примерно на 6500 световых лет. Это означает, что на самом деле взрыв произошел около 5445 года до н. э., но свет от него долетел до Земли только в 1054 году.

Вспомните закон обратных квадратов. Ближайшая к нам звездная система – альфа Центавра, до нее 4 световых года. Крабовидная туманность намного дальше, однако сверхновая была ярче всех звезд на ночном небе, ее можно было без труда различить даже днем. Когда ее светимость достигала максимума, эта звезда была примерно в 2,5 миллиарда раз ярче Солнца.

Сверхновые взрываются редко. Последний взрыв сверхновой в Млечном Пути был зафиксирован около 400 лет назад, еще до того, как Галилей впервые направил телескоп в небо. Поэтому в 1987 году все астрономы ликовали, когда удалось засечь взрыв сверхновой в Большом Магеллановом Облаке – это галактика-спутник Млечного Пути. Это был ближайший к нам взрыв сверхновой в современности. Сверхновую было легко заметить невооруженным глазом, хотя она и находилась на расстоянии 150 тысяч световых лет от нас. Мне повезло: в 1987 году я ездил в Чили работать на телескопе в рамках подготовки к диссертации. С каким энтузиазмом (и без труда) я наблюдал эту «новую» звезду в Большом Магеллановом Облаке!

Глава 9
Почему Плутон – не планета

Автор: Нил Деграсс Тайсон

Сейчас я расскажу, как Плутон утратил статус планеты и был разжалован в снежок на задворках Солнечной системы. Также расскажу, какую роль сыграл в этом я, работая в «Роуз-центре Земли и Космоса» при Американском музее естественной истории.

На территории Роуз-центра мы решили обустроить специальный корпус, где можно было бы не просто показывать красивые космические картинки – их и в Интернете хватает. Мы соорудили сферу диаметром 26,5 метра, расположенную в стеклянном кубе. Архитектура и экспонаты сочетаются таким образом, что вы ощущаете себя частью Вселенной – словно идете сквозь нее. У нас цельная сфера. В большинстве планетариев есть только купол, под которым установлен проектор звездного неба, а в коридорах вокруг проектора можно любоваться изображениями Вселенной. Именно таким образом устроено большинство планетариев. Да, космические картинки хороши, но мы думаем, что пора подробнее показать, *как* устроена Вселенная, а не просто собирать глубочайшие космические феномены и превращать их в экспонаты.

Мы принялись за дело, заручившись поддержкой архитекторов – Джима Польшека и партнеров, а также дизайнеров – Ральфа Аппельбаума и коллег. Пожалуй, Ральф наиболее известен проектом мемориального музея холокоста в Вашингтоне, округ Колумбия. Вселенная любит сферы. Можно многое понять о том, как она работает, просто осознав, что законы физики словно сговорились придавать телам форму шара: это правило действует от звезд и планет до атомов. Как правило, если тело не круглое, это означает, что какие-то силы мешают ему округлиться – например, если это тело быстро вращается. Если найти архитектурное решение округлой формы, то оно само сможет послужить элементом экспозиции и поможет соотносить размеры тел во Вселенной. Мы взяли купол, венчающий космический театр в планетарии Хейдена, и превратили его в полноценную сферу, внутренняя поверхность которой сразу сгодилась в качестве выставочного пространства. У нас получился театр Большого взрыва, посетители которого могут смотреть вниз и наблюдать модель зарождения Вселенной.

Вокруг двадцатишестиметровой сферы мы соорудили галерею,

посетители которой могут воочию оценить масштабы Вселенной. Для начала вообразите, что сфера планетария – это вся наблюдаемая Вселенная. На ограждении установлена модель нашего сверхскопления, состоящего из тысяч галактик, одна из которых – Млечный Путь. Диаметр модели – около 10 сантиметров. Вы понимаете, что наша Вселенная намного, намного больше, чем наш родной уголок, для которого у нас есть название, словно строчка в адресе: Сверхскопление Девы. Вы делаете еще несколько шагов, и мы предлагаем вам перенастроиться на другой масштаб: теперь весь планетарий соответствует Сверхскоплению Девы. Его диаметр – 26,5 метра. На перилах установлена модель диаметром 60 сантиметров, в которой изображены Млечный Путь, туманность Андромеды и несколько галактик-спутников. Это наша Местная группа галактик. Далее мы уподобим сферу планетария Местной группе, а на ограждении видим модель Млечного Пути диаметром все те же 60 сантиметров. Галактика напоминает большое зажаренное яйцо: она плоская, со вздутием в центре (так называемый балдж). Пройдем еще немного – и теперь сфера планетария соответствует Млечному Пути, а на ограждении мы видим плексикгласовый шар диаметром всего сантиметров пять, а на нем – сотню тысяч пятнышек. Это шаровое звездное скопление в галактике Млечный Путь. Далее вся сфера планетария соответствует по размеру этому звездному скоплению, а на ограждении у нас установлен шар диаметром около 20 сантиметров. Это пространство, в котором умещаются все орбиты комет, окружающих Солнечную систему: они образуют Облако Оорта.

Бесчисленные кометы из этого облака, вторгающиеся во внутренние области Солнечной системы, – самые опасные для Земли космические тела. Каждая из них, прилетая с окраин Солнечной системы, начинена колоссальной кинетической энергией, и, приближаясь к Солнцу, она только разгоняется. В последний раз комета из Облака Оорта, вероятно, побывала во внутренней части Солнечной системы более 40 тысяч лет назад – никаких исторических свидетельств о таких событиях не сохранилось[7]. Если какая-нибудь комета оттуда полетит прямо к Земле, у нас почти не будет времени что-нибудь предпринять. Когда рядом пролетает обычный астероид, мы обычно можем заранее спрогнозировать его траекторию на сотни оборотов вперед. Можно начертить, как его орбита соотносится с земной, и определить, столкнемся мы через несколько сотен оборотов или нет. В таком случае у нас в запасе будет лет сто, чтобы подготовить космическую экспедицию и отклонить астероид с этой траектории. Но если комета прилетает из-за орбиты Нептуна и направляется прямо на нас, то

почти ни на какое раннее оповещение рассчитывать не приходится[8].

На следующей остановке в галерее «Масштабы Вселенной» большая сфера соответствует Солнцу, а вокруг нее расположены планеты, причем размеры планет выполнены в правильном масштабе относительно Солнца. Процесс продолжается, масштабы шаг за шагом уменьшаются, пока мы не достигаем центра атома. Когда большая сфера соответствует атому водорода, мы показываем точку, соответствующую по размеру его ядру, – диаметр такой точки не более 0,02 сантиметра. Атом водорода – практически пустота.

Сфера планетария оказалась отличным наглядным пособием, чтобы оценить относительные размеры тел во Вселенной.

Сегодня Роуз-центр выглядит роскошно, особенно ночью (рис. 9.1). Слева видна галерея, стоя в которой можно сравнить большую сферу-Солнце с масштабными моделями планет. На картинке заметны Сатурн (с кольцами), а рядом с ним – Юпитер. Разумеется, там видны и Уран, и Нептун. Меркурий, Венера, Земля и Марс слишком маленькие, на этой картинке их не увидишь. По размеру эти модели варьируются от бейсбольного мяча до грейпфрута, и все они установлены на галерейном ограждении, а не свисают с потолка. Вот я и подхожу к рассказу о злоключениях Плутона. Мы не поставили на этом ограждении масштабную модель Плутона рядом с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом. И у нас были на то причины.

Мы оказались в эпицентре спора, начатого не нами. Через год после открытия выставки ее посетил один журналист, заметивший, что среди масштабных моделей планет не хватает Плутона. Он решил раздуть из этого большую новость и опубликовал на тему Плутона целую передовицу в газете *New York Times*. Тогда и началась свистопляска. Рассказываю, что именно мы сделали и почему.

Рис. 9.1. Так выглядит ночью «Роуз-центр Земли и Космоса». Сфера диаметром 26 метров утопает в голубом свете, она хорошо заметна внутри стеклянного куба. Масштабные модели Юпитера и Сатурна хорошо заметны рядом с большой сферой, которая в данном случае обозначает Солнце. Среди этих моделей не было Плутона, из-за чего и разгорелись споры. Снимок предоставлен Alfredo Gracombe

История Плутона начинается с Персиваля Лоуэлла, утонченного джентльмена из Новой Англии. Ему нравилась астрономия, он был богат, поэтому он выстроил обсерваторию, которая называлась (вы угадали) Обсерваторией Лоуэлла. Обсерватория располагалась в Аризоне на высоте 2175 метров. Она так там и сохранилась, а само место называется «Марсианский холм». Лоуэлл фанатично увлекался Марсом; он любил его так беззаветно и так жаждал, чтобы там обнаружилась жизнь, что даже написал три книги на эту тему. Допустим, можно написать книгу о *возможности* жизни на Марсе, но по свидетельству Лоуэлла, одного лишь Лоуэлла, он наблюдал в телескоп признаки жизни на Марсе. Он видел там растительный покров, изменявшийся в зависимости от времени года, а также видел каналы. Лоуэлл полагал, что на месте пересечения каналов раскинулись оазисы. Он считал, что марсиане страдают от нехватки воды,

поскольку увиденные им каналы протянулись от полюсов в те районы, где была заметна растительность. На Марсе есть полярные ледяные шапки. Лоуэлл представлял, что они подтаивают и вода доставляется по каналам везде, где она нужна. Без такого масштабного инженерного проекта марсианская жизнь была бы обречена на гибель от засухи. Сила человеческого воображения удивительна, вот почему мы проверяем наши гипотезы научным методом. Когда в 1877 году Земля и Марс особенно сблизились, Джовании Скиапарелли увидел на Марсе длинные русла, которые назвал итальянским словом *canali*. Это слово ошибочно перевели на другие языки как «каналы». Русла – естественные формы рельефа. Каналы же могут быть проложены только разумной цивилизацией. Это два совершенно разных слова. Но было поздно. Лоуэлл ухватился за эту идею, начертив затейливую систему каналов. Наконец, когда никому больше не удалось увидеть их в телескопы, пришло понимание, что каналы могут быть обычным обманом зрения, когда глаз выстраивает из случайных черточек длинные линии. На современных снимках не видно никакой системы каналов. Регионы с «растительностью» оказались темными скоплениями базальтовых скал, которые выглядят зеленоватыми на фоне красных пустынь Марса. В разные сезоны эти скалы то покрываются слоем песка во время бурь, то вновь обнажаются.

Персиваль Лоуэлл не только интересовался Марсом, но и инициировал поиски *планеты Икс*. На рубеже XIX и XX веков были известны восемь планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Оказалось, что законы Ньютона красиво описывают движения всех планет в Солнечной системе – кроме Нептуна. Предполагалось, что может существовать неизвестный и незамеченный источник тяготения, который влияет на его траекторию, – то есть неоткрытая планета. Лоуэлл был убежден, что такая планета есть, и назвал ее «*планета Икс*». Для поисков этой планеты он пригласил на работу Клайда Томбо. Поиски начались близ *эклиптики* – той плоскости, в которой вращаются известные планеты. Томбо искал объект, который бы заметно сдвигался при сравнении двух снимков одной и той же области неба, сделанных с интервалом в несколько дней или недель. Если бы такой объект обнаружился, это была бы далекая планета, вращающаяся вокруг Солнца. Томбо пользовался прибором под названием «*блинк-компаратор*» – это важный инструмент, сыгравший значительную роль в истории астрономии, хотя сегодня такие сравнения делаются при помощи компьютера. Первый снимок прикрепляется по одну сторону прибора, второй – по другую, и в компараторе имеется один окуляр с двумя линзами. Наблюдатель быстро просматривает два изображения,

которые сменяют друг друга. При этом перебрасывается специальная заслонка, благодаря которой освещается то один, то другой снимок. Любые элементы, положение которых от снимка к снимку изменяется, при этом хорошо заметны. Именно таким образом Клайд Томбо и открыл Плутон в 1930 году.

Название «Плутон» придумала одиннадцатилетняя девочка Венеция Берни, как раз изучавшая в школе древнеримскую мифологию. Планеты именуются в честь римских богов, а Плутон был богом подземного мира. Официальное обозначение Плутона состоит из букв *P* и *L*, случайно совпавших с инициалами Персиваля Лоуэлла. Спустя почти полвека был открыт спутник Плутона. Это тело напоминало маленький бугорок на нечетком снимке Плутона, сделанном в 1978 году. Спустя много лет, когда система Плутона расположилась под более удобным углом к лучу зрения, удалось зафиксировать затмения и прохождения спутника по диску планеты. В эти моменты, когда Плутон и его спутник заслоняли друг друга, их совокупная яркость немного снижалась. Когда космический телескоп «Хаббл» сделал снимки в более высоком разрешении, мы смогли непосредственно рассмотреть и сам спутник Плутона, который назвали Харон (по имени паромщика, перевозившего души усопших через реку Стикс в Аид). У Плутона есть спутник, хорошо. Если он претендует на членство в клубе планет, то для начала неплохо. Никаких проблем, думали мы.

Но проблема была. Во-первых, после открытия Плутона считалось, что это и есть недостающая планета Икс, воздействующая на Нептун. Но в таком случае планета Икс должна была оказаться массивной, а не крошечной по сравнению с Нептуном и Ураном. Тем не менее чем больше информации о Плутоне мы добывали и чем точнее его измеряли, тем меньше и легче он казался. Десятилетие за десятилетием Плутон все уменьшался и уменьшался. Только после открытия Харона удалось в точности измерить массу Плутона – по силе тяготения, с которой он удерживает Харон. Что выяснилось? Плутон в 500 раз легче Земли, это просто мизер по сравнению с массой, которая могла бы заметно изменить орбиту Нептуна. Плутон больше не годился для объяснения траектории Нептуна. Что же его отклоняет? Другая планета Икс? Мы продолжали всматриваться в небо. Так и смотрели, пока в 1992 году Майлс Стэндиш, прямой потомок Майлса Стэндиша (одного из отцов-пилигримов) в 12-м поколении, не проанализировал исторические данные, на основании которых орбита Нептуна считалась изменчивой. Наш Майлс Стэндиш – астрофизик из Лаборатории реактивного движения (Пасадена, штат

Калифорния). Он опирался на уточненные оценки масс Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, полученные в 1980-е годы, когда эти планеты облетал «Вояджер». При этом он исключил одну сомнительную подборку данных, полученных Военно-морской обсерваторией США в период с 1895 по 1905 год. В результате он пришел к выводу, что орбита Нептуна полностью согласуется с законами Ньютона, и для ее описания не требуется учитывать никаких дополнительных гравитационных воздействий со стороны неких таинственных тел. На следующее утро планета Икс отправилась на свалку истории.

Что же насчет Плутона? Получалось, что Плутон – самая маленькая известная планета. В Солнечной системе существует семь *спутников*, которые крупнее него, в том числе наша Луна. Плутон – единственная планета, чья орбита пересекает орбиту другой планеты, настолько это вытянутый эллипс. Плутон состоит в основном изо льда – на 55 % по объему. Для ледяных глыб в Солнечной системе уже есть названия. Их можно было бы назвать «ледяные шары», но гораздо раньше (когда еще не было известно, что они ледяные) за ними закрепилось другое название: кометы. В древности люди любили подбирать поэтические названия для небесных тел. Кометы считались «косматыми светилами», поскольку если у вас копна волос, то на бегу они будут развеваться подобно «хвосту». «Копна волос» по-древнегречески будет «комета». Кометы. Именно так и называются ледяные объекты в Солнечной системе. Плутон во многом схож с кометами. Но он такой один. Он не подлетал к Солнцу с огромной скоростью, а потом не улетал обратно, как положено комете. Когда ледяная комета приближается к Солнцу, ее вещество испаряется, и у нее вырастает длинный хвост. Плутон никогда не приближается к Солнцу, поэтому и хвоста у него нет. Несмотря на все странности Плутона, все мирились с его статусом и готовы были считать его планетой.

Но мы в Роуз-центре стремились, чтобы наши экспонаты как можно дольше сохраняли научную точность. Поэтому мы придавали большое значение тем тенденциям, что прослеживались в изучении планет. Плутон сильнее отличается от Меркурия, Венеры, Земли и Марса, чем все они – друг от друга. Меркурий, Венера, Земля и Марс – небольшие «твердые планеты» (рис. 9.2). Все они относятся к одному семейству.

Меркурий – ближайшая к Солнцу планета. У него большое железное ядро и изрытая кратерами поверхность, атмосферы почти нет. Венера укрыта облаками. На рис. 9.2 она изображена без облаков, мы хотели показать ее рельеф: грандиозные горные хребты и несколько кратеров. У

Венеры плотная атмосфера, состоящая из углекислого газа (CO_2), там царит чудовищный парниковый эффект, и на поверхности невыносимо жарко. Марс меньше Венеры и Земли, но больше Меркурия. У него есть тонкая атмосфера из углекислого газа, поддерживающая слабенький парниковый эффект. По этой причине, а также потому, что сам Марс находится достаточно далеко от Солнца, на Марсе гораздо холоднее, чем на Земле. Атмосферное давление на поверхности Марса примерно в 100 раз ниже, чем на поверхности Земли. Темные области на изображении Марса – это обнаженные базальтовые породы, не покрытые песком. Красные области (Марс и называют «красной планетой») – это песчаные пустыни. На Марсе есть огромная и длинная рифтовая долина, которая протянулась бы через всю территорию США, от океана до океана. На Марсе есть потухший вулкан Олимп высотой 27 километров. На полюсах Марса – две ледяные шапки, состоящие в основном из водяного льда и припорошенные замерзшим углекислым газом (сухим льдом). Если не считать Земли, Марс наиболее пригоден для жизни по сравнению с остальными планетами.

Рис. 9.2. Сравнительные масштабы планет земной группы («твердых» планет), а также Луны, естественного спутника Земли. Венера показана без густых облаков, так, чтобы был виден ее рельеф (данные получены с радаров, которые были установлены на космическом аппарате «Магеллан»). Снимки адаптированы по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Рис. 9.3. Сравнительные масштабы газовых гигантов (для сравнения показаны Земля и Солнце). Снимки адаптированы по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Какие планеты еще остались? Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Все это газовые гиганты (рис. 9.3), иное семейство планет. Опять же, они гораздо более похожи друг на друга, чем на Плутон.

Юпитер вращается по орбите, следующей после Марса. Он состоит в основном из водорода и гелия. Во внешних слоях юпитерианской атмосферы есть метановые и аммиачные облака. Полосы на Юпитере – это облачные пояса, а Большое красное пятно, хорошо заметное на картинке, – это вихрь, бушующий уже более 300 лет. Сатурн похож на Юпитер, но его окружают величественные кольца. Эти кольца состоят из частиц льда, вращающихся на орбите планеты. Уран и Нептун похожи на них, но не такие крупные. У Урана есть тонкие кольца (как и у Юпитера, но у нас на картинке они не показаны). В 1989 году космический аппарат «Вояджер-2» обнаружил, что на Нептуне также есть огромный вихрь, Большое темное пятно, скорость ветра в котором превышает 2400 километров в час. Повторные наблюдения, выполненные космическим телескопом «Хаббл» пять лет спустя, показали, что Большое темное пятно исчезло.

Планеты земной группы образовались во внутренней части Солнечной системы. Там было достаточно тепло, чтобы легкие элементы, гелий и

водород, разогрелись до высоких температур и преодолели гравитацию планет. Газовые гиганты, сформировавшиеся во внешней части Солнечной системы, холоднее, поэтому они удержали свой водород и гелий и получились очень массивными. Планеты земной группы и газовые гиганты – это два разных семейства планет. Их свойства сравниваются в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Планеты Солнечной системы

	Планеты земной группы				Газовые гиганты			
	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Большая полуось орбиты (а. е.)	0,39	0,72	1,00	1,52	5,20	9,55	19,2	30,1
Период обращения (лет)	0,24	0,62	1,00	1,88	11,9	29,5	84,0	165
Диаметр/ $Д_{земл}$	0,38	0,95	1,00	0,53	11,4	9,0	3,96	3,86
Масса/ $М_{земл}$	0,055	0,82	1,00	0,11	318	95,2	14,5	17,1
Основные вещества, из которых состоит	Fe, Si, O	(Fe, Si, O)?	Fe, Si, O, Mg	Fe, Ni, S, Si, O	H, He	H, He	H, He, CH_4	H, He, CH_4
Состав атмосферы	Следы O, Si, H, He	Густой CO_2, N_2	O_2, N_2	Разреженный CO_2	H_2, He	H_2, He	H_2, He, CH_4	H_2, He, CH_4
Температура (°C)	–173 ... 427	+438 ... +470	–91,2 ... +56,7	–153 ... +35	–160	–190	–224	–218

Примечание. Дана температура (в градусах Цельсия) на поверхности твердых планет (весь наблюдаемый диапазон) и в верхних слоях атмосферы газовых гигантов.

Плутон никуда не вписывается. Все эти десятилетия мы просто не обижали Плутон, сохраняя за ним место в компании планет, хотя в глубине души понимали, что ему там делать нечего. Достаточно посмотреть в книги конца 1970-х годов (когда мы наконец определились с размерами и массой Плутона) и 1980-х годов – и сразу видно, что Плутон начинают сравнивать с кометами, астероидами и прочими «отбросами» Солнечной системы. Это

были первые предвестники полноценного разжалования Плутона из числа планет.

Орбита Плутона также небезупречна. Во-первых, как уже отмечалось, она пересекает орбиту Нептуна. Планеты так не летают. Никаких но. Во-вторых, его орбита существенно наклонена к плоскости, в которой лежат орбиты всех других планет. Это тоже вопиющий факт. Свойства орбиты Плутона просто неприменимы к орбитам планет. Затем, в 1992 году, на одном из блинк-компараторных снимков удалось заметить на окраине Солнечной системы еще один объект, постепенно перемещающийся со временем, – еще одно ледяное тело за орбитой Нептуна. С тех пор было открыто более тысячи таких объектов. На что похожи их орбиты? Все они расположены за орбитой Нептуна, причем по склонению и эксцентриситету многие из них напоминают орбиту Плутона (*эксцентриситет* – это мера, характеризующая степень отклонения формы орбиты от окружности). Эти свежеобнаруженные ледяные тела образуют абсолютно новый класс объектов в нашей Солнечной системе. Поскольку все они мелкие и льдистые, как предсказал в свое время Джерард Койпер[9], их совокупность именуется *поясом Койпера*. Орбита Плутона частично проходит по внутреннему краю этого пояса, как и орбиты большинства других ледяных тел. Теперь стало понятнее, откуда взялся Плутон. У него есть братишки. Дом. Плутон родом из пояса Койпера.

Учитывая, что Плутон – самый крупный из известных объектов пояса Койпера, разве не логично, что первым из всего этого пояса был обнаружен наиболее заметный и яркий представитель? Церера была открыта первой из астероидов – и до сих пор более крупных астероидов не найдено. Сторонники Плутона поначалу настаивали, что он слишком велик, чтобы считаться одним из объектов пояса Койпера. Но он вращается рядом с остальными подобными объектами, имеет такой же состав и схожие орбитальные свойства. Смотрим на пояс Койпера и отмечаем среднее расстояние от каждого из объектов до Солнца, а затем соотносим расстояние с эксцентриситетом. Находим скопление таких объектов, период вращения находится в орбитальном резонансе 3:2 с Нептуном. Это соотношение означает, что за каждые три оборота Нептуна вокруг Солнца такой объект из пояса Койпера успевает совершить два оборота вокруг Солнца – точно как Плутон. Все объекты из пояса Койпера, для которых характерно такое соотношение, называются *плутино*. Они схожи с Плутоном даже сильнее, чем с остальными объектами из пояса Койпера.

Итак, мы на нашей выставке в Роуз-центре поместили Плутон в одном ряду с другими объектами из пояса Койпера. Мы даже не утверждали, что

Плутон – не планета. Просто физические свойства значили для нас больше, чем ярлыки.

Целый год нас никто не трогал, пока 21 января 2001 года в газете *New York Times* не вышла судьбоносная статья «Плутон – не планета? Только в Нью-Йорке». Написал ее научный журналист Кеннет Чанг:

Памела Кёртис из Атланты прогуливалась по Роуз-центру мимо выставки планет и вдруг… озадаченно почесала бровь. Планет не хватало. Она стала считать по пальцам, припоминая мнемоническую фразу, которую сынишка год назад выучил в школе: «Мама Варит Земляничный Морс, а Юный Сын Уже Не Плачет». Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон. «Я всю ее обошла, недоумевая, которая из них потерялась. Плутон! Плутона не хватало», – рассказывает она. «Теперь я знаю, что Юный Сын Уже Не… что? Фраза обрывается», – говорит миссис Кёртис. Американский институт естественной истории тайком исключил Плутон из числа планет… по-видимому, так больше не поступили ни в одном крупном научном учреждении… «Мы не собираемся об этом спорить, – заявил доктор Нил Деграсс Тайсон, директор Хейденского планетария, – кстати, вы довольно внимательны, раз заметили недостачу.

Я старался быть дипломатичным. Мы не говорили «планет всего восемь», или «мы выперли Плутон из Солнечной системы», или «Плутон мелковат, чтобы мы тут, в Нью-Йорке, его ваяли». Нет. Мы просто чуть изменили подачу информации – вот и всё. А газета *New York Times* устроила нам всенародное судилище.

Статья продолжалась так:

Все-таки странный поступок: по-видимому, музейщики в одностороннем порядке занизили статус Плутона, приравняв его к трем с лишним сотням ледяных глыб, чьи орбиты расположены за Нептуном, в так называемом поясе Койпера.

Да, Плутон вращается там в кругу подобных ему ледяных глыб. Он там живет. Мы узнали об этом в 1990-е годы, когда было открыто множество других ледяных тел, похожих на Плутон. У нас появились новые данные, и мы стали лучше понимать, как устроена Солнечная система.

Автор статьи цитирует моего коллегу, доктора Ричарда Бинзеля, профессора из Массачусетского технологического института, – мы вместе учились в аспирантуре – и Бинзель был расстроен, так как посвятил часть своей научной карьеры исследованию Плутона. В статье он заявил: «Они перегнули палку, разжаловав Плутон, большинство серьезных астрономов

их мнения не разделяет». Затем директор отделения планетологии Американского астрономического общества, доктор Марк Сайкс, позвонил в *New York Times* и сообщил, что собирается в Нью-Йорк, чтобы подискутировать со мной, и пригласил журналистов на эти дебаты. Они согласились. Прислали другого репортера и другого фотографа, чтобы запечатлеть и записать нашу с Сайксом беседу, назначенную у меня в кабинете, а затем дословно процитировали ее в статье от 13 февраля 2001 года. Кстати, мы, захватив с собой фотографа, наведались в галерею, где вывешены модели газовых гигантов, и доктор Сайкс в шутку напал на меня, игриво ухватив за шею. Подпись к снимку гласила: «Доктор Марк Сайкс требует от доктора Тайсона объяснений, почему тот так обошелся с Плутоном на выставке планет в планетарии Хейдена».

Новость попала в Интернет, засветилась на сайте журнала *Wired*, на сайте boston.com. «Центр усомнился, правомерно ли считать Плутон планетой». Повсюду об этом говорили. Я потратил три месяца жизни на перелопачивание новостей, больше ничего не делая. Вот вам избранные комментарии из чатов:

«Плутон – подлинно американская планета, открытая американцем». Это написал ученый из NASA. Кто-то в этом чате ему ответил: «Романтике не место в науке, ведь романтика – это система, противопоказанная при поисках объективной истины. Национализму тоже не место». Вот еще один комментарий в нашу пользу: «Признаюсь, меня разочаровывает такое сообщество грамотных людей, члены которого упрямо цепляются за устаревшую классификацию, словно астрологи». Хотите разозлить астронома – сравните его с астрологом. Это как вызов на дуэль.

Следующий собеседник постарался выкрутиться: «Лично я считаю, что Плутон заслуживает двойного гражданства». Это был президент комиссии по наименованию планет в составе Международного астрономического союза – он не хотел никого обижать. Еще? «Я не согласен с двойным статусом, поскольку в таком случае проблема станет слишком запутанной для широкой общественности». Это был не кто иной, как Дэвид Леви. Воплощенный кумир всех охотников за кометами. Он открыл более 20 комет, и все они названы в его честь. Даже знаменитая комета, которая врезалась в Юпитер в 1994 году, была открыта с его участием и называлась комета «Шумейкеров – Леви 9[10]». Дэвид Леви переживал, что плохо вводить широкую общественность в замешательство. Я думаю, мы ведем немало запутанных исследований, но не должны переделывать науку лишь для того, чтобы не смущать публику. Еще кто-то прокомментировал: «Право, удивительно, что астрофизик Тайсон вообще

сунулся в эту область. Я специализируюсь на геологии планет, но разве я вправе лишать Магеллановы Облака их текущего статуса и разжаловать их из галактики – спутника Млечного Пути в обычное звездное скопление… Поэтому я думаю, что Тайсон несет чушь». Это был еще один специалист из NASA.

А вот еще один комментарий: «Вполне представляю себе таких же современников Галилея, которые говорили: “Меня с детства учили, что Земля – центр Вселенной. Почему я должен это пересматривать? Меня и так все устраивает”».

Каждый ученый должен нормально относиться к тому, что научные знания меняются. Постепенно научишься и полюбишь задавать себе вопросы. Харон, спутник Плутона, лишь вполовину меньше него по диаметру. Вполне можно утверждать, что Плутон не планета со спутником, а скорее двойная планета. На самом деле, их общий центр масс находится даже не внутри Плутона, а где-то между двумя телами. Просто для сравнения: центр масс системы Земля – Луна находится в недрах Земли, примерно в полутора тысячах километров под земной корой. Нет, нельзя сказать, что Земля стационарна, а Луна вращается вокруг нее. Оба тела вращаются вокруг общего центра масс, но Земля просто немного покачивается, а Луна описывает полноценную орбиту. Плутон достаточно массивен, чтобы иметь форму шара. Харон тоже. Если считать Плутон планетой, то и Харон нужно считать планетой, как и многие другие мелкие объекты, которые, однако, достаточно массивны и имеют форму шара.

Плуто, песик из мультфильмов Уолта Диснея, впервые появился на экране в 1930 году – в том самом году, когда Клайд Томбо открыл Плутон. Для американского духа они ровесники. Дисней – один из столпов нашей культуры, так что, думаю, если бы мы лишили Меркурий статуса планеты, никто бы не возмущался. Но мы разжаловали Плутон. Кто такой Плуто? Это собака Микки-Мауса. Это важный персонаж для американцев. Часть нашей культуры. Кстати, почему Плуто – собака Микки-Мауса, а не Микки-Маус – мышонок Плуто? Задумывались об этом? По законам диснеевского пантеона, если персонаж носит одежду, то у него могут быть животные, которые одежду не носят. Гуфи – собака, но он одевается и умеет разговаривать, так что он не чей-то домашний питомец. Микки-Маус носит штанишки. А у Плуто нет ничего, кроме ошейника, он обычно не разговаривает – поэтому может быть собакой у мыши. Таков диснеевский мир.

Позвольте мне завершить аргументацию. У меня большая библиотека, и некоторым книгам не одна сотня лет. По этим книгам отчетливо видно,

как развивались представления о нашем месте в космосе. Есть книга 1802 года. Знаете, что тогда произошло? Люди размышляли о том, что расстояние между орбитами Марса и Юпитера в нашей Солнечной системе слишком велико, и полагали, что там должна быть еще одна планета. Такой промежуток не может пустовать. В 1801 году, изрядно постаравшись, итальянский астроном Джузеппе Пиацци нашел в этом промежутке планету. Он назвал ее Церера (в честь древнеримской богини урожая). Все воодушевились, еще бы – открыта новая планета! Вы слышали о такой планете? Нет. В одной из книг того времени есть иллюстрация, на которой изображены орбиты всех планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Церера, Юпитер, Сатурн и планета Гершель (ее еще не успели переименовать в Уран). Церера в списке есть.

В 1781 году, когда Уильям Гершель открыл Уран, большим вопросом было то, как его назвать, поскольку с глубокой древности никто никогда не обнаруживал новых планет (Майкл Лемоник в своей книге о Гершеле утверждает, что и Коперник заслуживает чести первооткрывателя одной из планет – ведь именно он доказал, что Земля является планетой). Будучи английским астрономом немецкого происхождения, Гершель хотел назвать свою планету в честь своего покровителя – короля Георга III. Он так и именовал ее: *Georgium Sidus* (Звезда Георга). Именно этому королю Георгу была адресована Декларация о независимости США. Король Георг отметил заслугу Гершеля, пожаловав ему довольствие в размере 200 фунтов в год, с условием, что тот будет устраивать астрономические вечера для короля и его гостей в Виндзорском дворце, чтобы гости могли посмотреть в телескоп. В те времена список планет был таким: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Церера, Юпитер, Сатурн, Георг.

К счастью, рассудок возобладал, и решили подобрать подходящего древнеримского бога, чьим именем можно было бы окрестить планету Георг. Иоганн Боде предложил «Уран» в честь древнегреческого бога небес, и это название закрепилось. Немецкий химик Мартин Клапрот так этим воодушевился, что назвал в честь новой планеты только что открытый элемент уран. Как правило, каждая планета именуется в честь древнеримского бога, а ее спутники – в честь персонажей, сыгравших заметные роли в жизни аналогичного ему древнегреческого бога. Возьмем, к примеру, Юпитер. Его крупнейшие спутники называются Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Эти герои древнегреческой мифологии тесно связаны с Зевсом, верховным древнегреческим богом, а Юпитер – верховный древнеримский бог. Таким образом астрономы увековечивали персонажей как из древнегреческой, так и из древнеримской мифологии. Однако в

случае с Ураном (чтобы задобрить британцев, чьего короля пришлось принизить) традиция была нарушена, и все спутники Урана называются в честь персонажей английской художественной литературы. Почти все имена – из Шекспира. Я назвал дочь Мирандой в честь одного из спутников Урана, но в ту пору я лишь знал, что у Урана есть такой спутник. Когда я предложил жене: «Давай назовем Мирандой», она ответила: «О, это же героиня шекспировской “Бури”!» Я ответил: «Да… и ее я тоже имел в виду!»

Но вернемся к Церере. Возьмем другую книгу, которая вышла 30 лет спустя. «Начала теоретической астрономии» – сложный учебник. В нем много математики. Там перечислено уже десять известных планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Церера, Юнона, Паллада, Юпитер, Сатурн, Уран. Они обозначались соответствующими символами (– Венера, – Земля, – Марс и так далее). Нептун к тому моменту еще не открыли. Но новые планеты множились, и для каждой требовался собственный символ. Всего насчитывалось уже десять планет. В чем же проблема? У слова «планета» не было четкого определения. Этот термин недвусмысленно понимали в Древней Греции: «планета» в переводе с древнегреческого означает «странствующая». Если вы посмотрите на ночное небо и заметите объект, движущийся на фоне звезд, – то это планета. Какие видимые небесные тела движутся на фоне звезд? Это Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн и еще два – Луна и Солнце. Семь планет Вселенной. Это недвусмысленное определение. Но Коперник установил в центре Вселенной Солнце, а Землю поместил на околосолнечную орбиту. В таком случае, можно ли по-прежнему считать Солнце планетой? А что насчет Земли? Земля – планета? Если да, то планеты – это небесные тела, вращающиеся вокруг Солнца. Кометы также вращаются вокруг Солнца, но это тела неправильной формы, у которых вдобавок есть хвосты, так что мы не считаем их планетами. Но это решение во многом условное. Когда между Марсом и Юпитером были открыты четыре новых небесных тела – Веста, Юнона, Церера и Паллада, определенно не являющиеся кометами, – их также причислили к планетам. Через несколько лет обнаружилось уже 70 с лишним таких тел. И знаете, что оказалось? Они были схожи друг с другом более, чем с какими-либо иными телами Солнечной системы, и их орбиты лежали в одном и том же поясе. Мы открыли в Солнечной системе новый регион, в котором находятся объекты совершенно нового типа. Сегодня мы именуем их *астероидами*, это слово придумал Уильям Гершель. Он обнаружил, что астероиды просто крошечные по сравнению со «старыми» планетами, и настаивал, что они относятся к совершенно

новому классу небесных тел. Объекты, которые ранее именовались «планетами», были переквалифицированы в новую категорию. Еще важнее, что при этом обогатились наши знания о структуре Солнечной системы. База знаний расширилась, соответственно углубилось и понимание. Все это произошло примерно через 10 лет после публикации «Начал теоретической астрономии». Плюс, полагаю, никому не хотелось выдумывать все новые символы.

Диаметр Плутона впятеро меньше диаметра Земли – Плутон маленький, как и все остальные объекты из пояса Койпера. На рис. 9.4 мы сравниваем с Землей оставшиеся объекты Солнечной системы, диаметр которых превышает 254 километра (кроме Солнца и планет). Здесь есть наша Луна, а также крупные спутники других планет. Показаны четыре крупнейших спутника Юпитера (их открыл Галилей, впервые направивший в небо свой телескоп). Ганимед, самая большая юпитерианская луна, немного превышает по размеру Меркурий, но по массе уступает Меркурию более чем вдвое. Ио и Европа испытывают гравитационное воздействие других спутников, а также сминаются и, соответственно, разогреваются под действием приливных сил Юпитера. Ио усеяна действующими вулканами. Под десятикилометровой ледяной коркой, покрывающей Европу, – водяной океан глубиной 80 километров. В океане Европы больше воды, чем во всех океанах Земли. По аналогичным причинам на южной оконечности Энцелада, небольшого спутника Сатурна, под полярной шапкой раскинулся океан, и там есть величественные водяные гейзеры. На Титане, самом крупном спутнике Сатурна, – метановые озера и атмосфера, состоящая преимущественно из азота. На Титане идут метановые дожди, там есть замерзшие русла метановых рек. Темные пятна – это области, покрытые метаново-этановым льдом, а светлые – водяной лед. На Тритоне, крупном ледяном спутнике Нептуна, есть великолепные гейзеры (вероятно, извергающие азот). Тритон вращается вокруг Нептуна в ретроградном направлении, возможно, это тело из пояса Койпера и Нептун его просто захватил. На рисунке также показаны крупнейшие астероиды и крупнейшие объекты из пояса Койпера, известные по состоянию на 2010 год. Цереру, самый большой астероид, открыли первой. Второй по величине астероид – Веста; она богата железом. Возможно, когда-то давно ее поверхностные слои просто снесло при столкновении с другим астероидом. Все астероиды каменные, а все объекты пояса Койпера – ледяные. Плутон и Харон показаны такими, какими их считали в 2010 году (исходя из колебаний их яркости при взаимных затмениях). Эрис изображен немного крупнее Плутона – в 2010 году считалось, что так и

есть, однако уточненные измерения 2015 года показали, что Эрис (диаметром 2326 ± 12 км) немного меньше Плутона (диаметр 2374 ± 8 км). Все объекты из пояса Койпера меньше нашей Луны.

Я вкратце изложил научную подоплеку истории с Плутоном, но теперь давайте вернемся к нашей истории. Что было дальше? Нас заваливали письмами. «Если Плутон останется планетой, музею придется потратиться на конструирование модели. Люди могут жаловаться, что им придется покупать новые постеры, но кого это волнует? Они стоят по три доллара». Это написал семиклассник: «Что не так с Плутоном? Вам не нравится, что он особенный? Поэтому вы отказываете ему в праве считаться планетой? В таком случае это расизм». Расизм?

Вот другая тема: «Теперь учителям придется рассказывать на уроках, что планет восемь, хотя еще в прошлом году их было девять. Студенты, особенно младших курсов, запутаются – а я запомнил планеты при помощи мнемоники “Мама Варит Земляничный Морс, а Юный Сын Уже Не Плачет”. И мне, и многим другим ребятам эта мнемоника всегда помогала запоминать планеты. Как же теперь их заучивать? Я еще ребенок, но понимаю, что творится».

Мы в Роуз-центре не подсчитываем планеты. Вопрос вроде «Как называется четвертая планета от Солнца?» может встретиться на экзамене. Это не наука. Мы в Роуз-центре не говорили, что Плутон – не планета, мы даже не акцентировали слово «планета». Мы указываем, что все тела в Солнечной системе объединяются в семейства. Например, члены семейства «планеты земной группы» характеризуются общими признаками, которые отличают их от других небесных тел. Пояс астероидов – уже другое семейство, объединяющее небольшие каменные тела. Газовые гиганты – третье. Объекты пояса Койпера, и в том числе Плутон, орбита которого пролегает близ внутренней границы этого пояса, также обладают схожими свойствами. Далее расположена область, заполненная ледяными телами и окружающая Солнце со всех сторон, – это Облако Оорта, в котором обретаются кометы.

Спутники
Нептуна
Протей
Тритон
Нереида
Урана
Миранда
Ариэль
Умбриэль
Титания
Оберон
Сатурна
Мимас
Энцелад
Тетис
Диона
Рея
Титан
Гиперион
Япет
Юпитера
Ио
Европа
Ганимед
Каллисто
Луна
Все известные тела Солнечной системы
диаметром более 254 км

Рис. 9.4. Тела Солнечной системы (за исключением Солнца и планет) диаметром не менее 254 км, показанные с соблюдением масштаба (для сравнения – Земля). Снимки адаптированы по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Все объекты, вращающиеся вокруг Солнца, мы разделили на пять семейств. Такова наша педагогическая парадигма. Важно, каковы общие свойства у объектов в каждом из этих семейств. Третьеклассник может выучить, что газовые гиганты большие и сравнительно неплотные. Они надуты, как пляжные мячи. Если взять кусочек Сатурна и бросить в ванну –

он будет плавать. Когда я был маленьким, мне всегда хотелось купаться с игрушечным Сатурном, а не с резиновой уточкой – я думал: вот было бы круто!

Думаю, Плутону в поясе Койпера теперь уютнее – там он среди своих. Причисляя Плутон к настоящим планетам, мы упускали из виду его фундаментальные свойства. Если бы мы переместили Плутон на орбиту Земли, у него вырос бы хвост, как у кометы, – определенно, планеты так себя не ведут.

Пока Плутон не стал стесняться своей крохотности, вот вам урок смирения: Юпитер по сравнению с Землей еще крупнее, чем Земля по сравнению с Плутоном (сравните рис. 9.3 и 9.4). Таким образом, если бы вы провели опрос среди жителей Юпитера (юпитерианцев), поинтересовавшись у них, сколько планет в Солнечной системе, эти существа ответили бы: четыре. Вы бы спросили: «А как же все остальные планеты? Земля, например?», юпитерианец бы вам ответил: «Эти булыжники? Мусор? Шарики-бродяжки?». Итак, я веду к тому (мы ведем к тому), что Плутон нельзя считать планетой не только из-за размера. Гораздо весомее аргументы, связанные с его физическими и орбитальными свойствами.

В 2005 году Майк Браун и его коллеги из Калтеха (Калифорнийского технологического института) открыли в поясе Койпера объект под названием Эрида. По диаметру Эрида почти не уступает Плутону, но при этом на 27 % массивнее (см. рис. 9.4). У Эриды есть небольшой спутник Дисномия, параметры орбиты которого позволили точно определить массу Эриды, и Эрида несомненно тяжелее Плутона. Налицо спорная ситуация. Если Плутон – планета, то и Эриду нужно считать планетой. Два выхода: понизить статус Плутона или повысить статус Эриды. Международный астрономический союз (МАС) – официальный орган, принимающий такие решения – на своем съезде в 2006 году провел специальное заседание, где ставили на голосование вопрос о том, считать ли планетами Плутон, Эриду и другие тела из пояса Койпера. Что в итоге? Плутон разжаловали и причислили к карликовым планетам. Новости об этом событии разлетелись по всему миру. Авторы книг пометили себе, что настоящая планета должна: (1) вращаться вокруг Солнца, (2) быть достаточно массивной для поддержания гидростатического равновесия и (почти) круглой формы, а также (3) вымести весь мусор с орбиты. Плутон (как и Церера) не соответствует третьему критерию – он вращается в окружении других объектов, чья общая масса сопоставима с его собственной. Большинство астрономов, и Майк Браун в том числе, трактуют «очистить орбиту» таким

образом: планета должна быть наиболее массивным телом в районе своей орбиты. В конце концов, Юпитер окружают более 5000 «троянских астероидов», сгруппированных в окрестностях *точек Лагранжа* на орбите Юпитера и либо опережающих его при вращении на 60°, либо запаздывающих за ним на 60°. Но общая масса таких астероидов просто мизерна по сравнению с массой Юпитера. МАС не разжаловал Юпитер. МАС подтвердил, что в Солнечной системе есть восемь планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун: «Мама Варит Земляничный Морс, а Юный Сын Уже Насытился». Плутон, Эрида и Церера, удовлетворяющие двум первым критериям, – это малые планеты, которые еще называют «карликовыми». Таким образом, Роуз-центр, исключивший Плутон из числа планет, опередил время на 6 лет. Я написал книгу «Секреты Плутона. Восход и закат любимой американской планеты» (2009), в которой рассказал об этих событиях в моей жизни. Майк Браун написал прекрасную книгу об открытии Эриды под названием «Как я убил Плутон и почему это было неизбежно» (2010). Сегодня кроме Харона у Плутона открыты еще четыре более мелких спутника. У Эриды один спутник, а у Хаумеа (это еще один объект из пояса Койпера, ныне также причисленный МАС к карликовым планетам) – два. В 2006 году к Плутону отправился космический аппарат NASA «Новые горизонты». На борту – щепотка праха Клайда Томбо. В 2015 году аппарат облетел Плутон и Харон, сделав красивые снимки обоих (рис. 9.5). На Плутоне заметен льдистый регион, напоминающий по форме сердечко, который предварительно назван «Область Томбо», а на полюсе Харона виднеется темное пятно, которое неофициально называется «Мордор» (это Страна Тьмы из книги «Властелин Колец»). Итак, с Плутоном все хорошо.

Рис. 9.5. Снимки Плутона и Харона, сделанные при облете космическим аппаратом «Новые горизонты». Фотография NASA

Глава 10
Поиски жизни в Галактике

Автор: Нил Деграсс Тайсон

Мы – живые существа, поэтому нас особенно интересует жизнь во Вселенной. Если мы осматриваемся во Вселенной и обращаем внимание на то, есть ли у конкретной звезды планеты и пригодны ли они для жизни, то разумно формулировать вопросы, исходя из представлений об известной нам (земной) живой материи. Кажется, что все живые существа обладают некоторой совокупностью общих признаков. Во-первых, любые известные нам живые существа нуждаются в жидкой воде. Во-вторых, жизнь связана с потреблением энергии. Мы обладаем метаболизмом, это химический феномен. И, самое интересное, жизнь сама себя воспроизводит. Я сосредоточусь на первом признаке, поскольку воду можно обнаружить при помощи астрофизического инструментария. Нам всего лишь нужно отыскать во Вселенной жидкую воду.

С тех пор как нам прочитали сказку о Златовласке[11], мы знаем (и соглашаемся), что предметы и вещества могут быть «слишком холодными», «слишком горячими» и «в самый раз». Возьмем, например, Солнце. Известно, что оно обладает определенной светимостью. Чем ближе к Солнцу, тем жарче становится, чем дальше – тем холоднее. Допустим, для жизни нужна жидкая вода. Возьмем воду и чересчур приблизимся к Солнцу – вода испарится. Чересчур отдалимся – тогда замерзнет. Таким образом, логично предположить, что есть некий набор орбит, находясь на одной из которых планета будет стабильно содержать жидкую воду. Ближе к Солнцу – пар, дальше от Солнца – лед, а между ними – жидкая вода. Эта область получила название «*зона обитаемости*». Такая концепция играет важную роль в научных представлениях начиная с 1960-х годов, когда ее впервые сформулировали. У разных звезд, в зависимости от их светимости, размеры зоны обитаемости будут отличаться, и здесь есть повод для размышления. Фрэнк Дрейк немного развил эту концепцию и составил так называемое уравнение Дрейка. Это уравнение не похоже на те, что описывают законы Ньютона. Скорее оно позволяет оценить степень нашего незнания о распространенности разумной жизни во Вселенной.

Прежде чем я расскажу вам об уравнении Дрейка, озвучу одну вещь: исходя из всего, что мы знаем о жизни, считается, что для жизни требуется

планета. Это должна быть планета, вращающаяся вокруг звезды. Сначала должна возникнуть звезда, около нее – планета, а затем (учитывая, как медленно развивается жизнь на Земле) нужны миллиарды лет, чтобы эволюция привела к возникновению разумных существ. Следовательно, звезда должна быть долгоживущей. Не все звезды таковы. Некоторые не успевают дотянуть и до миллиарда лет, а могут сгореть и всего за 100 миллионов лет. Самые массивные звезды гибнут всего за 10 миллионов лет – и разумным существам, обитающим на планете около такой звезды, практически не на что рассчитывать, если случай Земли хоть сколь-нибудь показателен. Нужна долгоживущая звезда и планета, но не какая угодно планета, а такая, которая вращается в зоне обитаемости этой звезды.

Итак, известно, что мы должны искать долгоживущую звезду, в зоне обитаемости которой имеется планета, причем такая планета, на которой возникла жизнь. Разумная жизнь. На протяжении большей части истории Земли могучие микроорганизмы – цианобактерии – грубо перекраивали ее атмосферу под себя. Сегодня мы сетуем, что человек загрязняет окружающую среду, из-за нашей деятельности возникают озоновые дыры и накапливаются парниковые газы, например CO_2. Но наше влияние просто меркнет по сравнению с тем, что учинили цианобактерии с земной атмосферой 3 миллиарда лет назад. В ту пору атмосфера Земли была богата углекислым газом – и все было нормально. Затем явились цианобактерии, слопали весь CO_2 и насытили атмосферу кислородом, полностью поменяв ее химический состав и баланс. Атмосфера Земли наполнилась кислородом, а углекислого газа в ней почти не осталось. На самом деле, кислород ядовит для многих анаэробных организмов того периода. Диоксид углерода – парниковый газ. Когда его запасы истощились, парниковый эффект ослаб, и на Земле стало стремительно холодать. Если бы в те времена существовала партия «зеленых», ее активисты могли бы протестовать: «Прекратите кислородное загрязнение! Вы отравляете Землю!» – ведь наступали перемены. Земля остывала и несколько раз полностью замерзала. Тем временем Солнце медленно, но верно разгоралось, за миллиарды лет его светимость возросла и периоды под названием «Земля-снежок» прекратились. В конце концов благодаря атмосферному кислороду возникли самые разные животные, и в том числе люди. Не все перемены однозначно губительны для всех организмов.

Мы беспокоимся, что следующий астероид с нами покончит. Говорю вам, покончит. Неизвестно когда, но это произойдет, и это будет тяжелый день для Земли. В прошлый раз, когда Земля пережила крупное

столкновение с астероидом (это было 65 миллионов лет назад), с лица планеты исчезли динозавры[12]. В подлеске уже сновали наши предки-млекопитающие размером с нынешних грызунов. Королевскому тираннозавру и другим ужасным хищникам этой мелюзги хватало буквально на один укус. Но после столкновения Земли с астероидом от королевских тираннозавров и мокрого места не осталось, а млекопитающие смогли эволюционировать, превратившись в довольно представительных существ. Эти события запустили новую историю, которая привела к возникновению современной культуры и общества: мы получили путевку в жизнь, а заодно природа избавила нас от свирепых динозавров. Поэтому я стараюсь трактовать изменения на Земле в более целостном виде.

Мораль этой истории такова: если мы хотим вступить в контакт с обитателями планеты, пригодной для жизни, то наличия инопланетной жизни как таковой еще недостаточно. Нас интересует разумная жизнь. Даже больше. Исаак Ньютон был разумен, но с ним нельзя было пообщаться с другого конца Галактики. Во времена Ньютона не было технологий, которые позволили бы ему отправлять сигналы в космические дали. Разумная жизнь, которую мы ищем, должна обладать нужными технологиями в ту эпоху, на которую приходятся наши наблюдения. Иными словами, если цивилизация удалена от нас на 1000 световых лет, то ее представители должны были отправить сигнал 1000 лет назад – и только сейчас он нас достигнет. Теперь предположим, что в саму технологию заложена возможность злоупотребления ею. Если некоторые технологии попадут в руки невежественных или безответственных людей, то такие технологии могут с нами покончить гораздо вернее, чем любая естественная катастрофа. Сколько может продлиться период, пока мы не самоуничтожимся из-за такой фатальной оплошности? Возможно, всего 100 лет. Если осмотреться в Галактике, то мы только при большом везении найдем планету, в пятимиллиардной истории которой идет именно такое столетие. Поэтому вероятность обнаружить таким образом космических друзей по переписке действительно очень мала.

Фрэнк Дрейк учел все эти аргументы и на их основе вывел свое уравнение. Так начался поиск внеземного разума – проект SETI. Дрейк хотел оценить количество способных на контакт цивилизаций, связаться с которыми мы можем уже сейчас: Nc. Для этого он включил в уравнение несколько этапов деления, причем каждый член уравнения – это самостоятельный оценочный показатель, взятый на основе современных астрофизических данных:

$N_c = N_s \times f_{HP} \times f_L \times f_i \times f_c \times (L_c/\text{возраст Галактики})$,

где

N_c – количество готовых к контакту цивилизаций, которые мы можем наблюдать в Галактике сегодня;

N_s – количество звезд в Галактике (около 300 миллиардов);

f_{HP} – доля звезд, в зоне обитаемости которых вращается планета, пригодная для жизни, ~0,006;

f_L – доля планет из этого числа, где жизнь развивается; величина неизвестна, но, вероятно, близка к 1;

f_i – доля планет из этого числа, где развивается разумная жизнь; величина неизвестна, но, вероятно, довольно мала;

f_c – доля планет, населенных разумными существами, уровень технологического развития которых допускает межзвездный контакт; величина неизвестна, но, вероятно, близка к 1;

L_c – средний срок существования цивилизации, способной к контакту; величина неизвестна, но, вероятно, мала по сравнению с возрастом Галактики; и

возраст Галактики – около 10 миллиардов лет.

Начнем с количества звезд в галактике Млечный Путь, их около 300 миллиардов. Поскольку не каждая звезда в Галактике подходит для жизни, это количество нужно умножить на дробную величину – число долгоживущих звезд (которые горят достаточно долго, чтобы возле них могла сформироваться жизнь), а также имеющих планету в зоне обитаемости (f_{HP}). Таким образом, уменьшается общее число планет, на которых можно искать разумную жизнь. На момент написания этой книги, по результатам героической работы, в ходе которой было исследовано более 150 000 звезд, подтверждено существование более 3000 экзопланет. Это была настоящая революция.

Оказывается, звезды, у которых есть планеты, – обычное явление, и у многих звезд по несколько планет. Среди таких звезд мы ищем те, чьим планетам посчастливилось оказаться в зоне обитаемости. Экзопланеты можно находить по гравитационному воздействию, которое планета оказывает на родительскую звезду. В результате притяжения планеты угловая скорость звезды немного колеблется, и такое явление можно засечь. Чем ближе планета, тем заметнее колеблется угловая скорость звезды под влиянием ее гравитации и тем легче это обнаружить. Поэтому относительно несложно находить планеты, вращающиеся поблизости от

своей звезды, но на таких планетах слишком жарко и жидкой воды там быть не может – они не вписываются в уравнение Дрейка. Крупнейший проект по поиску экзопланет выполнен при помощи космического телескопа «Кеплер» силами NASA. «Кеплер» ищет экзопланеты, фиксируя крошечный спад яркости звезды, когда планета проходит по диску звезды и пересекает линию взгляда. Такое явление называется «*транзит*». Радиус Юпитера составляет 10 % от солнечного. Площадь поперечного сечения Юпитера (πr^2) – 1 % от аналогичной площади Солнца. Поэтому когда планета размером с Юпитер проходит мимо диска звезды, напоминающей по типу Солнце, яркость этой звезды временно падает на 1 %. Планета размером с Землю, чей радиус составляет 0,01 % от солнечного, уменьшает яркость такой звезды на 0,01 %. Телескоп «Кеплер» достаточно зорок, чтобы улавливать даже такие незначительные потускнения звезды, ведь его конструировали прежде всего для поиска землеподобных планет, но подобная точность – почти предел его возможностей. Многие планеты, открытые «Кеплером», сопоставимы по размеру с Юпитером или Нептуном (а такие планеты, насколько нам известно, непригодны для жизни), но попадаются и более мелкие, размером практически с Землю. На рис. 10.1 подтвержденные землеподобные планеты, найденные «Кеплером», показаны как точки. По оси ординат откладывается радиус планеты по сравнению с земным, а по оси абсцисс – радиус планетной орбиты в астрономических единицах. Большинство планет, открытых «Кеплером», вращаются вокруг звезд, похожих на Солнце. Жирные линии пересекаются в той точке, где на данной схеме находилась бы Земля. Нас интересуют экзопланеты, расположенные близ этой точки.

Транзиты удобнее всего фиксировать у планет, расположенных близко к звезде. Поэтому на всех планетах, открытых «Кеплером», слишком жарко, чтобы там могла существовать жизнь. Если планета вращается достаточно далеко от звезды и температура на ней благоприятствует жизни, то для обнаружения транзита такой планеты ее орбита должна пролегать точно по линии обзора. А поскольку период орбитального вращения у такой планеты дольше, она совершает меньше транзитов, и засечь ее сложнее. До сих пор телескоп «Кеплер» обнаружил всего около 10 планет размером в 1–2 диаметра Земли. Эти планеты получают от своих звезд примерно вчетверо больше света, чем Земля. Просто такие планеты сложнее искать методом транзитов.

Рис. 10.1. Экзопланеты, открытые космическим телескопом «Кеплер» (по состоянию на сентябрь 2016 года), с указанием их радиусов и расстояний от звезды. Точками обозначены более 1000 подтвержденных экзопланет, причем, по оси ординат откладывается радиус планеты (по сравнению с земным), а по оси абсцисс – расстояние каждой из планет от звезды (в астрономических единицах, а.е.). Все эти планеты были обнаружены при транзите по диску звезды (из-за такого транзита звезда немного тускнеет). Жирные линии пересекаются в той точке, где на этой схеме находилась бы Земля. Рисунок Майкла Стросса по данным NASA

Один из многообещающих кандидатов – это планета Кеплер 62е (на рис. 10.2 показано, какой ее изобразил художник). Это одна из пяти планет,

вращающихся вокруг звезды спектрального класса K, названной «Кеплер 62» и расположенной примерно в 1200 световых лет от нас. Температура на поверхности этой звезды – около 4900 K. Радиус Кеплер 62e в 1,61 раза больше земного, и планета получает от звезды всего на 20 % больше лучистой энергии на квадратный метр, чем Земля получает от Солнца. Она должна находиться в зоне обитаемости. Это может быть либо скалистая планета, либо планета-ледышка, на поверхности которой плещется океан. Эта система, состоящая из нескольких планет, примерно на 2,5 миллиарда лет старше Солнечной системы.

Какова доля звезд ($f_{\text{НР}}$), в зоне обитаемости которых есть подходящая планета? Звезды спектрального класса G (к которому относится и Солнце) составляют примерно 8 % от общего количества звезд в галактике Млечный Путь. Нам известно, что они благоприятствуют жизни, ведь Солнце – одна из таких звезд. Те звезды, светимость которых значительно выше солнечной, выгорают слишком быстро, поэтому сложная разумная жизнь просто не успеет сформироваться на планете около такой звезды (ведь на Земле жизнь развивалась несколько миллиардов лет[13]). Более тусклые звезды (спектральные классы K и M) горят гораздо дольше Солнца, поэтому и они вполне удовлетворяют данному требованию.

Но звезды спектрального класса M из главной последовательности обладают столь низкой светимостью, что зона обитаемости, где должна находиться планета, располагается практически вплотную к звезде. Будучи так близко, планета окажется в зоне приливного захвата звезды и все время останется обращена к ней одним и тем же полушарием. Приливные захваты на малых расстояниях становятся мощнее. Из-за них планета приобретает чуть вытянутую эллиптическую форму и ее вращение замедляется до тех пор, пока эллипс не зафиксируется в направлении родительской звезды. (Наша Луна именно таким образом попала в зону приливного захвата и всегда обращена к Земле одной стороной). Планете, конечно, «все равно», а вот живым организмам на ее поверхности придется несладко: в одном полушарии планеты, постоянно обращенной одной стороной к звезде класса M, всегда будет слишком жарко, в другом – слишком холодно. Атмосфера, подобная земной, в холодном полушарии просто вымерзнет. В таком случае атмосфера из горячего полушария перетечет на холодную сторону и также вымерзнет, этот процесс станет лавинообразным. В конце концов вся атмосфера «ссыплется» на холодную сторону и с жизнью на планете будет покончено. Единственная лазейка остается на планете с очень плотной атмосферой, циркуляция которой

будет сглаживать экстремальные перепады температур между разными полушариями. Давление такой атмосферы у поверхности планеты будет очень велико. Кроме того, на звездах класса M возникает гораздо больше звездных вспышек, чем на Солнце, что также может быть фатально для жизни. Возможно, все эти факторы не поставят крест на существовании жизни, но наверняка значительно усложнят ее развитие.

Рис. 10.2. Планета Кеплер 62e по сравнению с Землей. Художник на свое усмотрение изобразил планету Кеплер 62e, но относительные размеры соблюдены. Орбита этой планеты, по-видимому, лежит в зоне обитаемости, поэтому на планете могут быть океаны жидкой воды. Снимок предоставлен PHL@UPRArecibo

Поэтому при поисках жизни наиболее многообещающими вариантами остаются звезды спектральных классов G и K, а на их долю приходится целых 20 % от всех светил Млечного Пути.

Допустим, есть такая звезда – каковы же шансы найти планету в ее зоне обитаемости?

Сейчас я покажу вам один из шедевров космической математики; впрочем, лучше судите о его красоте сами. Я всего лишь хочу продемонстрировать, что у вас уже есть все инструменты, необходимые для

такого расчета.

Солнце обладает светимостью. Земля также обладает светимостью; наша планета имеет определенную температуру и поэтому испускает излучение, преимущественно в инфракрасной части спектра; речь идет о так называемом *тепловом излучении*. Поскольку Земля обладает температурой, она излучает во всем спектре в соответствии с планковской кривой, соответствующей данной температуре. Общая светимость Земли вычисляется как энергия, излучаемая на единицу площади, умноженная на общую площадь Земли. Для начала вычислим площадь Земли, $4\pi r^2_{\text{ЗЕМЛ}}$, и умножим ее на энергию, излучаемую на единицу площади Земли, то есть на $T^4_{\text{ЗЕМЛ}}$ (по закону Стефана – Больцмана, описывающему тепловое излучение). Следовательно, светимость Земли равна $L_{\text{ЗЕМЛ}} = 4\pi r^2_{\text{ЗЕМЛ}} T^4_{\text{ЗЕМЛ}}$. То же самое справедливо и для Солнца: $L_{\text{СОЛН}} = 4\pi r^2_{\text{СОЛН}}\sigma T^4_{\text{СОЛН}}$. Теперь давайте выясним, какая доля солнечной светимости достается Земле. Пусть температура Земли и варьируется, фактически она колеблется вблизи довольно постоянных средних значений. В равновесном состоянии энергия, получаемая Землей от Солнца, должна быть сбалансирована с энергией, испускаемой с поверхности Земли. Это обязательное условие, в противном случае Земля бы быстро перегрелась или остыла, наблюдаемые средние значения бы не сохранялись. Эти уравнения встречались нам и ранее, но теперь мы нашли им новое применение – рассчитать равновесную температуру Земли.

Таким образом, солнечная светимость $L_{\text{СОЛН}}$ достается Земле лишь *частично*. Нас интересует не общая энергия Солнца, излучаемая во всех направлениях, а лишь та энергия, что попадает на Землю. В конечном итоге вся эта часть солнечной энергии пересекает сферическую поверхность, радиус которой равен радиусу земной орбиты (1 а.е.). Нужно определить, какую часть этой сферической поверхности фактически перекрывает Земля. Та часть поверхности, которая существенна для Земли, – та часть, где Земля успевает перехватывать солнечную энергию, – равна поперечному сечению Земли.

Следовательно, доля солнечного излучения, попадающая на Землю, – это результат деления поперечного сечения Земли $\pi r^2_{\text{ЗЕМЛ}}$ на площадь большой сферы, радиус которой равен 1 а. е., через которую проходит все излучение Солнца: $4\pi(1\text{ а. е.})^2$.Соответственно эта доля равна $\pi r^2_{\text{ЗЕМЛ}}/4\pi(1\text{ а. е.})^2$.Таким образом, суммарная доля солнечной светимости, которая достается Земле, равна $4\pi r^2_{\text{СОЛН}}\sigma T^4_{\text{СОЛН}}\pi r^2_{\text{ЗЕМЛ}}/4\pi(1\text{ а. е.})^2$. Если мы

находимся в равновесном состоянии, то можем приравнять эту величину к испускаемой светимости Земли, $4\pi r_{ЗЕМЛ}^2 \sigma T^4_{ЗЕМЛ}$.Давайте запишем уравнение: $4\pi r^2_{СОЛН}\sigma T^4_{СОЛН}\pi r^2_{ЗЕМЛ}/4\pi(1\text{ а. е.})^2 = 4\pi r^2_{ЗЕМЛ}\sigma T^4_{ЗЕМЛ}$. В левой части есть члены $4\pi/4\pi$, они сокращаются.$\pi r_{ЗЕМЛ}^2$ присутствует и в левой, и в правой части уравнения, также сокращается, наконец, σ в обеих частях тождества тоже сокращается. Остается формула $r^2_{СОЛН}T^4_{СОЛН}/(1\text{ а. е.})^2 = 4T_{ЗЕМЛ}^4$.

Теперь можно вычислить равновесную температуру Земли $T_{ЗЕМЛ}$.Для начала запишу тождество $T^4_{ЗЕМЛ} = r^2_{СОЛН}T^4_{СОЛН}/4(1\text{ а. е.})^2$.Чтобы оно выглядело красивее, извлеку из обеих частей уравнения корень четвертой степени, чтобы осталось $T_{ЗЕМЛ} = T_{СОЛН}\sqrt{r_{СОЛН}}/(2\text{ а. е.})$.

Итак, это простейшая форма данного уравнения. Но именно оно нам и требуется – это уравнение позволяет узнать температуру Земли. Давайте подставим в него значения: радиус Солнца равен 696 000 км, а 2 а.е. = 300 000 000 км. Разделим радиус Солнца 696 000 км на 300 000 000 км. Каков ответ? 0,00232. Каков квадратный корень из этого числа? 0,048. Какова температура поверхности Солнца? 5778 К. Умножим эту величину на 0,048 и получим равновесную температуру Земли: 278 К. Как известно, 273 К = 0 °С, точка замерзания воды. Действительно, средняя температура Земли находится вблизи этого значения. Но подождите, я кое-что упустил. В этом уравнении мы считаем Землю абсолютно черным телом, но ведь Земля поглощает не всю получаемую энергию. Часть солнечных лучей отражается от белых облаков, а также от белых полярных шапок. На самом деле Земля рассеивает в космос примерно 40 % энергии, получаемой от Солнца. Именно эта доля излучения не участвует в формировании температуры Земли. Если учесть в уравнении и этот множитель, то равновесная температура Земли опустится. Повторив вычисления, обнаружим, что равновесная температура оказывается минусовой. Да, вы не ошиблись: естественная равновесная температура Земли, расположенной в космосе именно на таком расстоянии от Солнца, должна быть ниже точки замерзания воды. Согласно нашим предыдущим выкладкам, на Земле не должно быть жидкой воды, а значит, и жизни. Но Земля изобилует жизнью. Значит, температура оказывается выше благодаря еще какому-то фактору. Вы угадали: все дело в парниковом эффекте. Инфракрасное излучение, испускаемое планетой, не утекает в открытый космос, а поглощается атмосферой, и атмосфера при этом нагревается; об этом шла речь в главе 2. Захваченное таким образом инфракрасное

излучение подогревает поверхность Земли. Соответственно на Земле становится теплее благодаря парниковому эффекту. Оказывается, земной парниковый эффект примерно уравновешивает ее альбедо[14], поэтому наши расчеты в итоге довольно точны.

Из нашего чудесного уравнения $T_{ЗЕМЛ} = T_{СОЛН}\sqrt{r_{СОЛН}}/(2\ а.е.)$ понятно, что температура конкретной планеты, вращающейся вокруг конкретной звезды (с учетом отражательной способности и парникового эффекта этой планеты), будет обратно пропорциональна квадрату расстояния между планетой и звездой. Данное уравнение позволяет вычислить внутреннюю и внешнюю границу зоны обитаемости для данной конкретной планеты; обозначим эти пределы $r_{мин}$ и $r_{макс}$. На внутреннем пределе зоны обитаемости данной планеты (расстояние $r_{мин}$ от звезды) вода на поверхности близка к точке кипения. Если атмосферное давление равно земному, то вода кипит при температуре 373 К, или 100 °С. При $r_{мин}$, на внутреннем пределе зоны обитаемости, поверхностная температура планеты равна 373 К. Вода замерзает при 0 °С, или 273 К; это происходит на внешнем пределе зоны обитаемости. Следовательно, планета на внутренней границе зоны обитаемости была бы жарче, чем та же самая планета на внешней границе зоны обитаемости с коэффициентом 373/273. Отношение $r_{макс}/r_{мин}$ равно $(373/273)^2$, или 1,87. Таким образом, внешний край зоны обитаемости планеты всего на 87 % шире внутреннего края ее зоны обитаемости. Это узкое пространство.

С учетом поправки на наблюдательную селекцию данные «Кеплера» свидетельствуют, что примерно у каждой десятой солнечноподобной звезды (спектральные классы G и K) есть планета, сопоставимая по размеру с Землей (радиус такой планеты составляет 1–2 земных радиуса), причем интенсивность излучения, получаемого ею от звезды, составляет от 1/4 до четырехкратного уровня относительно аналогичного показателя для Земли. Таким образом, примерно у 10 % солнцеподобных звезд есть похожая на Землю планета, расположенная на расстоянии от 0,5 а.е. до 2 а.е. от своей звезды. Дело в том, что интенсивность излучения убывает по закону обратных квадратов. Планета, удаленная от звезды на 2 а.е., получает вчетверо меньше света, чем Земля, а планета, удаленная на 0,5 а.е., – вчетверо больше. Согласно данным «Кеплера», планеты, похожие на Землю, равномерно распределены по логарифму расстояний от своих звезд. Что это означает? Если взять все планеты, расположенные на расстоянии от 0,5 а.е. до 2 а.е. до звезды, то половина из них окажется на отрезке от 0,5 а.е. до 1 а.е., а другая половина – на отрезке от 1 а.е. до 2 а.е. Промежуток

от 0,5 а.е. до 1 а.е. – множитель 2. Границы интервала от 0,5 а.е. до 1 а.е. различаются в 2 раза, интервала от 1 а.е. до 2 а.е. – тоже в 2 раза. На интервалы с одинаковым отношением границ приходится равное число планет. Планеты, расположенные на расстоянии 0,5 а.е. от звезды, могут быть обитаемы, если у них высокое альбедо и низкий парниковый эффект. Но если бы мы поместили на таком расстоянии от звезды нашу Землю, ее океаны бы вскипели. Аналогично, если отодвинуть Землю на расстояние 2 а.е., ее океаны замерзнут. Однако если бы на расстоянии 2 а.е. вращалась планета с низкой отражательной способностью и сильным парниковым эффектом, то она могла бы достаточно прогреваться, чтобы на ней существовала жизнь. Предел $r_{макс}/r_{мин}$ для конкретной планеты, обладающей конкретной отражательной способностью и конкретным парниковым эффектом, узок: 1,87. Теперь учтем, что $1{,}87^{2{,}2} \approx 4$. Грубо говоря, надо 2,2 раза умножить на себя 1,87, чтобы получить 4 – отношение границ пригодного для жизни диапазона от 0,5 до 2 а.е. для звезды, похожей на Солнце. Если на эти отрезки «по 1,87» приходится примерно равное количество планет, то, случайным образом выбрав землеподобную планету где-то между 0, 5 и 2 а.е., то с вероятностью 1: 2,2 (или примерно 45 %) мы случайно попадем в диапазон $r_{макс}/r_{мин} = 1{,}87$, в котором планета будет пригодна для жизни (при имеющейся отражательной способности и парниковом эффекте).

Если 20 % звезд в Галактике отвечают нужным критериям (это звезды спектральных классов G и K) и примерно у 10 % из этих звезд есть планеты, сопоставимые по размеру с Землей и получающие от 1/4 до 4-кратного количества излучения, достающегося Земле, *и* если около 45 % этих планет окажутся в зоне обитаемости (то есть на них будет жидкая вода при парниковом эффекте и отражательной способности, характерных для данной конкретной планеты), то доля $f_{НР} = 0{,}2 \times 0{,}1 \times 0{,}45 = 0{,}009$.

Это упражнение вышло утомительным, но все-таки помогло прояснить многие вещи. Вооружившись математикой и астрофизикой, мы отыскиваем около звезд такие регионы, где можно было бы встретить жизнь, напоминающую земную.

Но чтобы планета входила в число таких кандидатов, должны соблюдаться и иные критерии. Так, на планете должна быть достаточно плотная атмосфера. Если планета невелика (сопоставима по размеру с Луной), то ее тяготение будет столь слабым, что молекулы газов при температуре 278 K просто улетучатся в космос и никакой атмосферы на планете не останется (вот почему у Луны своей атмосферы фактически

нет). Но мы уже рассуждаем о таких планетах, чей радиус равен земному или вдвое больше, поэтому такие планеты должны хорошо удерживать атмосферу. Орбита планеты не должна обладать чрезмерным эксцентриситетом. Если орбита является кеплеровским эллипсом и обладает эксцентриситетом e, то отношение максимального расстояния между ней и звездой $r_{макс}$ к минимальному расстоянию между ними $r_{мин}$ равно $r_{макс}/r_{мин} = (1 + e)/(1 – e)$. Аналогично можно утверждать, что $e = ([r_{макс}/r_{мин}] – 1)/(r_{макс}/r_{мин}] + 1)$. В таком случае если орбита планеты – идеальная окружность, то $e = 0$. Если орбита очень вытянута, то значение e приближается к 1 (это действительно так для многих комет). Вы догадываетесь, к чему я клоню: нам не подходит планета, орбите которой соответствует значение $r_{макс}/r_{мин} > 1{,}87$, ведь в таком случае ее океаны вымерзнут или выкипят. Таким образом, планета должна вращаться по орбите с эксцентриситетом $e < 0{,}30$, поскольку именно при таком условии она никогда не будет выходить за пределы зоны обитаемости (в противном случае драгоценная жидкая вода на ней замерзнет или выкипит). Если повстречаете инопланетянина, можете сказать ему: «Готов поспорить: эксцентриситет орбиты твоей родной планеты меньше 0,30». Вероятно, он будет изрядно впечатлен.

Эксцентриситет земной орбиты составляет всего 0,017. Это не случайно, ведь в таких условиях у нас хороший климат без резких перепадов. Вернее, не случайно, что мы развились на планете с таким небольшим эксцентриситетом орбиты. К счастью (для тех, кто ищет жизнь), орбиты большинства открытых «Кеплером» планет земного типа обладают очень небольшим эксцентриситетом. Зачастую такие миры встречаются в многопланетных системах, где в результате орбитальных взаимодействий между планетами эти орбиты постепенно округляются. Планета стабилизируется на орбите, которая достаточно удалена от орбит иных планет. «Кеплер» открыл, что в многопланетных системах период орбитального вращения каждой последующей планеты обычно превышает период орбитального вращения предыдущей как минимум вдвое. В соответствии с третьим законом Кеплера ($P^2 = a^3$) это означает, что орбита последующей планеты будет больше орбиты предшествующей в среднем как минимум в $2^{2/3}$, или 1,6. Этот коэффициент близок к 1,87, отношению $r_{макс}/r_{мин}$ для планеты, расположенной в своей зоне обитаемости. Возможно, нам повезет, и мы найдем две планеты на более близких орбитах, либо найдем поближе к звезде планету с более высокой отражательной способностью и пониженным парниковым эффектом, либо

найдем подальше от звезды планету с низкой отражательной способностью и сильным парниковым эффектом, но в среднем предполагается, что в большинстве звездных систем должна иметься максимум одна планета, пригодная для жизни.

Когда-то считалось, что в двойных звездных системах планеты существовать не могут. Поскольку более половины звезд в Галактике – двойные, можно было уменьшить количество систем-кандидатов вдвое. Но космический телескоп «Кеплер» нашел планеты в двойных звездных системах. Планета может быть обитаемой, если в системе присутствуют две звезды, похожие на Солнце и вращающиеся одна вокруг другой на расстоянии 0,1 а.е., а рассматриваемая планета удалена от них на √2а. е. = 1,41 а.е. Тогда планета будет получать столько же света, сколько и Земля. Просто в небе будет два солнца (как на планете Татуин из IV эпизода «Звездных войн»). Две звезды, расположенные так близко друг к другу, не нарушат динамику планеты. Но если в системе будет две похожие на Солнце звезды, расстояние между которыми составляет около 1 а.е., в этой системе будет сложно найти зону обитаемости, где могла бы существовать стабильная планетная орбита, поскольку планета будет постоянно попадать в зону преимущественного тяготения то к одной, то к другой звезде. Если же две звезды, похожие на Солнце, вращаются одна вокруг другой на расстоянии более 10 а.е., это, опять же, неплохо; планета может вращаться вокруг одной из звезд на расстоянии 1 а.е., а другая звезда будет светить вдалеке. Столь удаленные друг от друга звезды также не нарушат стабильность орбиты, и в подобной системе не будет слишком жарко. Разумеется, нечего делать и в системе с одной массивной звездой – она превратится в красный гигант много раньше, чем на планете успеет развиться разумная жизнь.

Три этих дополнительных фактора – атмосфера, эксцентриситет и сложности с двойными звездами – видимо, уменьшают вероятность того, что в зоне обитаемости звезды найдется планета, но и суммарно все они, пожалуй, не понижают f_{HP} вдвое. Поэтому я бы уменьшил показатель f_{HP} с 0,009 чуть ниже чем до ~0,006.

Когда Фрэнк Дрейк впервые выводил свое уравнение в 1960-е годы, еще не было известно ни одной экзопланеты. Поэтому значение f_{HP} было просто версией. Но сегодня у нас есть данные, позволяющие уточнить эту оценку. Именно так и должно работать это уравнение. Оно стимулирует нас собирать данные и находить особенности.

Результат f_{HP} ~ 0,006 воодушевляет. Посмотрим, что выясняется в

таком случае. Ближайшая звезда удалена от нас на 4 световых года. Уйдем в 10 раз дальше – на 40 световых лет. Объем сферы радиусом 40 световых лет будет в 1000 раз больше, чем у сферы радиусом 4 световых года, и в этой большой сфере окажется около 1000 звезд. Если мы в среднем оцениваем $f_{\text{НР}}$ ~ 0,006, то в таком радиусе должно быть как минимум 6 потенциально обитаемых планет. Да, на расстоянии всего 40 световых лет от Солнца могут быть планеты, пригодные для жизни! То есть серии из первого сезона «Звездного пути», летящие во все стороны со скоростью света в виде электромагнитных волн, уже достигли какой-то жизнепригодной планеты, на поверхности которой есть жидкая вода.

В 1970-е годы Британское межпланетное общество провело исследование под названием «проект Дедал», в ходе которого проверялось, насколько возможны межзвездные перелеты. Был смоделирован двухъярусный корабль высотой 190 метров, работающий на термоядерном двигателе, заправленном 50 000 тонн дейтерия и гелия-3. Такой корабль примерно вдвое длиннее и в 16 раз массивнее ракеты «Сатурн V», доставившей астронавтов на Луну. Этот колоссальный корабль с термоядерной тягой мог бы развить скорость в 12 % от скорости света. Он мог бы нести 500 тонн полезной научной нагрузки, в том числе два пятиметровых оптических телескопа и два двадцатиметровых радиотелескопа. Такой корабль преодолел бы 40 световых лет за 333 года. Телеметрия с него достигла бы Земли еще за 40 лет – соответственно мы получили бы отклик от «Дедала» через 373 года.

Еще лучше взять ракету таких же размеров и заправить ее веществом и антивеществом. Такая задача очень сложна с инженерной точки зрения: ведь вещество должно быть надежно изолировано от антивещества до тех самых пор, пока они не соединятся в двигателе. Однако при сгорании такого топлива 100 % массы преобразуется в энергию по уравнению Эйнштейна $E = mc^2$. Такой процесс гораздо эффективнее термоядерного синтеза с участием дейтерия и гелия-3 (которые превращаются в гелий-4 и водород), ведь в последнем случае лишь 0,5 % массы горючего превращается в энергию. Заправившись горючим из вещества и антивещества, корабль такого размера мог бы принять на борт десятерых астронавтов и доставить их на пригодную для обитания планету, до которой не более 40 световых лет. Разгон корабля начинался бы при ускорении 1g (9,8 метра в секунду за секунду, таково ускорение свободного падения у поверхности Земли) в течение первых 4,93 года. Астронавтам было бы комфортно – они могли бы ходить по салону корабля точно как на

Земле. Постепенно корабль достиг бы 98 % скорости света. Он шел бы с такой скоростью на протяжении 32,65 года и, наконец, перешел бы в режим торможения на последние 4,93 года (перед этим ракета повернулась бы задом наперед). Астронавты прибыли бы к месту назначения через 42,5 года после старта. Благодаря открытым Эйнштейном релятивистским эффектам (о них Рич подробнее расскажет в главах 17 и 18), при полете на такой высокой субсветовой скорости астронавты состарились бы за время полета всего на 11,1 года, но на Земле за это время минуло бы 42,5 года. Даже если бы на разработку такой вещественно-антивещественной топливной технологии потребовалось еще два века (после запуска первой ядерной ракеты), то корабль на антивеществе все равно обогнал бы ядерную ракету на пути к цели.

Чтобы во всех этих расчетах был какой-то смысл, нужно сначала отыскать пригодную для жизни планету. Сорок световых лет – это 12 парсеков. Если планета вращается на расстоянии 1 а.е. от своей звезды, а эта звезда расположена в 40 световых годах от нас, то планета будет находиться в небе на расстоянии 1/12 секунды дуги от своей звезды. Космический телескоп «Хаббл», диаметр зеркала которого равен 2,4 метра, уже обеспечивает разрешение в 0,1 секунды дуги. Если бы у космического телескопа было зеркало диаметром 12 метров, то оно давало бы разрешение в 1/50 секунды дуги. Если экранировать яркое изображение звезды специальным затмевающим диском, который позволяет минимизировать воздействие слепящего рассеянного звездного света, то, в принципе, можно заметить планету, удаленную от звезды всего на 1/12 секунды дуги. В настоящее время собирают космический телескоп Джеймса Уэбба, его запуск запланирован на 2018 год. Он оснащен составным зеркалом диаметром 6,5 метра. Космический телескоп следующего поколения, возможно, позволит находить и фотографировать землеподобные планеты в зоне обитаемости на расстоянии до 40 световых лет. Планета может быть зеленой (если покрыта растительностью) или голубой (если на ней большие океаны). Можно изучить спектр такой планеты и определить, есть ли в ее атмосфере кислород – своеобразный биомаркер, побочный продукт фотосинтеза и других химических реакций, выдающих присутствие жизни.

Если умножить количество звезд в Галактике (300 миллиардов) на число $f_{\text{НР}}$ (0,006) и на этом остановиться, то получится симпатичное число, примерное количество планет в зоне обитаемости: 1,8 миллиарда. Оно огромно. Но считаются не все. Из всех планет, расположенных в зоне

обитаемости, нас интересует доля f_L, на которых присутствует какая-либо жизнь. Еще интереснее не просто жизнь, а разумная жизнь, или доля f_i. Какова доля планет, на которых может быть разумная жизнь? Вскоре я вернусь к этим членам уравнения.

К чему мы пока пришли? Мы пытаемся вычислить долю долгоживущих звезд, вокруг которых в зоне обитаемости вращаются планеты, причем нас интересуют планеты, на которых существует разумная жизнь, и доля f_c из их числа – такие планеты, жителям которых известны технологии, обеспечивающие межзвездную коммуникацию.

Последняя доля в уравнении Дрейка – это цивилизации, пытающиеся установить контакт с нами именно в ту эпоху, когда мы их наблюдаем. Это период времени в истории Галактики, когда такая цивилизация «активна». Если в произвольном порядке оглядеть Млечный Путь, то нам попадутся и «новорожденные» планеты, и «зрелые», и «старые». Вероятность найти планету, обитатели которой готовы к контакту в произвольный момент в истории Галактики, равна средней долговечности коммуницирующей цивилизации, разделенной на возраст Галактики. И это тоже доля. Последняя. Перемножив все эти доли, а также умножив их произведение на исходное количество звезд, получим N_C – количество существующих в Галактике цивилизаций, с которыми мы потенциально могли бы связаться прямо сейчас.

В этом и есть суть уравнения Дрейка. Некоторые из упомянутых долей известны довольно точно. Например, мы знаем долю долгоживущих звезд, поскольку понимаем, как устроена Главная последовательность на диаграмме Герцшпрунга – Рассела. Мы осмотрелись и уже открыли много планет. Неплохо. Какова среди них доля тех планет, что сопоставимы по размеру с Землей и находятся в зоне обитаемости? Мы лишь оценили эту величину, воспользовавшись статистическими данными телескопа «Кеплер». Пока все складывается оптимистично.

Кроме того, мы обнаружили «лазейку» в аргументации о зоне обитаемости. На Европе, спутнике Юпитера, есть океан жидкой воды глубиной 80 километров, покрытый десятикилометровой коркой льда. Как я уже говорил, в этом «всеевропейском» океане больше воды, чем во всех океанах Земли. Но Европа находится далеко за пределами солнечной зоны обитаемости. Как же она согрелась? Она вращается вокруг Юпитера вместе с еще тремя большими спутниками. Другие спутники в соответствии с законами Ньютона воздействуют на ее орбиту, поэтому Европа то подлетает поближе к Юпитеру, то, наоборот, отдаляется от него. Когда

Европа приближается к Юпитеру, его приливная гравитационная сила сплющивает несчастную луну, приобретающую слегка продолговатую форму. Когда Европа улетает подальше, ее «отпускает», и она вновь становится почти шарообразной. Из-за такой постоянной «формовки» Европа разогревается, лед тает и на спутнике сохраняется жидкий океан. Кто-то должен проспонсировать экспедицию к Европе: нужно слетать туда, пробурить ледяной щит и поупражняться в подледном лове. (Для этого вполне подойдет небольшой бур с плутониевым подогревом, который мог бы не просто сверлить, но и попутно прожигать лед.) Интересно, клюнет или нет? Если там найдутся живые существа, их вполне можно будет назвать «европейцами»! На Энцеладе, спутнике Сатурна, также есть подледный океан. Поэтому если оценивать долю f_{HP}, просто сосчитав планеты, которые получают нужную дозу тепла от своей звезды, то эту величину разумно несколько увеличить, присовокупив к этим планетам такие спутники, как Европа. Они находятся далеко за пределами зоны обитаемости, но все-таки за счет приливных воздействий на них сохраняется жидкая вода. В таком случае концепцию «зона обитаемости» требуется понимать шире.

Какая доля из этих жизнепригодных тел действительно обжита? То есть какова величина f_L? Об этом показателе мы можем судить на основе лишь одной планеты – Земли. Биологи гордятся земным биоразнообразием. Но я подозреваю, что если мы найдем инопланетную жизнь, это существо будет отличаться от обитателей Земли сильнее, чем любые земные организмы – друг от друга.

Насколько разнообразна жизнь на Земле? Встанем в ряд! Получился изрядный зоопарк. Здесь есть крошечные бактерии, еще более миниатюрные вирусы, медузы, омары, белые медведи. Приведу другой пример. Допустим, вы никогда не бывали на Земле, а кто-то возвращается оттуда и с жаром вам рассказывает: «Я повстречал экзотическую форму жизни. Эта тварь выслеживает добычу по инфракрасному излучению. У нее нет ни рук, ни ног, но это опасный хищник, загоняющий дичь. Знаешь что еще? Эта тварь может заглотить существо впятеро крупнее собственной головы». Вы сразу отвечаете: «Хватит фантазировать». Но кого я только что описал? Змею. У змеи нет ни рук, ни ног, но она неплохо устроилась в жизни – со змеиной точки зрения. Ползает себе с раскрытой пастью и пожирает добычу крупнее собственной головы.

Какие еще формы жизни? Есть дубы, есть люди. Я хочу подчеркнуть, что все эти разнообразные формы жизни населяют одну и ту же планету. У

нас общая ДНК, нравится это вам или нет. У любых двух существ на Земле найдутся общие участки ДНК. Все мы связаны, химически и биологически.

Нынешний возраст Земли – около 4,6 миллиарда лет. Когда Солнечная система была молода, в ней оставалось немало мусора, сохранившегося со времен изначального формирования системы. Врезаясь в большие планеты, эти осколки причиняли там настоящие разрушения. На планеты продолжали сыпаться крупные камни и ледяные глыбы, при этом на планетах в огромном количестве запасалась энергия. Кинетическая энергия преобразовывалась в тепловую, твердые породы каменных планет плавились и при этом стерилизовались. Все это продолжалось около 600 миллионов лет. Если вы хотите подсчитать, когда началась история жизни на Земле, то оценка 4,6 миллиарда лет будет завышенной, поскольку в ту пору поверхность Земли была исключительно враждебна для жизни. Если нас интересует, когда развилась жизнь, то нужно отправиться примерно на 4 миллиарда лет назад – к тому времени поверхность Земли достаточно остыла, на ней сложились условия для существования жидкой воды и образования сложных молекул. Именно тогда и нужно включать секундомер.

В старину секундомеры использовались для хронометража на спортивных соревнованиях. На таком устройстве была кнопка, и стоило вам ее нажать, как секундомер начинал отсчитывать время, стрелки его крутились, пока вы вновь не нажимали на кнопку. Если вы включите на канале CBS новостную программу «60 минут» – это программа с богатой историей, транслируется по вечерам в воскресенье, – то заметите, что в начале и в конце каждого выпуска ведущий по-прежнему использует этот механический музейный экспонат. Это единственная телепередача, в заставке которой мы услышим не музыку, а просто тиканье секундомера.

Запустим секундомер 4 миллиарда лет назад; спустя 200 миллионов лет заметим первые признаки жизни на Земле. Известны цианобактерии возрастом 3,8 миллиарда лет. Доля потенциально обжитых планет, вращающихся в зоне обитаемости вокруг долгоживущих звезд, также выглядит оптимистично, прежде всего потому, что на нашей планете, которой выпал такой шанс, жизнь развилась за незначительный промежуток ее жизненного цикла. Мы по-прежнему в точности не знаем, как это произошло, – данный вопрос остается на переднем крае биологических исследований, – но могу вас заверить, что над ним работают ученые экстра-класса. Однако нам известно, что жизнь успела сформироваться всего за первые 200 миллионов лет из 4 миллиардов, минувших с тех пор. Если бы процесс зарождения жизни был сложен и

длителен, то, возможно, природа создавала бы ее на Земле миллиард лет или даже несколько миллиардов лет. Но нет. Потребовалась всего пара сотен миллионов лет, что позволяет уверенно рассчитывать, что доля f_L в уравнении Дрейка должна быть весьма высока, вероятно, около 1.

Разумеется, наши представления ограниченны, поскольку нам известна лишь та жизнь, что существует на Земле. В некоторых кругах эта проблема известна под названием «Жизнь как она есть», сокращенно – LAWKI (Life As We Know It). Мы просто не знаем, как еще можно уверенно рассуждать об этой проблеме. Можно написать много томов о той жизни, которой мы пока не знаем. Может быть, есть существа с семью ногами, тремя глазами, двумя ртами, и состоят они из плутония. Мы не знаем, как может выглядеть неизвестная нам жизнь, но можем определить, как сформулировать верные вопросы об этом. Это практический вопрос, а не философский. У нас есть известный образец жизни, и это мы, – пример всего один, но это достаточное доказательство существования жизни. Вы пытаетесь доказать, что феномен существует, – и вот оно, доказательство, только что сделанное селфи с вашего мобильника. Доказательство предъявлено. Итак, давайте отсюда и начнем. Мы знаем, что состоим из таких атомов, которые весьма распространены во Вселенной.

В одном из эпизодов телесериала «Звездный путь» экипаж «Энтерпрайза» сталкивается с кремниевой, а не с углеродной формой жизни. Мы – представители углеродной жизни, но кремний достаточно распространен во Вселенной. В серии «Звездного пути» кремниевое существо напоминало небольшую живую груду камней, которая словно колыхалась при движении. Это был очень творческий сюжетный ход. Продюсеры сериала «Звездный путь» пытались расширить парадигму представлений о том, с какой необычной жизнью экипаж мог повстречаться в Галактике. Оказывается, что кремний расположен в таблице Менделеева прямо под углеродом. Из курса химии вы, возможно, помните, что у всех элементов в одном столбце схожая структура электронных орбиталей. А если структуры орбиталей похожи, то и соединения с другими элементами они будут образовывать по схожему принципу. Уже известно, что существует углеродная жизнь – почему бы не вообразить себе кремниевую? Теоретически ничто нам не мешает. Но на практике оказывается, что углерода во Вселенной примерно вдесятеро больше, чем кремния. Кроме того, молекулы кремния образуют слишком тесные связи, поэтому неохотно участвуют в органической химии, которая состоит из сплошных экспериментов. Диоксид углерода – газ, а диоксид кремния – твердое тело

(песок). Мы даже обнаружили в межзвездном пространстве сложные и длинные органические молекулы-цепочки, например H-C C–C C–C C–C N (в этой молекуле тройные связи перемежаются с одинарными). В космосе есть ацетон $(CH_3)_2CO$, бензол C_6H_6, уксусная кислота CH_3COOH и многие другие органические соединения, просто плавающие в пространстве. Эти молекулы образовались в газовых облаках сами по себе. Терри Лавджой даже открыл комету, из которой испаряется спирт. Кремний не образует столь сложных молекул, его химия далеко не так интересна, как химия углерода. Итак, если хотите построить жизнь на основе какого-то химического элемента – берите углерод! Никаких сомнений. Какие бы существа ни обитали в Галактике, даже если мы с ними совсем не похожи, можно поспорить, что наша химия будет схожей – хотя бы по причине изобилия углерода в космосе и в силу того, как легко он образует атомные связи.

Из всех планет Солнечной системы жизнь сформировалась лишь на Земле, поэтому меня вполне устроит такая оценка: $(f_L) \sim 0{,}5$. Это среднее значение между 0 и 1, неопределенный показатель: пятьдесят на пятьдесят. Что дальше? Оценим, сколько планет вращается вокруг долгоживущих звезд в пределах зоны обитаемости, *на которых при этом есть разумная жизнь*. Здесь все не так радужно.

По какому бы принципу мы ни пытались измерить разумность обитателей Земли, человек займет лидирующие позиции. По-видимому, крупный мозг – это важно, и наш мозг велик, но мозг у слонов и китов еще больше; так что, вероятно, дело не только в объеме мозга. Может быть, в соотношении. Между массой мозга и всего тела. Возможно, именно от этого и зависит разумность. Мозг человека в соотношении с остальным телом крупнее, чем у любого другого представителя царства животных[15]. Мы задаем критерии, поэтому и оказываемся на вершине. Но, возможно, наше высокомерие мешает нам рассмотреть эту проблему с другой стороны. Давайте постулируем, что мы разумны, и определим разумность, как, скажем, способность особи решать алгебраические задачи. Если разум (который, по нашему утверждению, у нас есть) определяется именно так, то мы – единственный разумный вид на Земле. Дельфины под водой алгеброй не занимаются. Независимо от того, сколь сложным и осмысленным может показаться их поведение, алгеброй они не занимаются. Ни один другой вид на Земле до нас не занимался алгеброй – следовательно, мы разумны. Давайте в данном случае придерживаться такого определения. Допустим, мы ищем разумную расу, с

представителями которой хотели бы поговорить. По-английски мы, конечно, разговаривать не будем, но мы считаем, что есть язык, понятный в космических масштабах: это язык науки, математики.

Если разумность – важное качество для выживания вида, то не кажется ли вам, что в палеонтологической летописи попались бы ископаемые разумные существа? Но их не было. Тот факт, что мы обладаем разумом, еще не означает, что разум важен для выживания. Знаете, тараканы, скорее всего, переживут следующий глобальный катаклизм, и крысы переживут, а мы вымрем. Наши большие мозги нас тогда не спасут.

Правда, может быть, разум поможет нам избежать такой судьбы – ведь мы могли и динозавров спасти, если бы вмешались. В журнале *New Yorker* есть карикатура Фрэнка Котэма, на которой прогуливаются два неуклюжих динозавра, и один говорит другому: «Я просто считаю, что сейчас *самое время* разработать технологию, которая позволила бы сбивать астероиды с курса». Нам известно, что астероид уже летел к динозаврам, чтобы стереть их с лица Земли – навсегда. Возможно, силой нашего разума мы могли бы продлить естественный срок, отведенный нашему виду. Мы могли бы выйти в космос и упредить удар астероида – если бы в NASA были готовы финансировать такую работу. Но астероид не единственная угроза. Не менее опасны непредвиденно возникающие заболевания. Смотрите, что произошло с вязами в Америке. Большинство вязов в Новой Англии убил грибок, переносчиком которого оказались короеды. Представьте, что бы случилось, если бы подобная хворь напала на нас. В частности, все человечество мог бы погубить какой-нибудь новый вирус гриппа[16].

Разумность не гарантирует выживания. А вот зрение – очень важное качество. Органы зрения развились под действием естественного отбора у самых разных видов животных. Человеческий глаз структурно ничуть не похож на глаз мухи, который, в свою очередь, не имеет ничего общего с глазом морского гребешка. Хотя, по-видимому, существует всего лишь один первобытный ген, отвечающий за возникновение глаз, путь к столь непохожим глазам пролегал по разным эволюционным траекториям. Вероятно, зрение исключительно способствует выживанию. Что насчет движения – способа перемещаться в пространстве? У кленов нет ног, и бегать они не могут, зато есть семена-самолетики, которые далеко разносит ветер. Движение кажется важным, так как мы видим, какими разнообразными способами двигаются всевозможные живые существа: змеи ползают, омары ходят, медузы используют «реактивный двигатель», а бактерии – жгутики. Многие насекомые и большинство птиц летают. Люди ходят, бегают, плавают, ездят на машинах, поездах, лодках, самолетах и

ракетах, так что мы по-настоящему мобильны. Но мы – по-прежнему единственные из землян, кто занимается алгеброй, и из этого я делаю вывод, что развитие разума – далеко не неизбежный итог, к которому приходит любое древо жизни. Похожих взглядов придерживался эволюционный биолог Стивен Джей Гулд. Все это означает, что доля f_i может быть довольно мала. Таким образом, примем $f_i < 0{,}1$, осознавая, что на самом деле эта величина может быть гораздо ниже. Подобного мнения не разделяют некоторые из моих коллег, в частности сотрудники института SETI. Они просто требуют, чтобы величина f_i была высока – иначе что же они ищут? Им известно, что с бактериями пообщаться не получится.

Вероятно, развитие технологий является неизбежным результатом развития разума. Я бы предположил, что $f_c \sim 1$. Вам под силу алгебра, у вас пытливый разум, вы хотите упростить себе жизнь, получить свободное время – чтобы была возможность смотреть телевизор и так далее; при такой мотивации доля разумных существ, достигших технологического развития, должна быть высока. В конце концов, единственный известный нам вид, способный заниматься алгеброй, воплотил в жизнь технологии, пригодные для межзвездной коммуникации. Но если технология содержит ростки возможностей для злоупотребления той самой технологией (например, позволяет изобретать все более хитроумные способы уничтожения человека, а заодно и всей планеты), то, сожалею, срок существования технологичесой культуры, допускающей межзвездную коммуникацию, может оказаться ничтожен по сравнению с возрастом Галактики. В последней главе этой книги Рич излагает аргументы, связанные с принципом Коперника (согласно этому принципу, мы должны быть ничем не примечательны по сравнению с представителями других цивилизаций, отправляющих сигналы в космос). Рич считает, что средний срок существования такой цивилизации не должен превышать 12 000 лет. Если разделить этот срок на возраст Галактики, получится крошечная величина.

Смысл в том, чтобы подставить в уравнение Дрейка максимально адекватные оценки, а затем прикинуть, сколько может существовать цивилизаций, готовых к контакту. Есть целые книги, анализирующие члены этого уравнения. В них упорядочены наши размышления о поисках жизни.

Уравнение Дрейка фигурирует в одном из эпизодов фильма «Контакт», снятого в 1997 году по книге Карла Сагана и его жены Энн Друян. (Недавно я вел на телевидении новую версию передачи по книге «Космос» вместе с Энн и нашим коллегой Стивеном Сотером – вместе с Саганом они были

соавторами исходной версии сериала, вышедшей в 1980 году). Сюжет «Контакта» был достаточно продуман – так, авторы обошлись без изображения инопланетян. Действительно, а как бы они выглядели? Как они должны были выглядеть? Мы не знаем. Во второсортных фильмах 1950-х годов инопланетян всегда играли актеры, и у пришельцев с других планет всегда была голова, две руки, две ноги, эти пришельцы были прямоходящими. В 1982 году вышел фильм «Инопланетянин», где пришелец изображен как милое и забавное существо, но у него все равно два глаза, две ноздри, есть зубы, руки, шея, ноги, колени, ступни и пальцы. По сравнению с медузой инопланетянин почти не отличается от человека. Просто Голливуд не славится воображением. Как уже отмечалось, если бы вы попытались изобразить новую форму жизни, то лучше было бы выдумывать существо, которое отличается от земных организмов сильнее, чем любые два организма – друг от друга. Даже в космическом триллере «Чужой», снятом в 1979 году, инопланетная тварь выглядела уже довольно своеобразно (заметен творческий подход), но у нее все равно были голова и зубы.

Вернемся к «Контакту». Это была первая лента, на премьерный показ которой меня позвали. Я удостоился личного приглашения, поскольку много лет был другом Карла Сагана и Энн Друян. Два момента на этом мероприятии меня ошарашили – просто потому, что я нечасто бываю в Голливуде. Идешь по красной дорожке, вдоль которой выстроились фотографы, а потом заходишь в кинотеатр, который весь увешан постерами и украшен в стилистике фильма. Разумеется, выдают газировку и попкорн. Вот, я тянусь за стаканчиком попкорна и спрашиваю человека за стойкой: «Сколько стоит»? А он отвечает: «Пятьдесят долларов!» – ну, я в шоке, конечно. Посмаковав немного мое отчаяние, он объявляет: «Конечно, бесплатно». Я же, секунд пять поразмыслив над ситуацией, осознал: «Бесплатно, он должен был бесплатным. Ну как они могут брать деньги за попкорн на мировой премьере?» Попросил прощения, поспешно признался, что я недогадлив, с Восточного побережья приехал. А потом, после фильма, был прием. На каждом столике для коктейлей стоял маленький телескоп или другой причудливый астрономический прибор. Подумал, что это очень стильная находка, и поинтересовался, где они взяли такие настольные украшения: вероятно, одолжили в каком-то любительском астрономическом кружке. Хотелось узнать, ведь это, вероятно, был очень активный кружок, раз в нем нашлось столько оборудования. Так что подхожу к одному из организаторов и спрашиваю: «Скажите, а где вы взяли телескопы?» Он смерил меня таким взглядом, как

будто по умолчанию подразумевалось безмолвное «Вы идиот!», а потом сказал вслух: «Взяли в реквизите». Второй тупой вопрос за вечер от гостя с Восточного побережья. Ясное дело, в хранилищах с реквизитом найдется все – в том числе и телескопы.

В этом фильме есть сцена с участием главных героев (которых играют Джоди Фостер и Мэтью Макконахи). Они сидят и смотрят на звезды, и она показывает ему звезды и планеты. Затем они подсаживаются друг к другу чуть ближе, и она решает вкратце рассказать ему об уравнении Дрейка. Начинает с того, что в галактике Млечный Путь 400 миллиардов звезд (довольно точно). Я называл вам цифру 300 миллиардов, но в нашем случае такая погрешность допустима, не важно. Далее она говорит (кстати, ее героиня – исследовательница, занимающаяся поиском разумной жизни во Вселенной): «В одной лишь нашей Галактике 400 миллиардов звезд; если бы хотя бы у одной из миллиона были планеты, и всего на одной из миллиона среди этих планет была жизнь, и хотя бы на одной из миллиона обитаемых планет существовала разумная жизнь, то нас окружали бы буквально миллионы разумных цивилизаций».

Первый заход «одна из миллиона» уменьшает 400 миллиардов до 400 тысяч. Второй заход – что? Верно, уменьшает величину еще в миллион раз, до 0,4. Третий заход? Вынужден тебя огорчить, Джоди, у тебя остается 0,0000004 цивилизации на Галактику, а не миллионы. Это же была мировая премьера – попробуйте догадаться, кто сидел в зале, на один ряд ближе меня к экрану – Фрэнк Дрейк собственной персоной. Меня чуть удар не хватил, но оказалось, что Фрэнк воспринял ее совершенно невозмутимо. Может быть, его очаровала столь романтичная сцена. Сразу после этих выкладок Джоди целуется с Макконахи, а в следующем кадре они уже в постели. Поэтому цитировать уравнение Дрейка в такой ситуации – действительно какая-то слегка гиковская романтика. Не отрицаю. Но сравнив собственную реакцию с реакцией Фрэнка Дрейка, я задумался: а не слишком ли я заморачиваюсь подобными вещами?

Кстати, Джоди Фостер указали на ее ошибку, но слишком поздно, когда ничего изменить было уже нельзя. Она смутилась, поскольку так тщательно учила этот пассаж и так вдохновенно его играла, стараясь сохранить и ритмику, и романтизм. Но кого тут винить? Оказывается, Джоди верно прочла сценарий. Стоит ли упрекнуть сценариста? Возможно. Научного редактора сценария? Почему бы и нет. Карла Сагана, которого уже год не было в живых? Естественно, нет. Кто-то просто ошибся[17].

Вообще, я считаю, что фильм удался на славу; авторы смогли грамотно пройти по самой кромке между религией и наукой (герой Макконахи –

религиозный философ). Авторы признают, что люди очень разные и каждый воспринимает эти проблемы по-своему. Кроме того, они отлично уловили, насколько «популярно» следует рассказать о внеземном разуме для широкой аудитории, в том числе для слегка чокнутых. Именно такая «блаженная» публика особенно к нам неравнодушна, даже если мы ничего не открываем. Мой почтовый ящик ломится от писем – самые разные люди делятся со мной своими новейшими теориями об устройстве Вселенной. У меня есть открытка, отправитель которой написал: «Когда я ночами смотрю на Луну, пиво становится вкуснее, чем нужно. Что мне делать?»

Просто для интереса, сознавая всю неопределенность полученных чисел, давайте подставим их в уравнение Дрейка и завершим вычисления:

$N_c = N_s \times f_{HP} \times f_L \times f_i \times f_c \times (L_c/\text{возраст Галактики})$,

N_c = 300 миллиардов × (0,006) × (0,5) × (< 0,1) × 1 × (< 12 000 лет/10 миллиардов лет).

Получаем: $N_c < 108$.

Согласно нашим новейшим оценкам каждого из членов этого уравнения, в Галактике прямо сейчас может существовать *до 100* цивилизаций, способных к контакту в радиодиапазоне. Наши крупнейшие радиотелескопы могут засечь аналогичные устройства, установленные на других планетах по всей Галактике. Итак, шанс есть. Поиски только начались.

Кроме того, в пределах 2,5 миллиарда световых лет вокруг имеется еще около 50 миллионов таких галактик, как наша, поэтому вышеупомянутое число можно умножить на 50 миллионов, и получится *до 5 миллиардов* внегалактических цивилизаций, которые могут вещать в радиодиапазоне. Все галактики, которые мы наблюдаем, в настоящий момент уже очень старые – им миллиарды лет. Этот срок более чем достаточен, чтобы там успела развиться разумная жизнь, если она вообще в состоянии там развиться. Самые далекие из таких внегалактических цивилизаций (до которых примерно 2,5 миллиарда световых лет) будут удалены от нас примерно в 40 000 раз сильнее, чем самые далекие из цивилизаций, которые мы могли бы обнаружить в нашей родной Галактике (до них не более 62 500 световых лет). По закону обратных квадратов радиояркость передатчиков внегалактической цивилизации будет всего на 1/1 600 000 000 000 по сравнению с цивилизацией из нашей Галактики. Вот почему речь обычно идет о поисках инопланетян в нашей Галактике.

Поиск внегалактических цивилизаций далеко не так безнадежен, как

мог бы показаться на первый взгляд. Разумная цивилизация могла бы сообщать о себе сразу во все стороны либо выбрать небольшой участок неба и отправить туда точечный сигнал. Например, этот сигнал был бы в 10 раз мощнее, если бы захватывал 1/10 часть неба. Цивилизация могла бы «просигналить» в 50 миллионов раз сильнее, если бы нацелила сигнал в 1/50-миллионную часть неба. Большинство наблюдателей не заметили бы этого сигнала, но те немногие, кто оказался бы на этом небольшом участке неба, засекли бы его на очень большом расстоянии. На самом деле, сам Фрэнк Дрейк избрал в 1974 году именно такую стратегию, когда арендовал радиотелескоп в Аресибо (диаметр телескопа – 300 метров) и отправил точечный сигнал в шаровое скопление M13. (Оказывается, сигнал отправили не туда, и, когда он прибудет к цели, скопление M13 будет уже в другом месте. Поскольку все это скопление движется по орбите вдоль Млечного Пути, к моменту прибытия сигнала оно окажется за пределами той области неба, в которую он направлен. Сигнал совершенно не затронет это звездное скопление, но эта деталь в данном случае несущественна.) Если цивилизации, сигнализируя о себе, проявляют некоторую изобретательность – например, используют как «обширные», так и «точечные» сигналы, – то их видимая светимость будет распределяться в очень широких пределах по *закону Ципфа*: сигнал с наивысшей видимой светимостью превосходит любой N-ный по порядку сигнал примерно в N раз. Таким образом, в пределах 50 миллионов галактик цивилизация с максимальной видимой светимостью сигнала будет вещать примерно в 50 миллионов раз заметнее, чем самый «сильный» радиопередатчик из нашей Галактики. Если у нас будет в 50 миллионов раз больше шансов, то, возможно, нам повезет и мы наткнемся на какой-нибудь очень яркий сфокусированный луч. Следовательно, «заметнейшая» внегалактическая цивилизация может посылать сигнал, чья видимая светимость составит 1/32 (= 50 000 000/1 600 000 000) по сравнению с ярчайшим возможным сигналом из нашей Галактики. Учитывая такие соображения, от поиска внегалактических цивилизаций также не следует отказываться.

Наконец, расскажу о некоторых подводных камнях в уравнении Дрейка. Зона обитаемости может быть гораздо уже, нежели мы рассчитали. Если бы Земля находилась от Солнца дальше, чем находится сейчас, то на планете стало бы холоднее и полярные льды образовывались бы активнее; в таком случае отражательная способность планеты увеличилась бы и Земля стала бы остывать еще сильнее. Мог бы начаться лавинообразный ледниковый период. Если бы Земля находилась ближе к Солнцу, то льды растаяли бы, отражательная способность планеты снизилась и на ней стало

бы еще жарче. Стал бы выделяться метан, заключенный в торфе, и парниковый эффект продолжал бы усиливаться.

В ходе жизненного цикла Солнце разгорается и становится все жарче. Чтобы компенсировать этот процесс, должен ослабнуть парниковый эффект либо должна возрасти отражательная способность – только так планета удержится в рамках температурного режима, от которого полностью зависит существование нашей цивилизации. Если звезда в процессе развития разгорается, то зона обитаемости отодвигается от нее, и планета должна оставаться в этой зоне достаточно долго, чтобы на ней успела развиться разумная жизнь. Как я уже упоминал, считается, что планета должна быть непрерывно обитаема на протяжении миллиардов лет – лишь при таком условии на ней успеет развиться разумная жизнь.

Интересно, что и жизнь как таковая может влиять на этот баланс. Если звезда относится к главной последовательности (принадлежит к классу M) и практически не меняется за 10 миллиардов лет, то поначалу планета может быть пригодна для примитивной жизни; но потом, когда жизнь превращает атмосферу из углекислотной (CO2) в кислородную, парниковый эффект ослабевает, и на планете может начаться вечный ледниковый период. Вот вам еще одна причина, по которой система звезды спектрального класса M не лучший вариант для формирования разумной жизни.

Жизнь может влиять на зону обитаемости и иным образом. Атмосферный диоксид углерода может связываться в виде карбоната кальция в раковинах морских животных и при отмирании этих организмов откладываться в виде осадочных пород (известняка); таким образом, парниковый эффект будет ослабевать. Вулканы могут насыщать атмосферу углекислым газом, усиливая парниковый эффект. Разумеется, и живые существа вроде людей могут добывать ископаемое топливо, например уголь и нефть веками лежавшее в земле (где оно сформировалось из останков древних организмов). Далее это топливо сжигается и насыщает атмосферу с углекислым газом. Следовательно, примерные характеристики зоны обитаемости для конкретной планеты теснейшим образом связаны с ее геологией, метеорологией и даже биологией.

Часть 2
Галактики

Глава 11
Межзвездная среда

Автор: Майкл Стросс

Теперь перейдем от изучения отдельных звезд и планет к более широкой перспективе: обсудим, как расположены звезды в нашей галактике Млечный Путь и как они взаимодействуют друг с другом в так называемой *межзвездной среде*. До сих пор мы рассуждали об этом пространстве так, словно оно практически пустое, но в этой главе я собираюсь убедить вас, что в огромных объемах межзвездного пространства на самом деле содержится немало вещества – просто оно очень разреженное. Слово «*межзвездный*» понятно без пояснений, а слово «*среда*» в данном случае означает «наполнитель». Итак, межзвездная среда – это межзвездная материя.

Давайте присмотримся к межзвездной среде, благодаря которой удалось снять некоторые красивейшие фотографии в истории астрономии.

На рис. 11.1 – изображение, составленное из разнообразных фотографий Млечного Пути. На нем показана вся небесная сфера, хитроумным образом спроецированная на плоскость. Светлая полоса под названием Млечный Путь, которая иногда простирается яркой дугой через ночное небо, на самом деле описывает на небесной сфере полный круг; Млечный Путь пролегает по так называемому *галактическому экватору*. Наша галактика Млечный Путь – это диск, усеянный звездами, и, поскольку мы находимся в пределах диска, при взгляде на него мы видим яркую полосу, опоясывающую небо. Самая яркая часть Млечного Пути (расположенная ближе к галактическому центру, в середине этой картинки) плохо просматривается из средних широт Северного полушария. Если вам когда-либо доведется побывать в Южном полушарии в ясную безлунную ночь вдали от городских огней, посмотрите вверх! Южная панорама Млечного Пути, особенно с марта по июль, невероятно захватывает; там Млечный Путь выглядит гораздо ярче, чем привыкли видеть его мы, северяне.

Поскольку мы находимся на полпути от края до центра диска, по картинке может показаться, что мы смотрим на Млечный Путь из-за ее пределов, с ребра. Когда рассматриваешь Млечный Путь, сразу видишь, что он окрашен неровно, на нем словно просматриваются черные пятна или

заплатки. Если посмотрите на Млечный Путь через телескоп, то заметите (как и Галилей в свое время), что рассеянный свет Млечного Пути на самом деле исходит от мириад звезд. Однако на Млечном Пути попадаются и такие области (темные полосы), где не видно никаких звезд. Около 100 лет назад астрономы спорили, какова может быть природа этих полос. Рассматривалась возможность расположения звезд «кучками», и темные полосы – просто такие зоны, где звезд почти не оказалось. Была и альтернативная (правильная) точка зрения: звезды распределены в пространстве равномерно, просто что-то их заслоняет. Такое «нечто» в самом деле удалось обнаружить, это и была межзвездная среда.

Одно из явных доказательств существования межзвездной среды заключается в том, что она практически непрозрачна. Она разреженная, но занимает в пространстве очень большой объем. В земной атмосфере даже слабое марево или небольшой дым может скрыть из виду отдаленные объекты. Межзвездная среда наполнена крошечными пылинками – примерно такими, из которых состоит дым. Астрономы именуют эти частички «пылью», но, вероятно, правильнее было бы говорить не «пыль», а «дым». Это вещество сильно разрежено, но на больших расстояниях воздействие «пыли» накапливается и пыль полностью поглощает свет далеких звезд. В некоторых направлениях суммарный эффект пыли столь выражен, что звезд за облаками этой пыли совершенно не видно. Именно из-за пыли самый центр Млечного Пути совершенно непроницаем для видимого света.

Оказывается, что пыль тем сильнее заслоняет свет, чем короче длина его волны. Пыль поглощает длинные инфракрасные волны значительно слабее, чем видимый свет, и в инфракрасном диапазоне Млечный Путь можно заснять практически полностью. На рис. 11.2 крупным планом показана центральная часть нашей Галактики, снимок сделан в рамках проекта «Обзор всего неба на длине волны 2 микрометра» (сокращенно 2MASS – удачная аббревиатура, ведь это исследование провели ученые из Массачусетского университета). Как понятно из названия, в проекте 2MASS использовалось инфракрасное излучение с длиной волны около 2 микрон (2×10^{-6} метра), что значительно длиннее волн видимого света (0,4–0,7 микрона). Как видите, на картинке ярко сияют отдельные звезды.

Рис. 11.1. Панорама всего неба, на которой виден Млечный Путь. Далекие звезды Млечного Пути образуют яркую полосу, опоясывающую Галактику по экватору. В данном случае она пересекает карту прямо по центру. Обратите внимание: вдоль Млечного Пути разбросаны темные участки и пятна: там далекие звезды заслоняет пыль. Иллюстрация сделана по материалам, предоставленным Дж. Ричардом Готтом и Робертом Дж. Вандербеем (статья Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011). По данным программы Main Sequence Software

Рис. 11.2. Центр Млечного Пути. Пыль, наполняющая Млечный Путь, сильнее затмевает коротковолновое излучение, нежели длинноволновое, поэтому звезды, сияющие за слоем этой пыли, имеют характерный красноватый оттенок. На этом изображении около 10 миллионов звезд, а в поперечнике оно достигает примерно 4000 световых лет. Самый центр Млечного Пути – это наиболее «густое» красное пятно в верхнем левом углу. Источник снимка: фотография из астрономического атласа получена в рамках проекта «Обзор всего неба на длине волны 2 микрометра», совместно выполненного учеными из Массачусетского университета и Центра обработки и анализа инфракрасных изображений при Калтехе, под эгидой NASA и Национального научного фонда

Рис. 11.3. Туманность Угольный Мешок. Это часть Млечного Пути, звезды которой полностью заслонены густым облаком пыли. Снимок предоставлен Vic Winter и Jen Winter

Пыль по-прежнему заметна, но она мешает далеко не так сильно, как в видимом диапазоне. Если отсечь голубую часть спектра света, исходящего от объекта, то объект покажется красноватым. Следовательно, все звезды на картинке кажутся «покрасневшими», не такими, каковы они в реальности. Самое яркое красное пятно, заметное за облаками пыли в верхнем левом углу, – это и есть центр Галактики, тесная группа звезд, в гуще которых скрывается черная дыра в 4 миллиона раз тяжелее Солнца.

На рис. 11.3 показана темная туманность под названием Угольный Мешок, это большое пылевое облако, полностью затмевающее расположенные за ним звезды. В небе остается «дыра», которую довольно легко заметить невооруженным глазом. Звездочеты австралийских аборигенов знали туманность Угольный Мешок уже около 40 тысяч лет назад. Она образует голову Эму – это темная область в Млечном Пути, широко известная в сказаниях аборигенов.

Следовательно, межзвездная среда далеко не однородна, в ней много довольно плотных сгустков или облаков. Кроме пыли там есть газовая смесь, состоящая из водорода, кислорода и других элементов. Разнообразные небесные объекты, напоминающие дымку или облака, мы называем *туманностями* (тем самым противопоставляя их «точечным» звездам). Эти газовые облака не просто скрывают из виду звезды. На рис.

11.4 изображена туманность Ориона, видимая невооруженным глазом. Она находится у кончика меча, что свисает у Ориона с пояса. Даже в бинокль эта туманность кажется довольно нечеткой, а не столь резкой, как звезда. Ультрафиолетовый свет жарких звезд может возбуждать межзвездный газ. Фотоны горячих и ярких молодых звезд могут забрасывать его атомы на высокие энергетические уровни. Падая на нижние энергетические уровни, атомы излучают фотоны со строго определенной длиной волны (об этом шла речь в главе 4), поэтому туманности кажутся такими цветистыми. Точно по такому же принципу флуоресцируют неоновые лампы. Кстати, неон – один из элементов, присутствующих в межзвездной среде.

Рис. 11.4. Туманность Ориона. Наиболее яркая часть рисунка – это

область звездообразования, где газ окутывает молодые яркие звезды и флуоресцирует, подсвечиваемый ими. Также заметны пылевые волокна. Снимок предоставлен: NASA, KA, T. Megeath (Университет Торонто) и M. Robberto (Институт исследований космоса с помощью космического телескопа)

Туманность Ориона относится к числу так называемых *эмиссионных туманностей*: это означает, что в ее спектре преобладают эмиссионные линии, соответствующие различным электронным переходам в атомах. По длинам волн эмиссионных линий можно определить, какие именно элементы содержатся в туманности. Красноватый оттенок изображения связан с излучением соответствующих фотонов при падении электронов с третьего на второй энергетический уровень в атоме водорода (это *H*, одна из линий Бальмера, речь о которых шла в главе 6). Некоторая зеленоватость связана с присутствием кислорода и других элементов, отражающих остальной свет. Темные области – это облака пыли, смешавшейся с газом.

Объект на рис. 11.5 называется Трехраздельная туманность, поскольку поглощающие полосы делят его на три части. Эти пылевые полосы частично затмевают излучение, и без них туманность была бы окрашена более равномерно. Как и в других туманностях, упоминавшихся выше, жаркие звезды, окутанные газом, подсвечивают его, а красное излучение – это эффект H_α. Обширная область справа заполнена светом голубых звезд, отражающимся от пыли, в данном случае пыль действует подобно зеркалу. Эта область называется «*Отражающая туманность*». Как вы помните, голубой свет поглощается, когда проходит через облако пыли, поэтому звезды, просвечивающие сквозь это облако, кажутся красноватыми. Но голубой свет может не поглощаться, а отражаться от газопылевого облака. Поэтому отражающие туманности обычно кажутся голубыми.

Плеяды – молодое звездное скопление, хорошо заметное невооруженным глазом. На снимках, сделанных при помощи большого телескопа (см. рис. 7.2), видно, что звезды подсвечивают пыль – и получается голубоватая отражающая туманность. У каждой звезды – зыбкий голубой ореол.

Межзвездная среда – то самое сырье, из которого образуются звезды, и мы вкратце затрагивали этот вопрос в главе 8. В большей части галактики Млечный Путь межзвездная среда весьма разряженная, но кое-где, например в эмиссионных туманностях и темных облаках, она довольно густая. Эти области созрели для звездообразования.

Рис. 11.5. Трехраздельная туманность. Красный свет исходит от флуоресцирующего газа, испускающего свет по линии H_α из серии Бальмера, а голубой свет в основном отражается от изобилующей здесь пыли. Снимок предоставлен Adam Block из образовательного астрономического центра обсерватории Маунт-Леммон, Университет штата Аризона

Под действием гравитации в облаке аккумулируется небольшой комок из пыли и газа. Он сжимается, нагревается при этом и в процессе схлопывания преобразует гравитационную потенциальную энергию в кинетическую. В конце концов эта структура становится настолько плотной и горячей, что в ней начинаются термоядерные реакции – и рождается звезда. Центр Трехраздельной туманности заполнен массивными и жаркими голубыми звездами. Такие звезды живут быстро и умирают молодыми. Итак, эти звезды, должно быть, возникли недавно.

Масштабы всех этих процессов колоссальны. В туманности Ориона наблюдается 700 формирующихся звезд, многие из которых окружены газопылевыми дисками. В конечном итоге из этих дисков могут образоваться планеты. Звезды обычно образуются большими группами, а

не поодиночке – именно так и происходит в Трехраздельной туманности и в туманности Ориона. Со временем пыль, окутывающая звезды, рассасывается под действием излучения и звездного ветра, и звезды постепенно высвобождаются из нее. К тому же молодые звезды часто фонтанируют «порывами» горячего газа, отделяющегося от звездной поверхности. Это явление аналогично известному нам солнечному ветру. Ветер придает газу и пыли характерные очертания, поэтому некоторые туманности как будто «развеваются».

Детали процесса звездообразования пока не слишком понятны; пока это одна из важнейших нерешенных проблем астрономии. Не все сравнительно плотные регионы межзвездной среды начинают сжиматься и порождать звезды; мы не вполне понимаем, почему звездообразование происходит в одних регионах Млечного Пути, а в других не происходит. Известно, что как только в такой области начинают формироваться первые звезды, дующий от них ветер разносит в стороны газ и пыль, поэтому оскудевает ресурс для образования новых звезд. Звезды, подобные Солнцу, хаотически движутся относительно соседок со скоростью около 20 км/с. За 4,6 миллиарда лет, что истекли с рождения Солнца, наша звезда далеко откочевала из *звездной колыбели*, где родилась (да, это астрономический термин!). Поэтому невозможно определить, какие звезды являются «родными сестрами» и родились вместе. За сотни миллионов лет группы звезд постепенно разобщаются, и звезды рассредоточиваются по Млечному Пути; большинство возрастных звезд в галактическом диске Млечного Пути – либо одиночки (как Солнце), либо существуют парами, либо небольшими группами.

Итак, мы в общих чертах обсудили рождение и жизненный цикл звезд. Звезды образуются из межзвездной среды. Самые легкие звезды по-прежнему сжигают запасенный при рождении водород; они достаточно неприхотливы, и этого водорода им хватит более чем на триллион лет. Звезды, сравнимые по массе с Солнцем или чуть более тяжелые, станут красными гигантами и когда-нибудь вернут часть своего вещества в межзвездную среду, образовав планетарные туманности. Звезды, чьи ядра более чем вдвое тяжелее Солнца (вообще на главной последовательности есть отдельные звезды, которые в 8 раз тяжелее Солнца), претерпевают гораздо более драматичные взрывы (становятся сверхновыми) и извергают в межзвездное пространство синтезированные при таком взрыве тяжелые элементы. Эти сравнительно тяжелые элементы могут войти в состав звезд следующего поколения. По ходу такого процесса межзвездная среда все сильнее насыщается более тяжелыми элементами, нежели водород и гелий.

Из таких тяжелых элементов в основном и состоит окружающий нас мир. Например, Земля в основном состоит из железа, кислорода, кремния и магния. В состав человеческого тела входят преимущественно водород, углерод, кислород и азот, а также небольшое количество более тяжелых элементов. Тяжелые элементы, вплоть до железа, образуются при термоядерном синтезе в ядрах гибнущих звезд. Все остальные встречающиеся в природе элементы, вплоть до урана, образуются при слиянии тяжелых элементов с нейтронами в ядрах красных сверхгигантов, либо в газовых оболочках звезды, которая вот-вот взорвется как сверхновая, либо при столкновении двух нейтронных звезд и возникновении тесной двойной звездной системы. Детали этих процессов по-прежнему не вполне понятны и активно исследуются.

Млечный Путь напоминает живую экосистему, в которой рождаются и умирают звезды. Каждое поколение звезд наполняет межзвездную среду веществом, которое затем идет на образование звезд следующего поколения. Тяжелые элементы – это сырье для образования планет, на которых может возникать жизнь. Когда осознаешь, что львиная доля того вещества, из которого мы состоим, а также все, что нас окружает, – это плоды звездных термоядерных реакций, – одновременно ощущаешь и смирение, и трепет.

Я упоминал, что элементы тяжелее железа могут, в частности, образовываться при столкновении двух нейтронных звезд в тесной звездной системе. Рассел Халс и Джо Тейлор открыли две нейтронные звезды, масса каждой из которых составляла примерно 1,4 солнечной. Полный оборот друг вокруг друга эти звезды совершали за 7,75 часа. Диаметр их орбит равен примерно трем световым секундам, что чуть меньше диаметра Солнца. Две нейтронные звезды медленно сливаются друг с другом из-за излучения гравитационных волн, – такой эффект был спрогнозирован в рамках общей теории относительности Эйнштейна. Действительно, измерения Халса и Тейлора так красиво согласовывались с прогнозом общей теории относительности, что ученые даже были удостоены за это открытие Нобелевской премии по физике за 1993 год. Две нейтронные звезды так и продолжат двигаться по этой фатальной спирали, пока, наконец, не столкнутся и не сольются в единое целое. Это произойдет примерно через 300 миллионов лет. Энрико Рамирес-Руис из Калифорнийского университета в городе Санта-Крус оценил, что при таком столкновении может образоваться столько золота, сколько весит Юпитер. Только вообразите: атомы золота в моем обручальном кольце могли образоваться при столкновении двух нейтронных звезд миллиарды лет

назад!

Глава 12
Наш Млечный Путь

Автор: Майкл Стросс

Большинство звезд, видимых невооруженным глазом, удалены от нас на десятки, сотни или тысячи световых лет. Ранее, пока мы были не в состоянии рассмотреть в телескоп более далекие объекты и понять их природу, эти звезды оставались той частью Вселенной, которая была нам открыта. История астрономии – это история все более полного осознания, насколько же в самом деле велика Вселенная.

Во времена Коперника Вселенная состояла из Солнечной системы, окруженнй далекими звездами, о которых почти ничего не было известно. Галилео Галилей, первым направивший телескоп в небеса, увидел, что свет Млечного Пути – это свет бесчисленных (на самом деле – миллиардов) отдельных звезд. Астрономы вскоре поняли, что концепция Вселенной должна быть гораздо шире, чем им казалось ранее.

В 1785 году Уильям Гершель (тот самый, кто открыл Уран) подсчитал, сколько звезд можно увидеть в телескоп в различных направлениях, и составил карту галактики Млечный Путь. Он рассуждал, что количество звезд, заметных в том или ином направлении, позволяет судить, насколько простирается Млечный Путь в эту сторону. По результатам наблюдений он пришел к выводу, что Млечный Путь напоминает по форме сплюснутую линзу, и мы находимся близ его центра. В 1922 году голландский астроном Якобус Каптейн подробнее исследовал Млечный Путь. Удивительно, что именно Нидерланды, где все время облачно, дали миру столько выдающихся астрономов! Каптейн, как и Гершель, старательно подсчитал количество звезд в различных направлениях, но он использовал очень четкие астрофотографии, на которых были запечатлены разные участки неба.

Разумеется, это непростое дело. Вспомните отношение по закону обратных квадратов $B = L/(4\pi d^2)$ между яркостью (B), светимостью (L) звезды и расстоянием (d) до этой звезды. Видя яркую звезду, мы априори не знаем, что это: далекая звезда с очень высокой светимостью либо более тусклая звезда, расположенная поближе. Каптейн выполнил основную часть своей работы еще до того, как Герцшпрунг и Расселл показали, как по цвету звезды главной последовательности можно судить о светимости этой

звезды (см. главу 7). Каптейн сделал максимум возможного и, после многолетних тщательных измерений, получил модель Вселенной примерно как у Гершеля: это была линза диаметром 40 000 световых лет, причем Солнце находилось всего в 2000 световых годах от центра.

До Коперника считалось, что Земля – центр Вселенной. После Коперника известная Вселенная изменилась, и в ее центре оказалось Солнце. В течение следующих веков астрономы стали понимать, что Солнце – просто звезда, как и прочие звезды на ночном небе, но Каптейн все-таки располагал Солнце примерно в центре среди остальных звезд. Однако уже во времена работы Каптейна ученые начали догадываться, как пыль в межзвездной среде влияет на видимую яркость звезд (см. главу 11). Если не учитывать «затмевающий» эффект такой пыли, то мы неверно представляем распределение звезд. Например, в каком-то регионе неба много пыли, и там просматривается мало звезд. Если пыль настолько плотная, что звезд за ней вообще не видно, то можно ошибочно подумать, что в распределении звезд возник «провал». Когда астрономы стали понимать, что пыль буквально повсюду рассеяна по Млечному Пути, они осознали, что каптейновская картина Вселенной ошибочна.

Гарвардский профессор Харлоу Шепли действовал иначе. По Млечному Пути рассредоточено около 150 шаровых скоплений – это кластеры, в каждом из которых около миллиона звезд. Шаровые скопления красивы – см., например, снимок M13 на рис. 7.3. В 1918 году Харлоу Шепли смог оценить расстояние до шаровых скоплений и, соответственно, построить их карту в трех измерениях. Учитывая, что эти скопления входят в состав Млечного Пути, можно было предположить, что они будут более или менее тяготеть к центру звездной карты, которую пытался составить Каптейн, то есть окажутся в той или иной степени центрированы вокруг Солнца. Но открытие Шепли изменило наши представления о Вселенной: оказалось, что центр распределения шаровых скоплений (по современным данным) находится в 25 000 световых лет от Солнца. Солнце явно далеко от центра. Работа Шепли (связанная с расположением шаровых скоплений) показала, что Солнце находится не в центре известной Вселенной (в представлении Шепли Вселенная равнялась Млечному Пути), а скорее на окраине, а сам Млечный Путь был в несколько раз крупнее, чем полагал Каптейн. Из-за всей этой пыли Каптейн кардинально ошибся. Оказалось, что космическая пыль в Млечном Пути преимущественно сконцентрирована в центральном диске, или *галактической плоскости*, тогда как большинство шаровых скоплений лежит выше или ниже этого диска. Поскольку шаровые скопления лежат вне галактической плоскости,

вся эта пыль значительно меньше повлияла на анализ Шепли, чем на работу Каптейна. Фактически Шепли повторил подвиг Коперника, продемонстрировав, что Солнце находится не в центре Млечного Пути и не в центре наблюдаемой нами Вселенной.

Таковы были пределы Вселенной в представлении Шепли – около 100 лет назад. Вселенная представляла собой сплюснутую структуру (Млечный Путь) диаметром около 100 000 световых лет, причем центр Вселенной находился примерно в 25 000 световых лет от Солнца. Это огромные масштабы: один световой год равен 10 триллионам километров, так что расстояние в 100 000 световых лет непостижимо велико. Но важнейшие открытия 1920-х годов, о которых пойдет речь в главе 13, показали, что Вселенная на много порядков крупнее нашей колоссальной галактики Млечный Путь.

Давайте попробуем представить, насколько велик Млечный Путь. Ближайшие звезды расположены примерно в 4 световых годах от нас, то есть на расстоянии около 4×10^{13} км. Разделим это число на диаметр Солнца, 1,4 миллиона километров. Таким образом можно представить, сколько Солнц укладывается в ряд до ближайшей звезды: 30 миллионов. Даже такое расстояние кажется огромным. Солнце примерно в 100 раз больше Земли. Иными словами, расстояние до ближайшей звезды равно примерно 3 миллиардам диаметров Земли.

Звезды – крошечные пятнышки по сравнению с колоссальными межзвездными расстояниями. В сериале «Звездный путь» корабль «Энтерпрайз» в каждом рейсе то и дело минует «планету класса М»[18], – по-видимому, сценаристы позабыли, как велики эти расстояния. Вот почему «Энтерпрайз» так активно задействует свой варп-двигатель[19]! (Я уже не спрашиваю сценаристов, почему все инопланетяне, даже из Дельта-квадранта, у них разговаривают на отличном американском английском!)

Оказывается, расстояние в 4 световых года – типичный отрезок между двумя ближайшими звездами в нашей Галактике. Сегодня известно, что Млечный Путь имеет очень сплюснутую форму, он похож на диск диаметром около 100 000 световых лет и всего примерно 1000 световых лет в толщину. По человеческим меркам, 1000 световых лет – огромное расстояние, но все-таки по сравнению с общими размерами Млечного Пути оно совсем невелико. Основная часть пыли и другого межзвездного вещества в Млечном Пути сосредоточена в галактическом диске. Размеры Млечного Пути примерно в 25 000 раз превышают типичное расстояние между звездами, диаметр Млечного Пути примерно в 75 триллионов раз

превышает диаметр Земли.

Созвездие Стрельца расположено в направлении центра Галактики. Учитывая, сколько пыли находится в межзвездной среде ближе к центру Млечного Пути, галактический центр совершенно укутан этой пылью, и мы его не видим. На снимках Млечного Пути в галактическом диске заметны области, где совсем мало звезд, – это означает, что такие регионы наполнены особенно плотными облаками пыли. Солнце находится в галактическом диске, но если смотреть в сторону от диска Млечного Пути, то пыль практически не мешает и мы четко видим Вселенную за пределами нашей Галактики.

Земля и Солнце расположены поблизости от срединной плоскости Млечного Пути. Поскольку звезды в Млечном Пути к тому же сильно сконцентрированы именно в области сплюснутого диска, максимальная плотность звезд наблюдается в полосе, опоясывающей небесную сферу. В любой момент времени над горизонтом видна лишь часть этого круга; остальная часть заслонена Землей и находится буквально у нас под ногами. В Северном полушарии лучше всего видна часть Млечного Пути, удаленная от центра Галактики. Поскольку Солнце и Земля расположены относительно далеко от галактического центра, звезд в видимом нам участке Млечного Пути также немного, и мы видим на небе сравнительно мало звезд. Однако из Южного полушария мы смотрим прямо в центр Млечного Пути, и там открывается значительно более волнующее зрелище, даже при том, что мешает пыль. В ясную майскую ночь в Чили, вдали от городских огней, просто дух захватывает, когда смотришь на небо. Одни из самых ярких воспоминаний в жизни у меня связаны с теми ночами, когда я работал в чилийской обсерватории Серро-Тололо, рядом со мной была женщина, впоследствии ставшая моей женой, а у нас над головой во все небо величественно расстилался Млечный Путь.

Еще более шикарная картина открывается, если наблюдать Млечный Путь в инфракрасном диапазоне. Мы уже знаем, что пыль сильнее поглощает синюю часть видимого спектра, чем красную, а инфракрасное излучение практически не затрагивает (см. главу 11). На рис. 12.2 показана карта всего неба в инфракрасном диапазоне, сделанная при помощи телескопов 2MASS (в рамках этого же проекта был получен ошеломительный снимок галактического центра с рис. 11.2). Большую часть снимка занимает тонкий диск Млечного Пути, также хорошо заметен центральный балдж.

Карта неба в инфракрасном диапазоне аналогична карте в видимом спектре, показанной на рис. 12.1. Горизонтальный «экватор» в середине

этой проекции – это *галактическая плоскость*. Диск Млечного Пути, опоясывающий всю небесную сферу, на этом рисунке выглядит как горизонтальная прямая линия. Хотя рис. 12.2 сделан по данным, полученным в инфракрасном диапазоне, пыль Млечного Пути все равно отчасти затмевает изображение, и пятнышки, которые заметны на диске, – именно ее проявление. Наконец, обратите внимание на балдж в центре Млечного Пути; он выглядит слегка нескладно, и все дело в том, что по форме балдж напоминает картофелину, а не идеальную сферу, как когда-то казалось. Большое и Малое Магеллановы Облака – галактики-спутники Млечного Пути – видны правее и ниже галактической плоскости.

Харлоу Шепли осознал, что нужно смотреть в сторону от галактической плоскости (так как в плоскости почти ничего не видно из-за пыли), чтобы понять объемную структуру Млечного Пути. Шаровые звездные скопления Млечного Пути расположены как раз за пределами этой плоскости и видны по всему небу. Шепли хотел построить объемную карту этих скоплений, поэтому ему требовалось измерить расстояние до них. В принципе, это не составляло труда: достаточно было применить закон обратных квадратов для отношения яркости и светимости: $B = L/(4\pi d^2)$. Итак, если измерить яркость любой звезды в шаровом скоплении (это просто) и узнать, какова реальная светимость этой звезды (это сложно), то можно определить расстояние d до нее. Пыль на эти расчеты практически не повлияет, ведь мы рассматриваем шаровое скопление вне плоскости Млечного Пути.

Рис. 12.1. Млечный Путь над обсерваторией Серро-Тололо. Так выглядит ночное небо из Межамериканской обсерватории Серро-Тололо в чилийских Андах. Под большим куполом в центре снимка расположен телескоп Виктора Бланко с диаметром зеркала 4 метра. Центр Млечного Пути находится ближе к правому краю снимка. Слева хорошо заметны Большое и Малое Магеллановы Облака – галактики-спутники Млечного Пути, – удаленные от нас примерно на 150 000 световых лет. Снимок предоставлен Roger Smith, Ассоциация университетов по астрономическим исследованиям (AURA), Национальная обсерватория оптической астрономии (NOAO), Национальный научный фонд (NSF)

Как определить светимость любой конкретной звезды? На главной последовательности прослеживается взаимосвязь между цветом звезды и

ее светимостью (см. рис. 7.1). В случае, если наши измерения будут достаточно точны и позволят отыскать в шаровом скоплении звезды главной последовательности, мы сможем определить и их светимость. Сопоставив эти данные с наблюдаемой яркостью звезд по закону обратных квадратов, мы сможем узнать расстояние до шарового скопления.

Рис. 12.2. Карта Млечного Пути в инфракрасном диапазоне. Показано распределение звезд по всему небу, по данным проекта «Обзор всего неба на длине волны 2 микрометра» (2MASS). На такой длине волны пыль почти не мешает обзору. Плоскость Млечного Пути расположена на снимке горизонтально, вдоль галактического экватора. Под плоскостью Галактики находятся Большое и Малое Магеллановы Облака. Источник снимка: фотография из астрономического атласа получена в рамках проекта «Обзор всего неба на длине волны 2 микрометра», совместно выполненного учеными из Массачусетского университета и Центра обработки и анализа инфракрасных изображений при Калтехе, под эгидой NASA и Национального научного фонда

Ах, если бы в жизни все было так просто! Естественно, проще всего измерять самые яркие звезды в шаровом скоплении. Все звезды в скоплении удалены от нас примерно одинаково, поэтому самые яркие из них по определению обладают максимальной светимостью. Но они *не*

относятся к главной последовательности; это красные гиганты, светимость которых может сильно варьироваться (чего не скажешь о цвете), поскольку, имея почти одинаковый цвет, они сильно отличаются в размерах. Вооружившись современными телескопами, мы сегодня можем наблюдать в шаровых скоплениях и существенно более тусклые звезды из главной последовательности, но в 1918 году, когда работал Шепли, имевшиеся у него в распоряжении телескопы и инструменты совершенно не позволяли этого сделать. Но Шепли ориентировался на так называемые *переменные звезды типа RR Лиры*. Светимость такой звезды примерно в 50 раз выше, чем у Солнца, а яркость периодически меняется.

Переменными называются звезды с непостоянной светимостью (следовательно, их наблюдаемая яркость также меняется). У переменных звезд типа RR Лиры яркость может изменяться вдвое в течение неполных суток. Такие звезды пульсируют, их радиус регулярно то увеличивается, то уменьшается. Такие переменные звезды типичны для шаровых скоплений.

Известно, что звезды находятся в равновесии под действием двух сил: гравитации, благодаря которой они не расплываются, и внутреннего давления, имеющего тепловую природу. Однако после превращения в красный гигант некоторые звезды голубеют и быстро движутся по диаграмме Герцшпрунга – Расселла. На данном этапе у них в ядре горит гелий, в оболочках горит водород, а влияние звезды на окружающую среду зависит от того, как генерируемая внутри энергия пробивается наружу. В результате внутреннее давление в звезде колеблется, меняется ее размер и, соответственно, светимость (а также яркость).

Хотя астрономы стремятся давать простые названия изучаемым объектам («красный гигант», «белый карлик» и так далее), переменные звезды – исключение из этого правила. Когда в начале XIX века астрономы впервые взялись каталогизировать переменные звезды, им давали названия по тому созвездию, в котором такая звезда находится. Первая переменная звезда была открыта в созвездии Лира, и ее назвали R Лиры; другие буквы латинского алфавита от A до Q уже были разобраны для наименования звезд других типов. Когда в Лире открыли вторую такую звезду, ее назвали, естественно, S Лиры, затем T Лиры и так далее. Но вскоре стало ясно, что так и все буквы закончатся, поэтому после Z Лиры следующую звезду назвали RR Лиры (впоследствии это название закрепилось за целым классом переменных звезд), затем SS Лиры и так далее, вплоть до ZZ Лиры. Даже этих названий не хватило, так что пришлось вернуться к AA Лиры, AB Лиры и так далее, вплоть до QZ Лиры (при этом почему-то пропустили букву J). Получается 334 комбинации, но переменные звезды

встречаются еще чаще! Следующая переменная звезда, открытая в созвездии Лира, получила название V335 Лиры. На момент написания этой книги астрономы добрались до V826 Лиры. Известно много типов переменных звезд, и связанная с ними терминология действительно может показаться весьма сложной: звезды AM Гончих Псов, FU Ориона, BL Ящерицы (кстати, в последнем случае оказалось, что это не звезда, а удивительная галактика с переменным ядром), ZZ Кита. Звезды каждого класса именуются в честь того созвездия, в котором такая звезда впервые была обнаружена. Переменные-цефеиды, сыгравшие ключевую роль при изучении далеких галактик (об этом мы поговорим в главе 13), названы в честь «первой ласточки» Дельты Цефея, открытой в конце XVIII века.

Шепли воспользовался переменными звездами класса RR Лиры как *стандартными свечами* для измерения расстояний до шаровых скоплений. Все дело в том, что светимость любых звезд класса RR Лиры (после усреднения переменности) примерно одинакова. Измеряя (среднюю) яркость звезд типа RR Лиры в шаровом скоплении и зная их светимость, Шепли смог определить расстояние до звезды и, следовательно, до всего скопления, в котором она находится. Построив таким образом трехмерную карту звездных скоплений, он нашел центр их распределения и установил, что Солнце находится далеко от центра галактики Млечный Путь.

Выстраивать трехмерную карту звезд в плоскости Млечного Пути (а именно там расположено большинство его звезд) по тому же принципу с применением стандартных свеч оказывается значительно сложнее, поскольку мешает пыль. После огромной работы, выполненной за несколько десятилетий, мы сегодня довольно неплохо представляем себе общую структуру Млечного Пути. Большинство звезд находится в сильно сплюснутом диске диаметром около 100 000 световых лет. У этого диска нет четкого края, просто плотность распределения звезд постепенно уменьшается, когда мы удаляемся от центра. В центре диска звезды образуют сравнительно густое вздутие около 20 000 световых лет в поперечнике, по форме напоминающее картофелину; это *балдж* Млечного Пути. Звезды в диске образуют систему спиральных рукавов, исходящих из балджа. Большинство звезд, видимых невооруженным глазом, расположены в пределах нескольких тысяч световых лет от нас, в том же спиральном рукаве, что и Солнце.

Хотя Млечный Путь – спиральная галактика, мы не замечаем в небе его спиральную структуру, поскольку сами находимся в пределах диска. Спиральная структура четко проявляетя, лишь если измерить расстояния до отдельных звезд и отобразить Галактику в трехмерном виде. Если бы мы

могли каким-то образом наблюдать Млечный Путь «сверху», с расстояния пары сотен тысяч световых лет, то он выглядел бы примерно как на рис. 12.3. Солнце расположено в спиральном рукаве примерно на полпути от центра (если сравнить эту схему с циферблатом – то около шести часов). Наша Галактика относится к классу *спиральных галактик с перемычкой*, поскольку балдж у нее продолговатый. Спиральные рукава отходят от кончиков балджа.

Вскоре после свадьбы жена стала настаивать, чтобы я больше не носил футболок в стиле «Я – яйцеголовый», которые сохранились со времен колледжа. Особенно я скучаю по футболке с изображением спиральной галактики с рукавами, а где-то на полпути к центру нарисована стрелка, подписанная «вы находитесь здесь».

Рис. 12.3. Смоделированный вид Млечного Пути сверху. Снимок предоставлен: NASA, спутник Чандра

Не все звезды Млечного Пути находятся в спиральных рукавах и балдже. Мы уже видели, что шаровые скопления более или менее ровно расположены в виде сферы, охватывающей пространство выше и ниже плоскости диска. Кроме того, россыпь звезд (также сферическая, но гораздо более разреженная по сравнению с диском) простирается примерно на 50 000 световых лет от центра Млечного Пути. Эта часть нашей Галактики называется *гало*. Принято считать, что звезды в галактическом гало распределены достаточно равномерно и их концентрация постепенно уменьшается по мере удаления от центра Млечного Пути. Однако

астрономы выяснили, что гало отнюдь не равномерное. В нем есть сгустки и потоки, которые считаются остатками мелких галактик-спутников, упавших в Млечный Путь и разорванных его приливными гравитационными силами.

В балдже и особенно в гало сосредоточены старые звезды, образовавшиеся миллиарды лет назад. Поэтому там просто отсутствуют самые горячие звезды из главной последовательности, относящиеся к классам O и B и живущие всего по несколько миллионов лет. Уже миллиарды лет в гало нашей Галактики не происходит никакого звездообразования. Молодые горячие звезды почти без исключения встречаются в спиральных рукавах, где звездообразование продолжается по сей день.

Спиральная («вертушечная») структура диска подсказывает, что вся Галактика вращается. Действительно, именно это и происходит. Весь диск вращается вокруг центральной оси; в частности, Солнце движется по условно круглой орбите со скоростью 220 км/с. Точно как притяжение Солнца удерживает Землю на годичной орбите, так же и тяготение Млечного Пути (как минимум в пределах той части, где находится солнечная орбита) удерживает Солнце и его планеты на траектории вокруг галактического центра. При скорости 220 км/с и радиусе орбиты, растянувшейся на немыслимые 25 000 световых лет, легко рассчитать, что Солнце совершает полный оборот вокруг Млечного Пути за 250 миллионов лет. Следовательно, с момента образования Земли (4,6 миллиарда лет назад) Солнце успело совершить около 18 таких оборотов.

Чтобы вычислить силу притяжения Млечного Пути, воздействующую на Солнце, можно допустить, что вся масса Млечного Пути сосредоточена у него в центре, в 25 000 световых лет от нас. Аналогично, сила тяготения Земли не изменилась бы, будь вся земная масса сконцентрирована в ядре планеты, в 6400 километров у нас под ногами. Будем учитывать массу той части Галактики, что находится в пределах орбиты Солнца. Гравитационное притяжение, оказываемое материей вне этого радиуса – отовсюду в разных направлениях, – в целом обнуляется.

Итак, давайте считать. В главе 3 мы обсуждали ньютоновские законы движения и тяготения и нашли отношение между массой Солнца $M_{\text{СОЛН}}$, скоростью орбитального вращения Земли вокруг Солнца $v_{\text{ЗЕМЛ}}$ и радиусом земной околосолнечной орбиты $r_{\text{ЗЕМЛ}}$:

$$GM^{\text{СОЛН}}/r_{\text{ЗЕМЛ}}^2 = v_{\text{ЗЕМЛ}}^2/r_{\text{ЗЕМЛ}}^2,$$

где G – ньютоновская гравитационная постоянная. Умножим обе части

уравнения на $r_{ЗЕМЛ}^2$ и получим:

$GM_{СОЛН} = v_{ЗЕМЛ}^2/r_{ЗЕМЛ}^2$.

Можно записать аналогичное уравнение для массы Млечного Пути, $M_{МП}$, скорости Солнца $v_{СОЛН}$и радиуса $R_{СОЛН}$ – это радиус орбиты Солнца, описываемой вокруг Млечного Пути:

$GM_{МП} = v_{СОЛН}^2 R_{СОЛН}$.

Если разделить второе уравнение на первое, то величина G сокращается:

$GM_{МП}/M_{СОЛН} = (v_{СОЛН}/v_{ЗЕМЛ})^2(R_{СОЛН}/r_{ЗЕМЛ})$.

Отношение скоростей $v_{СОЛН}/v_{ЗЕМЛ}$ равно (220 км/с)/(30 км/с), примерно 7. Отношение расстояний $R_{СОЛН}/r_{ЗЕМЛ}$ равно 25 000 световых лет/1 а.е. Один световой год равен примерно 60 000 а.е., следовательно, оно равно 25 000 × 60 000 = 1,5 × 10^9. Таким образом, $M_{МП}/M_{СОЛН}$ =1,5 × 10^9 ~ 10^{11}.

Итак, масса нашей Галактики (в пределах радиуса солнечной орбиты) примерно в 100 миллиардов раз превышает массу Солнца.

Млечный Путь состоит из звезд, и можно сказать, что в нем порядка 100 миллиардов звезд, если примерно допустить, что масса каждой звезды равна солнечной. На самом деле, «типичная» звезда Млечного Пути в среднем немного легче Солнца, поэтому более точная оценка дает около 300 миллиардов звезд в Млечном Пути. В классическом телесериале «Космос» Карл Саган своим незабываемым голосом часто упоминал «миллиарды и миллиарды» звезд. Саган не преувеличивал: в Млечном Пути действительно миллиарды и миллиарды, порядка 300 миллиардов звезд. Это число фигурирует в уравнении Дрейка.

Все звезды в диске движутся по почти круговым орбитам. Звезды напоминают автомобили на гоночной трассе. Те, что идут по внутренним дорожкам, обгоняют те, которые движутся по внешним. Спиралевидные очертания, которые мы наблюдаем, возникают из-за «пробок» на звездных орбитах. Если вы летите по трассе и приближаетесь к пробке, где машины движутся медленнее, то и сами сбрасываете скорость. Рано или поздно вы минуете пробку и можете прибавить скорость – точно как и машины, идущие рядом с вами. Дорожная пробка – это *волна плотности* в распределении машин. В пробке машины расположены особенно тесно, хотя при этом ни одна из машин не прекращает движения и ползет к выходу из пробки. Аналогично, спиральная волна плотности в галактике подобна дорожной пробке, только вместо машин в ней движутся звезды,

чья гравитация притягивает в эту пробку все новые и новые звезды. Более того, когда звезды кучкуются таким образом, из-за дополнительного притяжения они обрастают межзвездным газом; в результате газовые облака сжимаются и превращаются в новые звезды. Поэтому спиральные рукава галактики – это области активного звездообразования. Среди новоиспеченных звезд сияют массивные голубые гиганты, чей век настолько краток, что они просто не успевают миновать пробку и выйти из спирального рукава. Следовательно, спиральные рукава галактик сильно подсвечиваются новорожденными массивными голубыми звездами. Звезды не движутся по спиральным рукавам, – наоборот, спиральные рукава такие яркие, потому что там формируются звезды. А звезды формируются в рукавах из-за того, что возникают «заторы» при движении других звезд вокруг галактического центра.

Как мы недавно оценили, в пределах галактической орбиты Солнца набирается столько вещества, что его суммарная масса в 100 миллиардов раз превышает солнечную. Гравитационные силы из различных регионов Млечного Пути *за пределами* солнечной орбиты действуют в противоположных направлениях: та материя, что граничит с солнечной орбитой с внешней стороны, тянет нас наружу, а материя в пределах окружности орбиты притягивает нас в сторону центра. Две эти противодействующие силы фактически обнуляют друг друга и никак не сказываются на орбите Солнца. Материя внутри солнечной орбиты, например земной шар (обладающий массой), действует таким образом, как если бы мы находились в центре. Итак, если бы мы могли измерять орбитальную скорость звезд на *разных* расстояниях от центра Галактики, то нам бы удалось построить график спектра масс Млечного Пути как функцию расстояния от входящих в него объектов до центра.

Какой результат мы ожидаем получить? Солнце находится примерно на полпути от центра до края Галактики, и чем дальше мы уходим от Солнца к краю, тем заметнее снижается плотность распределения звезд. Подсчитывая звезды, приходим к выводу, что большая часть массы Млечного Пути сосредоточена в пределах солнечной орбиты. Итак, можно воспользоваться уже знакомым уравнением:

$GM(<R) = v^2R$,

где $M(<R)$ – это масса, находящаяся в пределах радиуса R. Если за пределами радиуса солнечной орбиты не так много массы, то величина $M(<R)$ превращается в константу, и мы ожидаем, что за пределами солнечной орбиты величина v^2R также будет примерно постоянной и $v2$

будет пропорциональна $1/R$. Соответственно орбитальные скорости v вне солнечной орбиты должны масштабироваться пропорционально $1/\sqrt{R}$. Именно такую закономерность мы наблюдаем в Солнечной системе: внешние планеты испытывают сравнительно слабое притяжение со стороны Солнца и, соответственно, движутся по орбитам медленнее, нежели внутренние планеты. Ожидается, что скорости орбитального вращения звезд должны снижаться в направлении от солнечной орбиты к краю Галактики.

Выполнять такие измерения в Млечном Пути сложно, и только в середине 1980-х годов астрономам удалось определить орбитальные скорости звезд и межзвездного газа на разнообразных расстояниях от центра Галактики. Каково же было их удивление, когда оказалось, что, по результатам измерений, скорости орбитального вращения во внешних регионах Млечного Пути *не уменьшаются*, а остаются практически постоянными.

Где же ошибка в наших рассуждениях? Глядя в сторону, противоположную от центра Галактики, мы видим меньше звездного света, чем в пределах орбиты Солнца, и из этого делаем вывод, что масса вещества, содержащегося в тех отдаленных регионах, также невелика. В этом выводе стоит усомниться. Чтобы вычислить массу содержимого Млечного Пути в пределах солнечной орбиты, мы воспользовались параметрами самой солнечной орбиты; аналогично, можно взять параметры орбит еще более далеких звезд, вращающихся по Млечному Пути, чтобы вычислить массу, заключенную в пределах этих более широких орбит. Воспользовавшись нашим уравнением $GM(<R) = v^2R$, находим, что если скорость v остается постоянной, то масса, находящаяся в пределах радиуса R, линейно возрастает вместе с R. Чем сильнее мы удаляемся, тем больше массы обнаруживаем. Значительная доля массы Млечного Пути находится за пределами солнечной орбиты, но эта материя попросту не видна, поскольку не входит в состав звезд. Она называется *темной материей*. Присутствие темной материи угадывается лишь по ее гравитационному воздействию на звездные орбиты.

Сколько темной материи содержится в Млечном Пути? Ответ зависит от того, как далеко, на наш взгляд, простирается Млечный Путь. На расстоянии 40 000 световых лет от центра Галактики звезд уже практически нет, но орбитальные скорости тех немногих звезд, что расположены еще дальше, практически не отличаются от орбитальной скорости Солнца: примерно 220 км/с. Согласно максимально точным современным оценкам, на звезды и межзвездную среду приходится лишь

незначительная часть всей массы Галактики, может быть, 10 %. Львиная доля массы Млечного Пути, примерно в триллион раз превышающая массу Солнца, присутствует в форме темной материи, простирающейся, вероятно, на 250 000 световых лет от центра Галактики. Примерно такую же массу можно вычислить, исходя из взаимных орбит Млечного Пути и Туманности Андромеды, нашей галактики-спутницы (воспользовавшись ньютоновским законом всемирного тяготения). Когда-то две эти галактики удалялись друг от друга (по причине общего расширения Вселенной), а сегодня летят навстречу одна другой со скоростью примерно 100 км/с и столкнутся приблизительно через 4 миллиарда лет.

Темную материю впервые обнаружил в 1933 году астроном Фриц Цвикки, измеривший общую массу галактического скопления Волосы Вероники. При этом он воспользовался нетривиальной версией формулы $GM = v^2R$, подставив в нее радиус галктического скопления и скорости отдельных галактик, движущихся в гравитационном поле всего скопления в целом. Цвикки заключил, что скопление гораздо массивнее, чем совокупность всех входящих в него звезд и галактик, которые мы в состоянии наблюдать. Оставшееся вещество Цвикки назвал «*dunkle Materie*», на его родном немецком языке это выражение и означает «темная материя». Как будет рассказано в главе 15, эта материя практически наверняка состоит не из обычных атомов, а из элементарных частиц, пока не известных науке.

Еще одна очень интересная форма несветящейся материи, содержащейся в Млечном Пути, локализуется прямо в центре Галактики. Если наблюдать эту область Млечного Пути в инфракрасном диапазоне, то пыль – не помеха. Звезды в самом центре Галактики движутся по эллиптическим кеплеровским орбитам, и большая полуось орбиты такой звезды составляет всего 1000 а.е. (1/60 светового года), а период – около 20 лет. Объект, вокруг которого они все вращаются, невидим, но, опять же, законы Ньютона позволяют определить его массу. Этот объект тяжелее Солнца в немыслимые 4 миллиона раз. Он очень небольшой (определенно меньше орбит тех звезд, что вращаются вокруг него) и, следовательно, исключительно плотный и при этом невидимый. По всей видимости, это черная дыра, один из наиболее захватывающих объектов во Вселенной; мы подробно поговорим о черных дырах в главах 16 и 20. Итак, изучая Млечный Путь, мы добрались до переднего края физики: окраины Галактики заполнены экзотическими элементарными частицами, а в центре Галактики притаилась массивная черная дыра.

Глава 13
Вселенная галактик

Автор: Майкл Стросс

Век назад, когда Харлоу Шепли определял размеры Млечного Пути и наше место в нем, все астрономы считали, что Млечный Путь – это и есть вся Вселенная. Действительно, когда Шепли продемонстрировал, что Млечный Путь простирается на десятки тысяч световых лет, он был убежден, что построил карту всей Вселенной – сама эта огромная величина склоняла к такому выводу. Однако астрономов давно занимало, что же представляют собой туманности, заметные в телескопы. Звезда выглядит в телескоп как точка света, а туманности часто кажутся «продолговатыми» и размытыми. В этой книге мы уже обсуждали разные туманности: например, планетарные, возникающие, когда красный гигант сбрасывает внешние оболочки. Туманность Ориона – регион интенсивного звездообразования, где окружающий газ флуоресцирует, так как подсвечивается сиянием жарких молодых звезд. Есть даже темные туманности – облака пыли, не пропускающие свет от расположенных за ними звезд. Однако существует иной класс туманностей, которые за характерную форму именуются *спиральными*. Туманности этого класса сильно напоминают Млечный Путь, каким мы его сегодня представляем. Сто лет назад спиральная структура диска Млечного Пути еще, конечно же, не была известна: живя в самом диске, мы не представляли себе его трехмерной структуры, и поэтому нам было сложно уловить его сходство с более широким классом объектов. Как вы помните, астрономические изображения лишены «глубины»: рассматривая конкретную туманность, априори невозможно сказать, что именно перед нами: небольшой объект, удаленный на несколько сотен световых лет, либо поистине колоссальная структура, до которой миллионы световых лет.

На рис. 13.1 показана типичная спиральная туманность M101, вид сверху. Хорошо просматриваются ее спиральные рукава, напоминающие вертушку, поэтому астрономы так и называют ее: галактика Вертушка.

Рис. 13.1. M101, галактика Вертушка. Снимок предоставлен: NASA/ Космический телескоп Хаббл

Физическая природа, размер спиральных туманностей, а также расстояние до них были в числе наиболее важных проблем, над решением которых бились астрономы в первое десятилетие XX века. Немецкий философ Иммануил Кант еще в 1755 году предполагал, что спиральные туманности – это иные «островные вселенные», то есть объекты, не уступающие по размеру всей известной Вселенной, Млечному Пути. Учитывая параметры Млечного Пути, вычисленные Шепли, и небольшой видимый угловой размер спиральных туманностей, оставалось предположить, что они должны находиться страшно далеко – в миллионах

или десятках миллионов световых лет от нас.

Рис. 13.2. Изображение туманности Андромеды, полученное в рамках проекта Слоановский цифровой обзор неба. Туманность Андромеды – это галактика, которую мы видим практически с ребра. У нее есть две небольшие эллиптические спутниковые галактики (M32 снизу, NGC205 сверху). Снимок предоставлен: Слоановский цифровой обзор неба и Doug Finkbeiner

Сам Шепли считал такую версию совершенно невероятной, и в 1920 году участвовал в публичных дебатах с астрономом Гебером Кёртисом из калифорнийской обсерватории Лика по поводу природы спиральных туманностей. Кёртис был убежден в гипотезе, что спиральные туманности – это такие же галактики, как и Млечный Путь, но Шепли возражал, что в таком случае расстояния до спиральных галактик должны быть настолько велики, что такие цифры невозможно воспринимать всерьез. Как часто бывает в науке, противоречия такого рода удается снять лишь после получения новых, более качественных данных, и описанные дебаты как таковые получились неокончательными. Тем астрономом, кто выполнил нужные наблюдения и поставил точку в этом споре раз и навсегда, был Эдвин Хаббл, работавший в калифорнийской обсерватории Маунт-Вилсон. Он воспользовался переменными звездами (этот метод был рассмотрен в главе 12), чтобы определить расстояние до туманности Андромеды – самой яркой спиральной туманности на ночном небе (рис. 13.2).

В идеальных условиях (ясная безлунная ночь вдали от городских огней) туманность Андромеды заметна невооруженным глазом;

действительно, она была известна еще в древности.

Обсерватория Маунт-Вилсон, расположенная на хребте Сан-Гейбриэл, господствующем над районом Лос-Анджелеса, на тот момент располагала крупнейшим в мире телескопом. Диаметр основного зеркала этого телескопа составлял 2,5 м. Когда Хаббл сделал несколько снимков туманности Андромеды при помощи такого телескопа, он обнаружил, что рассеянный свет туманности распадается на свет отдельных звезд. Точно такой результат получил Галилео Галилей, который тремястами годами ранее направил свой примитивный телескоп на Млечный Путь. Уже эти наблюдения подсказали Хабблу, что туманность Андромеды должна находиться довольно далеко, но, чтобы получить конкретные числа, ему предстояло еще немало поработать. После многократных наблюдений туманности Андромеды Хаббл обнаружил в ней несколько звезд, яркость которых периодически то возрастала, то падала. Он понял, что это переменные звезды-цефеиды. Такие переменные звезды обладают большей светимостью, чем звезд класса RR Лиры, а периоды их пульсации составляют от нескольких дней до нескольких месяцев. В 1912 году Генриетта Ливитт, работавшая в Гарварде (см. главу 7), нашла отношение между периодом переменности звезды-цефеиды и светимостью этой звезды (рис. 13.3). Хабблу удалось измерить периоды этих цефеид, определить их светимость по формуле Ливитт и, измерив яркость этих звезд, вычислить расстояние до них. Получился ошеломляющий вывод: туманность Андромеды удалена от нас на непостижимое расстояние в почти миллион световых лет, то есть расположена далеко за известными пределами Млечного Пути.

Рис. 13.3. Генриетта Ливитт, открывшая отношение между периодичностью и светимостью переменных звезд-цефеид. Это отношение сыграло ключевую роль при измерении расстояний до ближайших

галактик. Снимок предоставлен: Американский институт физики, фотография из архива Emilio Segre

На снимках туманности Андромеды с захватом ее краев угловой диаметр этой галактики составляет 2°. Длина окружности равна 2π (чуть больше 6) умножить на радиус окружности. Таким образом, если у нас есть гигантский круг радиусом чуть менее миллиона световых лет, то длина его окружности составит около 6 миллионов световых лет. Два градуса – это 1/180 от дины окружности (вся длина окружности содержит 360°). На основании этих данных Хаббл сделал вывод, что диаметр туманности Андромеды должен равняться около 6 миллионов световых лет/180, то есть эта галактика должна иметь примерно 30 000 световых лет в поперечнике. Таким образом, он выяснил два очень интересных факта об этой галактике: 1) галактика Андромеды имеет практически такой же диаметр, как и Млечный Путь, и 2) галактика Андромеды расположена далеко за пределами Млечного Пути.

Более того, небо изобиловало и другими спиральными туманностями, чей угловой размер был значительно меньше, и все они были тусклее туманности Андромеды. Если предположить, что эти объекты подобны туманности Андромеды, то они должны находиться еще дальше. Это был эпохальный момент в истории наших представлений о космосе. Хаббл продемонстрировал, что туманность Андромеды, а также, по аналогии с ней, другие спиральные туманности сопоставимы по размеру с галактикой Млечный Путь и удалены от нас на невообразимые расстояния. Подтвердилась гипотеза Канта о том, что спиральные туманности – это «островные вселенные», столь же крупные, как и сам Млечный Путь. Границы наблюдаемой Вселенной мгновенно расширились самым радикальным образом.

Спустя два десятилетия астрономы поняли, что в небе существует несколько типов переменных звезд-цефеид. После внесения всех поправок выяснилось, что Хаббл существенно *недооценил*расстояние до галактики Андромеды. По современным данным, до нее 2,5 миллиона световых лет. Более того, на снимках, сделанных с современных телескопов (где используются цифровые технологии, а не фотопленка), видно, что внешние, сравнительно тусклые области галактики Андромеды простираются так далеко, что она занимает примерно 3° неба. Если исходить из таких увеличенных значений, получается, что туманность Андромеды (конечно, теперь уже известно, что это не туманность, а галактика) имеет диаметр 130 000 световых лет, то есть она немного

крупнее Млечного Пути. Все-таки оценка Хаббла была недалека от истины, и именно он верно определил, что туманность Андромеды – это отдельная галактика, похожая на Млечный Путь. Даже приблизительной оценки хватило, чтобы ответить на главный вопрос, поднятый в дискуссии между Шепли и Кёртисом: Шепли ошибался, а Кёртис был прав.

Галактика Андромеды – всего одна, самая крупная из ближайших к нам галактик. Снимки, которые Хаббл сделал при помощи телескопов в обсерватории Маунт-Вилсон, продемонстрировали, что небо изобилует галактиками. Галактика Андромеды действительно имеет форму спирали, но рукава ее просматриваются плохо, отчасти потому, что мы видим диск практически с ребра. Но у других галактик – гораздо более грандиозные и стройные спиральные рукава.

Рассмотрим галактику Вертушка, упомянутую выше (см. рис. 13.1). Ее мы видим практически плашмя, поэтому спиральные рукава хорошо видны. У нее – те же основные элементы, что и у Млечного Пути, в частности, есть балдж (он немного меньше, чем балдж Млечного Пути) и три спиральных рукава, исходящих из центра. Спиральные рукава галактики Вертушка отчетливо голубые, то есть в них содержится довольно много горячих (а значит, молодых) массивных звезд. Таким образом, звездообразование там протекает в спиральных рукавах, точно как в Млечном Пути. Кроме того, по спиральным рукавам идут темные «вены» – это пылевые облака, расположенные в пределах диска и рукавов галактики, как и в Млечном Пути. Балдж желтоватый – значит, находящиеся там звезды в среднем не столь горячие, как в рукавах. Молодые жаркие звезды, заметные в рукавах, в балдже просто отсутствуют. Это общая закономерность, которая прослеживается в большинстве спиральных галактик, в том числе в Млечном Пути и в галактике Андромеды: сравнительно молодые звезды и области активного звездообразования сосредоточены в диске и в рукавах, более старые – в балдже.

Снимок галактики Вертушка усыпан множеством ярких точек. Эти звезды – не из галактики Вертушка; учитывая расстояние до нее (20 миллионов световых лет), отдельные звезды Вертушки должны казаться гораздо тусклее. Это звезды из нашего Млечного Пути, до которых, возможно, несколько тысяч световых лет, попавшие в поле зрения. Они напоминают капельки дождя на ветровом стекле автомобиля. Опять же, этот пример напоминает, что мы наблюдаем плоскую проекцию трехмерных небес; не ощущая глубины, мы не знаем, какие объекты ближе, а какие – дальше. Фактически некоторые тусклые объекты, расположенные на самой периферии этого изображения, – уже другие галактики, до

которых не миллионы, а миллиарды световых лет. Угловой диаметр галактики Вертушка на небе составляет примерно полградуса. Учитывая, что до нее 20 миллионов световых лет, ее истинный диаметр составляет около 170 тысяч световых лет, то есть она вдвое больше Млечного Пути.

Рис. 13.4. Галактика Сомбреро. Сомбреро – спиральная галактика с большим балджем, мы видим ее практически с ребра. Снимок предоставлен: NASA и Hubble Heritage Team (Ассоциация университетов по астрономическим исследованиям (AURA)/ Научный институт космического телескопа (STSCi)), космический телескоп «Хаббл», ACS STScI-03–28

Галактика на рис. 13.4 называется Сомбреро. У нее огромный балдж (гораздо больше, чем у Млечного Пути), полностью доминирующий над всей галактикой, которая, таким образом, напоминает по форме широкополую шляпу. Галактика расположена так, что мы видим ее практически с ребра, и мы видим, насколько тонок ее диск, но ее спиральная структура не просматривается. При таком расположении галактики очевидна роль пыли, локализованной в плоскости диска, а на диске видны красивые темные полосы («окантовка» полей шляпы), точно такие, как и в нашей Галактике.

Не у всех галактик есть диск – некоторые состоят из одного балджа, в

котором преобладают старые звезды и почти нет пыли и газа. Хаббл назвал такие галактики *эллиптическими*.

На рис. 13.5 изображено скопление галактик в созвездии Персея, где сотни эллиптических галактик сосредоточены в области пространства поперечником около миллиона световых лет. Действительно, почти все галактики на этом снимке эллиптические. Кроме того, на переднем плане мы видим множество звезд – это густо расположенные звезды из Млечного Пути, за которыми расположено скопление Персея.

Рис. 13.5. Центр скопления галактик в созвездии Персея, сфотографированный из Слоановского цифрового обзора неба. Снимок предоставлен: Слоановский цифровой обзор неба и Robert Lupton

Большинство ярких галактик – эллиптические или спиральные, но некоторые галактики не вписываются ни в одну из этих двух групп, и они попросту называются *неправильными галактиками*, так как имеют неправильную форму. Именно к этой категории относится Большое Магелланово Облако – миниатюрная галактика-спутник (14 000 световых

лет в поперечнике), обращающаяся вокруг Млечного Пути на расстоянии примерно 160 000 световых лет. На рис. 12.1 эта галактика заметна у левого края, прямо над куполом обсерватории. В самом деле, она так близко, что ее легко рассмотреть невооруженным глазом.

Расстояние между Млечным Путем и галактикой Андромеды – примерно 2,5 миллиона световых лет, что примерно в 25 раз больше размера самих этих галактик. Расстояние между галактиками довольно велико по сравнению с их диаметрами, поэтому большая часть объема Вселенной приходится на *межгалактическое пространство* – пространство между галактиками. Однако в главе 12 мы узнали, что расстояние от Солнца до ближайшей звезды составляет примерно 30 миллионов солнечных диаметров. А расстояние до ближайшей галактики – всего 25 диаметров Млечного Пути. Даже если вам удастся осмыслить размеры отдельных звезд, межзвездные расстояния сложно уложить в голове. Но если привыкнуть к размерам галактик, то расстояния между ними покажутся совсем небольшими. Учитывая, что (с поправкой на их размеры) галактики расположены достаточно тесно, совсем не удивительно, что они часто сталкиваются.

Галактика Головастик (рис. 13.6), удаленная от Земли примерно на 400 миллионов световых лет, образовалась в результате столкновения большой и малой спиральных галактик, причем меньшая из них выглядит сильно искореженной, она засела между спиральными рукавами большей вверху слева. Из-за гравитационного взаимодействия между двумя галактиками один из спиральных рукавов большей вытянулся в длинный хвост (примерно 300 000 световых лет), усеянный горячими голубыми звездами. Центр большей галактики довольно пыльный, о чем свидетельствуют темные полосы. В настоящее время Млечный Путь и галактика Андромеды летят навстречу друг другу под действием взаимного гравитационного притяжения. Когда они столкнутся (это произойдет примерно через 4 миллиарда лет), гравитационные приливные взаимодействия, вероятно, породят такие же звездные «хвосты», как и в галактике Головастик.

Астрономы десятилетиями спорили о том, что происходит при таком слиянии галактик. После того как через несколько сот миллионов лет они «утрясутся», превращаются ли они в эллиптические галактики? На самом деле, здесь мы подходим к базовому вопросу о том, как вообще формируются галактики. Звезды в эллиптических галактиках, как правило, старше, чем в спиральных, – таким образом, эллиптические галактики образовались на более ранних этапах истории Вселенной. Балджи, окруженные спиральными рукавами, принципиально похожи на

эллиптические галактики, а значит, и они могли сформироваться схожим образом. Газ, впоследствии оседающий на уже сформированную эллиптическую галактику, может остывать слишком быстро, так что звезды из него образоваться не успевают. При таком остывании газ теряет энергию, но не момент импульса, поэтому из него может получиться тонкий вращающийся диск. В таком случае эллиптическая галактика может превратиться в спиральную. Детали этого процесса по-прежнему плохо понятны и активно обсуждаются.

Рис. 13.6. Галактика Головастик, снимок космического телескопа «Хаббл». На самом деле это две слившиеся галактики, и в процессе слияния у них вырос длинный хвост. На снимке заметно множество тусклых, более далеких галактик. Снимок предоставлен: Научно-инженерная группа по обслуживанию усовершенствованной обзорной камеры (ACS), NASA

Нужно еще кое-что добавить к рассказу о галактике Головастик. Если присмотреться, то можно заметить в кадре россыпь гораздо более мелких галактик. Это полноценные галактики, которые просто расположены гораздо дальше (поэтому они кажутся тусклее и меньше). До некоторых – миллиарды световых лет. Их свет летел к нам миллиарды лет; мы наблюдаем эти галактики не в нынешнем виде, а такими, каковы они были в гораздо более молодой Вселенной. Телескоп – это машина времени: он показывает далекое прошлое и позволяет изучать процессы развития галактик в масштабах космического времени. Разумеется, каждую галактику мы видим лишь в определенный момент ее истории, но, сравнивая свойства далеких галактик, наблюдаемых в окружающей Вселенной, можно размышлять о том, как совокупность галактик менялась в течение миллиардов лет, а далее переходить к вопросам, когда образовались галактики и почему некоторые из них спиральные, а другие – эллиптические.

При очень длительных экспозициях телескоп «Хаббл» показал тысячи тусклых далеких галактик на небольшом участке неба, занимающем всего несколько минут дуги (см. рис. 7.7). Итак, в наблюдаемой Вселенной порядка 100 миллиардов галактик. Каждая из этих едва различимых точек – это целая галактика, такая же, как Млечный Путь, и в ней более 100 миллиардов звезд. Умножив 10^{11}звезд на 10^{11} галактик, делаем вывод, что в наблюдаемой части Вселенной около 10^{22} звезд, это поистине умопомрачительное число. Что мы понимаем под «наблюдаемой частью Вселенной»? Как образуются галактики? Чтобы ответить на эти вопросы, нужно понять, как развивается сама Вселенная, – именно к этому вопросу мы сейчас и переходим.

Глава 14
Расширение Вселенной

Автор: Майкл Стросс

Изучая природу небесных объектов, астрономы придерживаются одной из двух основных стратегий. Одна – фотографировать объекты, измерять их размеры и яркость. Вторая – измерять спектры. Как мы уже знаем, по спектрам звезд можно определять температуру их поверхности, а также их химический состав. Вооружившись этими знаниями и информацией с диаграммы Герцшпрунга – Расселла, можно определить размер, массу звезды и то, на каком этапе эволюции она находится.

Что могут поведать о физической природе галактик их спектры? Астрономы начали измерять спектры галактик около 100 лет назад, примерно в 1915 году. Галактики тусклые, телескопы тогда были меньше, и приборы – гораздо менее чувствительны, чем сегодня. Поэтому измерение спектра галактик превращалось в многочасовую работу. Но в этих первых спектрах обнаружились такие же линии поглощения, как и в звездах (например, в звездах спектральных классов G и K), – и астрономы сразу же поняли, что галактики состоят из звезд. Эдвин Хаббл пришел к такому же выводу, когда десять лет спустя анализировал детальные снимки туманности Андромеды (об этом шла речь в главе 13). Спектры галактик оказались приятно знакомы астрономам, привыкшим изучать спектры звезд. Однако быстро обнаружилось важное отличие. Длина волн в линиях поглощения от таких элементов, как кальций, магний и натрий, немного отличалась от значений, наблюдаемых в спектрах звезд. Как правило, все спектральные линии в каждой отдельной галактике систематически смещались в сторону красной области спектра. Этот феномен называется «*красное смещение*».

Чтобы понять принцип красного смещения, достаточно встать на оживленном перекрестке и послушать, как гудят проезжающие мимо мотоциклы. Когда мотоцикл приближается к вам, он издает высокий звенящий звук. Затем, когда он удаляется, звук мотора становится заметно ниже. Получается такое «иииаааоооууу».

Звук, издаваемый мотоциклом, – это упругая волна, распространяющаяся в воздухе, которая, как и свет, имеет определенную длину и частоту; чем выше частота (и чем меньше длина волны), тем выше

будет звук, который мы услышим. Движущийся мотоцикл распространяет вокруг множество таких волновых гребней, и чем он ближе, тем теснее идут друг за другом гребни волн и тем выше звук. Напротив, когда мотоцикл удаляется, достигающие вас волны вытягиваются, и поэтому звук кажется ниже. Этот эффект, впервые описанный в 1842 году австрийцем Кристианом Доплером, действует для световых волн точно как для звуковых: движение далекой галактики или звезды проявляется в виде систематического сдвига волн в ее спектре. Таким образом, считается, что красное смещение галактик обусловлено доплеровским эффектом: галактики от нас удаляются. Относительное изменение длины волны, излучаемой объектом, равно скорости объекта, деленной на скорость звука (если речь идет о звуковых волнах) или на скорость света (если мы измеряем свет, идущий от некоторого объекта). Скорость звука в земной атмосфере равна примерно 1200 км/ч, и хороший мотоцикл вполне развивает десятую долю этой скорости. Соответственно звук проезжающего мимо мотоцикла успевает измениться по высоте примерно на 20 % (минус 10 % от скорости звука при приближении к вам и плюс 10 % при удалении) – довольно заметно, в музыке такой интервал называется «малая терция».

Оттенок света зависит от длины его волны, и удаляющийся от нас объект, световые волны которого удлиняются, будет казаться покрасневшим. Этот эффект будет заметен (как минимум невооруженным глазом) лишь при скоростях, сопоставимых со скоростью света. Мотоцикл развивает ничтожную долю скорости света, поэтому нам не кажется, что он краснеет, удаляясь от нас. Мы не видим, как вокруг с огромной скоростью проносятся звезды и галактики, но у них есть характерные черты – спектральные линии поглощения, присущие определенным химическим элементам, а длины волн, соответствующие этим линиям, с большой точностью измерены в лабораториях на Земле. Можно измерить аналогичные длины волн в конкретной звезде или галактике; разница между длинами волн этих элементов, наблюдаемыми на Земле и в звезде или галактике, трактуемая как доплеровское смещение, позволит судить, насколько быстро звезда или галактика удаляется от нас.

Около 1915 года Весто Слайфер, работавший в лаборатории Лоуэлла (где впоследствии был открыт Плутон), измерил доплеровское смещение 15 галактик. У галактики Андромеды и двух других галактик было синее смещение (оказалось, что эти галактики движутся к нам), а у всех остальных – красное, и, значит, эти галактики от нас удаляются. Красное смещение обозначается буквой *z* и вычисляется по формуле (набл – лаб)/

лаб, где лаб – это длина эмиссионной линии или линии поглощения у химического элемента, измеренная в лаборатории на Земле, а набл – это длина соответствующей линии того же элемента в спектре галактики. Красное смещение z ближней галактики относится к ее скорости удаления v по формуле $z \approx v/c$. Следовательно, галактика со скоростью разбегания в 1 % скорости света будет иметь красное смещение $z = 0{,}01$, и длины волн всех спектральных линий в этой галактике будут увеличены на 1 %. Астрономическое сообщество уже успело измерить спектры более 2 миллионов галактик. Почти все они за редкими исключениями (среди которых – галактика Андромеды) демонстрируют красное смещение. Таким образом, практически все галактики во Вселенной удаляются от Млечного Пути. Как-то раз я видел глупую карикатуру, на которой изображен сумасшедший ученый у телескопа. Ученый воздевает руки к небу и говорит: «Ах, галактики разбегаются, потому что терпеть нас не могут!» Это неверное объяснение, но примечательно, что мы как будто занимаем особое положение, находимся в центре, от которого разлетаются все галактики. Что же происходит на самом деле? Именно Хаббл оказался тем человеком, кто вновь выполнил важнейшие измерения в конце 1920-х – начале 1930-х годов и помог прийти к современному пониманию этих красных смещений.

Измерив по переменным звездам-цефеидам расстояние до туманности Андромеды, Хаббл продолжил такую работу с другими галактиками, оценивая расстояние до них по различным параметрам. Чем дальше галактика, тем сложнее становится такая работа; в отдаленных галактиках все труднее различить отдельные звезды. По современным меркам, измерения Хаббла были грубыми, но к концу 1920-х годов он примерно определил расстояния до некоторых галактик, причем измерил не только расстояния, но и спектры, а следовательно, узнал их красные смещения и скорости. Он построил простой график, сравнив расстояния до галактик и их скорости. Тогда обнаружилась закономерность: чем дальше галактика, тем выше ее скорость. Действительно, несмотря на значительные погрешности при измерениях, Хаббл смог заключить, что скорость v и расстояние d, по-видимому, пропорциональны друг другу:

$$v = H_0 d.$$

Эта пропорциональная зависимость между скоростью и расстоянием сегодня известна под названием «*закон Хаббла*», а константа пропорциональности H_0 теперь именуется в его честь постоянной Хаббла.

Постоянная Хаббла действительно одинакова по всей Вселенной в любой момент времени, но, как мы увидим позднее, отличается в разные космические эпохи. Величина H_0 – это постоянная Хаббла в настоящее время.

Сегодня, оглядываясь назад, примечательно, что Хаббл сумел выявить пропорциональное отношение между скоростью и расстоянием, располагая весьма некачественными данными (как вы помните, он недооценил расстояние до Галактики Андромеда в 2,5 раза). С 1929 года телескопы и научные методы значительно усовершенствовались. Действительно, один из ключевых проектов, реализованных на космическом телескопе «Хаббл», был посвящен точному расчету расстояний до галактик, и при работе, в частности, использовались замеры по цефеидам, на которые ориентировался и Хаббл. Измерения подтвердили правоту Хаббла и продемонстрировали, что красное смещение галактик и расстояние до них действительно в точности пропорциональны. Это было одно из поистине прорывных открытий, сделанных по неточным данным прямо на переднем крае науки и на пределе технологических возможностей своего времени. На первом графике Хаббла учитывались лишь галактики со скоростью v примерно 1000 км/с, до которых, по современным измерениям, около 50 миллионов световых лет. К 1931 году Хаббл и его коллега Милтон Хьюмасон расширили график, включив в него галактики со скоростью удаления до 20 000 км/с. На этом вопрос был окончательно закрыт.

На самом ли деле Млечный Путь занимает особое место во Вселенной – находится в точке, от которой разбегаются все галактики? Подобный феномен противоречил бы одной сквозной теме, к которой мы уже обращались; иногда ее называют принципом Коперника. Согласно этому принципу, Земля занимает во Вселенной ничем не примечательное место. Птолемей и другие древние ученые помещали Землю в центре Вселенной, но Коперник продемонстрировал, что Земля обращается вокруг Солнца. Впоследствии мы узнали, что Солнце – рядовая звезда главной последовательности. Хотя Каптейн и считал поначалу, что Солнце занимает особое место близ центра Млечного Пути, более точные исследования Шепли показали, что Солнце находится примерно на полпути от центра до края Галактики. На первый взгляд, замеры красного смещения поставили Млечный Путь в особое положение относительно других галактик – в ту самую точку, где находится центр расширения. Но на деле все не так.

Рассмотрим четыре галактики, расположенные через равные промежутки на одной линии: Галактика 1 находится слева, через 100

миллионов световых лет от нее располагается Млечный Путь, еще на 100 миллионов световых лет дальше находится Галактика 3, а еще на 100 миллионов световых лет дальше – Галактика 4 (то есть между ней и Галактикой 1 будет 300 миллионов световых лет). Согласно закону Хаббла, если наблюдать Млечный Путь из Галактики 1, он будет убегать от нее со скоростью 2000 км/с (см. первый набор стрелок на рис. 14.1). Галактика 3, расположенная от Галактики 1 в 2 раза дальше, чем Млечный Путь, будет убегать от нее со скоростью 4000 км/с, то есть вдвое быстрее, а Галактика 4, расположенная от Галактики 1 в 3 раза дальше, чем Млечный Путь, будет убегать со скоростью 6000 км/с. Как все это будет выглядеть из Млечного Пути? Рассмотрим второй набор стрелок. Мы удаляемся от Галактики 1 со скоростью 2000 км/с, но измеряем движение в нашей системе координат, поэтому видим, что Галактика 1 убегает от нас влево со скоростью 2000 км/с. При этом мы видим, что Галактика 3 улетает со скоростью 2000 км/с в противоположном направлении, вправо. Две эти галактики равноудалены от нас и улетают с одинаковой скоростью. Галактика 4 удаляется от нас с относительной скоростью 4000 км/с. Она вдвое дальше первых двух галактик, поэтому и удаляется от нас с удвоенной скоростью. Нам кажется, что все галактики от нас разбегаются, причем чем дальше галактика, тем выше ее скорость удаления. Наши наблюдения также согласуются с законом Хаббла.

Теперь рассмотрим эту ситуацию с точки зрения инопланетянина из Галактики 3. Доплеровское смещение позволяет судить только лишь об относительной скорости галактик. Инопланетянин видит на расстоянии 100 миллионов световых лет галактику Млечный Путь, которая удаляется (влево) со скоростью 2000 км/с. Галактика 4, удаленная от этого астронома на 100 миллионов световых лет в противоположную сторону, удаляется от него (в другую сторону) с относительной скоростью 2000 км/с. Наконец, Галактика 1 удаляется от него с относительной скоростью 4000 км/с. Инопланетянину кажется, что все галактики разбегаются в стороны, и *он* находится в центре, откуда происходит такое разбегание. Инопланетянин считает, что находится в покое и все галактики от него убегают, – точно к такому выводу пришли и мы, будучи в Млечном Пути.

Рис. 14.1. Галактики расположены в ряд, где каждая следующая галактика удаляется быстрее предыдущей. Из рисунка понятно, что нет такой галактики, которая находилась бы в центре Вселенной. По верхнему краю рисунка изображены четыре галактики, вторая из которых – Млечный Путь. Они разделены промежутками по 100 миллионов световых лет. По закону Хаббла, они удаляются друг от друга тем быстрее, чем сильнее удалены одна от другой на этой линии. Первый набор из трех стрелок соответствует трем скоростям, которые будут измерены при наблюдении из Галактики 1. Поскольку эти измерения относительны, астроном из Млечного Пути полагает, что сам находится в покое, а три остальные галактики удаляются от него, причем скорость разбегания галактик пропорциональна расстоянию до них (следующий набор стрелок). То же самое справедливо при наблюдении из Галактики 3. Каждый из троих наблюдателей сочтет, что сам находится в покое, а все галактики разбегаются в стороны по закону Хаббла. Иллюстрация предоставлена: Майкл Стросс, «Млечный Путь» (художественное изображение, подготовленное в NASA); снимки других галактик предоставлены Слоановским цифровым обзором неба и Робертом Лаптоном

Инопланетянин, как и мы, приходит к выводу, что скорость разбегания пропорциональна расстоянию и ни Млечный Путь, ни Галактика 3 не занимают никакого особенного места во Вселенной.

На самом деле, закон Хаббла свидетельствует о двух фактах. Во-первых, расстояние между любыми двумя галактиками увеличивается; все галактики разбегаются друг от друга. Хаббл открыл расширение Вселенной! Во-вторых, ни одна конкретная галактика не находится в центре такого расширения. Находясь в своей галактике, мы приходим к выводу, что все остальные галактики разбегаются от нас. Галактики можно сравнить с бисеринками, приклеенными к эластичной резиновой ленте, и при растяжении ленты все бисеринки удаляются друг от друга. Чтобы окончательно убедиться, что центра расширения не существует, нужен еще один довод: мы должны убедиться, что пространство, заполненное галактиками, не имеет краев. Рич во всех подробностях рассмотрит эту тему в главе 22, где речь пойдет об общей теории относительности Эйнштейна применительно к космологии.

Млечный Путь достигает 100 000 световых лет в поперечнике, но он – всего лишь одна из 100 миллиардов (10^{11}) галактик в наблюдаемой части Вселенной, и в каждой из этих галактик порядка 100 миллиардов звезд. Туманность Андромеды – самая близкая к нам крупная галактика, от нее до Млечного Пути 2,5 миллиона световых лет; большинство галактик гораздо дальше, и расстояния до них могут измеряться миллиардами световых лет.

Эдвин Хаббл открыл, что галактики разбегаются друг от друга со скоростями, пропорциональными расстоянию между ними; для далекой галактики такая скорость удаления может составлять существенную долю скорости света. Поэтому мы приходим к выводу, что вся Вселенная расширяется. Это было поистине одно из величайших научных открытий XX века, сравнимое с открытием структуры ДНК и роли этой молекулы при передаче генетического кода либо с разработками Эйнштейна в области теории относительности.

Закон Хаббла позволяет без труда вычислять расстояния до галактик. Учитывая пропорциональность между красным смещением и расстоянием до галактики, достаточно измерить красное смещение галактики (что не составляет труда, если можно определить спектр галактики) – и получится непосредственно оценить расстояние до нее (в противном случае измерить это расстояние было бы сложно). Метод работает отлично, если знать константу пропорциональности H_0 между двумя галактиками. Чтобы точно определить значение этой постоянной, мы для начала тщательно измеряем

расстояния до галактик из заранее сделанной выборки, до каждой галактики отдельно.

Как мы уже убедились выше, измерение расстояния до астрономического тела – важный шаг на пути к познанию этого объекта. Зная расстояние до объекта, можно определить ряд его ключевых характеристик, в частности светимость и размер. Поэтому большая часть истории астрономии сосредоточена вокруг разнообразных хитроумных методов, разработанных учеными для измерения расстояний. Измерение астрономической единицы (расстояния от Земли до Солнца) в физических единицах (то есть метрах) было одной из крупнейших научных проблем XVIII и XIX века, и верно решить эту проблему в конце концов удалось, наблюдая за прохождениями Венеры по диску Солнца и за смещением Марса на фоне далеких звезд, причем эти наблюдения велись из разных точек Земли (см. главу 2). Такой эффект параллакса позволил определить расстояния до Венеры и до Марса, а следовательно, и расстояние от Земли до Солнца методом триангуляции. Астрономическая единица задает шкалу расстояний для всей Солнечной системы, а также позволяет использовать эффект параллакса на базе земной орбиты вокруг Солнца и таким образом определять расстояния до ближайших звезд. Если звезда находится так далеко, что измерить для нее наблюдаемый параллакс невозможно – то есть если до нее свыше нескольких сотен световых лет, – то в дело идет закон обратных квадратов, в котором соотносится истинная светимость звезды и наблюдаемая яркость этой звезды в небе. Чем тусклее выглядит на небе объект с известной светимостью, тем дальше он находится.

Самое сложное в данном случае – узнать светимость объекта. Мы уже говорили о переменных звездах-цефеидах, которые являются одной из разновидностей *стандартных свечей*, чью истинную светимость легко узнать. Далее применяется закон обратных квадратов и выясняется расстояние. Хорошая стандартная свеча должна:

1) обладать достаточной светимостью, чтобы быть заметной издалека;
2) легко идентифицироваться и отличаться от других объектов, и еще важно,
3) чтобы недалеко от нее были другие сравнимые образцы, по которым легко откалибровать абсолютную светимость (например, по эффекту параллакса или другими методами).

Переменные звезды-цефеиды удовлетворяют первым двум

требованиям; их светимость очень велика, а благодаря переменности их легко находить в густой россыпи звезд. Однако лишь немногие переменные-цефеиды расположены настолько близко к нам, чтобы можно было точно измерить их параллаксы, и из-за этого возникали споры об их истинной светимости. На самом деле Генриетта Ливитт неверно откалибровала расстояние до тех цефеид, которые измеряла, и ошибка возникла из-за сравнения с другими неверно измеренными аналогичными звездами, расположенными поблизости. Именно по этой причине Хаббл недооценил расстояние до галактики Андромеда. Ближайшая к нам переменная-цефеида – это Полярная звезда, до которой примерно 400 световых лет.

Мы убедились, что у звезд главной последовательности прослеживается прямая взаимосвязь между температурой и светимостью. Следовательно, если мы сможем измерить температуру звезды (например, по ее спектру), то сможем уверенно оценить ее светимость; а затем, зная наблюдаемую яркость, измерить расстояние до этой звезды. Такая стандартная свеча вполне хорошо калибруется по ближним звездам, расстояния до которых измерены методом параллакса, а в дальнейшем может использоваться и для измерения более отдаленных звезд – настолько дальних, что к ним метод параллакса уже неприменим. На большом расстоянии заметны лишь звезды с очень высокой светимостью, но такие звезды встречаются настолько редко, что найти их поблизости и измерить параллакс почти не удается.

Такой базовый подход с определением стандартных свечей из числа светил главной последовательности может применяться сразу к целой группе звезд, а не к единственной звезде. Например, все звезды в шаровом скоплении фактически равноудалены от нас. Следовательно, если сегодня сравнить звезды главной последовательности в шаровом скоплении с (откалиброванными) звездами главной последовательности, расположенными поблизости от нас, то можно напрямую определить расстояние до всего скопления. Таким образом можно узнать расстояние до относительно редких звезд из этого скопления, тогда как методом параллакса это расстояние не измерить (в достаточной близости от нас нет нужных для этого звезд).

Как и звезды, галактики могут обладать самой разной светимостью. По-видимому, для спиральных галактик прослеживается система, аналогичная главной последовательности; в данном случае речь идет о корреляции между скоростью вращения галактики (скорость измерима по спектру галактики при помощи доплеровского эффекта) и ее светимостью.

Такое отношение скорость – светимость можно откалибровать для близлежащих спиральных галактик. Затем можно измерить вращение более удаленных спиральных галактик, чтобы определить присущую им светимость и, следовательно (дополнительно измерив их яркость), можно определить расстояние до них.

Такие многоэтапные измерения, когда, узнавая расстояние до объекта одного типа, мы выводим расстояние до другого объекта, более редкого, но обладающего более высокой светимостью (а этот объект, в свою очередь, может использоваться для промеров расстояний до еще более удаленных объектов), называется *лестницей космических расстояний*. Если эта «лестница» начинает поскрипывать под ногами – да, вам не послышалось, она действительно ненадежна, и чем больше расстояния, тем выше неопределенность. Поэтому определение постоянной Хаббла H_0, соотносящей красное смещение и расстояние до галактик, сопровождалось многочисленными спорами.

Закон Хаббла $v = H_0 d$ подразумевает, что постоянная Хаббла – это результат деления скорости удаления v (обычно измеряемой в километрах в секунду) на расстояние, измеряемое в мегапарсеках (Мпк; то есть миллионах парсеков). По оценке Хаббла, его постоянная равнялась примерно 500 (км/с)/Мпк (как мы убедились, это значение завышено, поскольку он недооценил расстояние до галактики Андромеды, а это произошло из-за неверной калибровки цефеид другими учеными). Хаббл скончался в 1953 году, вскоре после того, как в Паломарской обсерватории близ Сан-Диего был готов огромный телескоп с 200-дюймовым (пятиметровым) зеркалом. Аллан Сендидж, бывший ассистент Хаббла, продолжил его работу по определению расстояний до галактик.

В течение следующих десятилетий Сендидж и его коллеги работали с Паломарским 200-дюймовым телескопом и другими телескопами по всему миру, что позволило добиться невероятных успехов в понимании галактик. К началу 1970-х годов у Сендиджа оставался только один серьезный соперник, также занимавшийся определением расстояний до галактик и, следовательно, уточнением постоянной Хаббла: это был астроном из Техасского университета по имени Жерар де Вокулёр. В 1970-е годы и группа Сендиджа, и группа де Вокулёра выпустили по монументальной серии статей, где изложили свои «шаги к определению постоянной Хаббла». Сендидж привел результат 50 (км/с)/Мпк (в целых 10 раз меньше изначальной оценки Хаббла), а де Вокулёр – около 100 (км/с)/Мпк. Их выкладки абсолютно отличались и в деталях, и в шагах по лестнице

космических расстояний. Все астрономическое сообщество крайне интересовалось результатами – ведь значение постоянной Хаббла задает масштабы нашей Вселенной. Красное смещение галактики легко измерить по ее спектру; зная постоянную Хаббла, мы могли бы преобразовать это красное смещение в меру расстояния.

Наконец, в 1980-е годы в это соревнование смело ввязались и различные молодые астрономы, введшие новые типы стандартных свечей и предложившие оптимизированные приемы наблюдения. Космический телескоп «Хаббл» разрабатывался отчасти и для того, чтобы дать ответы на эти вопросы: его работе не мешала атмосфера, поэтому аппарат, обладавший превосходной разрешающей способностью, позволял в точности измерять свойства переменных звезд-цефеид в галактиках, удаленных от нас на 30–40 миллионов световых лет. Команда под руководством Венди Фридман (которая много лет руководила обсерваториями Карнеги в Пасадене, там, где работал Сендидж) выполнила при помощи телескопа «Хаббл» исчерпывающую серию измерений. Ученые опубликовали результаты работы в 2001 году, сообщив, что H_0 = 72 ± 8 (км/с)/Мпк, – это почти среднее значение между результатами Сендиджа и де Вокулёра. Интересно, что Рич Готт с коллегами в 2001 году оценили постоянную Хаббла, скомбинировав в своей статье все опубликованные к тому моменту измерения (полученные самыми разнообразными методами), и взяли медианное (среднее) значение: 67 (км/с)/Мпк. Медиана часто оказывается удивительно хорошим индикатором, поскольку она менее подвержена влиянию случайных значений, нежели простое среднее. Наилучшая оценка на сегодняшний день, полученная с использованием параметров реликтового излучения (РИ), найденных спутником «Планк», равна 67 ± 1 (км/с)/Мпк. Как будет рассказано в главе 23, эту цифру подтвердили и измерения в рамках Слоановского цифрового обзора неба, результат которых составил 67,3 ± 1 (км/с)/Мпк. В последнем случае комбинировались данные по РИ, сверхновым и скоплениям галактик.

Аллан Сендидж ушел из жизни в 2010 году в возрасте 84 лет, это был один из титанов в нашей научной сфере. В своей последней статье на рассматриваемую тему, написанной в 2007 году, он отметил, что значение постоянной Хаббла может лежать в диапазоне от 53 до 70 (км/с)/Мпк; то есть он хотел поддержать именно то значение, которое у нас получается сегодня.

Теперь, когда вопрос с постоянной Хаббла исчерпан, можно вернуться

к обсуждению следствий закона Хаббла и расширению Вселенной.

Можно уподобить Вселенную колоссальному караваю хлеба с изюмом, который запекается в духовке. Галактики – это изюминки, а тесто – межгалактическое пространство. Когда хлеб поднимается (и тесто разбухает), все изюминки отодвигаются друг от друга, поэтому «с точки зрения» отдельной изюминки все остальные изюминки убегают от нее. Поэтому любая изюминка (галактика) может (ошибочно) заключить, что является центром всего пирога (Вселенной). Более того, некая изюминка, находящаяся на двойном расстоянии от первой изюминки, будет убегать от нее вдвое быстрее, чем ближняя, поскольку между ними будет нарастать вдвое больше мякиша. Изюмно-хлебная модель Вселенной подчиняется закону Хаббла.

Эта аналогия не идеальна. У хлеба с изюмом есть четко определенный центр (зная, где начинается корочка, можно найти и центр), а реальная Вселенная кажется бесконечной (насколько мы можем измерить) и у нее нет краев, ориентируясь на которые можно было бы найти ее центр. В главе 22 мы вернемся к вопросу о форме, или геометрии, Вселенной.

Согласно закону Хаббла, галактики, как правило, движутся прочь друг от друга – из этого следует вывод, что Вселенная расширяется. Означает ли это, что и отдельные галактики расширяются, и звезды в них удаляются друг от друга? Расширяется ли Солнечная система? Солнце? Сами наши тела? Люди, борющиеся с излишним весом, могли бы утвердительно ответить на последний вопрос, но на практике хаббловское расширение Вселенной прослеживается лишь в масштабе межгалактических расстояний. Галактики, как и изюминки, сами по себе не расширяются – расширяется именно пространство между ними. Те объекты, которые удерживаются в целости благодаря конкретным силам, например отдельные галактики, отдельные звезды, планеты и даже мы сами, не расширяются. На самом деле, даже Млечный Путь и галактика Андромеды связаны друг с другом силой гравитации, поэтому они летят навстречу друг другу, а не разлетаются. Именно поэтому галактика Андромеды – одна из немногих, которым присуще голубое смещение.

Мы уже упоминали, что Млечный Путь и галактика Андромеды столкнутся примерно через 4 миллиарда лет (еще до того, как наше Солнце сожжет весь водород в ядре и превратится в красный гигант). Однако расстояние между отдельными звездами в галактиках настолько огромно по сравнению с размерами самих звезд, что две галактики просто пройдут одна сквозь другую, и межзвездных столкновений при этом почти не будет. Поэтому в Голливуде вряд ли снимут блокбастер-катастрофу

«Столкновение галактик» – хотя нет, эти могут. Сколько уже раз в фильмах устраивали форменное издевательство над научными фактами ради выразительных спецэффектов!

Если Вселенная в данный момент расширяется, а пространство между галактиками со временем увеличивается, это означает, что в прошлом галактики находились ближе друг к другу. Рассмотрим галактику, отстоящую от нас на расстояние d. Она удаляется от нас с некоторой скоростью в соответствии с законом Хаббла H_0d. Если условно предположить, что эта скорость с течением времени не изменяется, то можно поставить вопрос: сколько времени потребуется галактике, чтобы преодолеть расстояние d? Иными словами, как давно эта галактика была прямо у нас над головой? Если я живу в 500 км от некоторого города и кто-то едет из этого города ко мне в гости со скоростью 50 км/ч, то он покроет это расстояние за время, вычисляемое про формуле 500 км/50 км/ч = 10 часов. В данном случае нас интересует, как давно галактика находилась прямо над нами. Промежуток времени t до этого момента времени равен расстоянию d, пройденному галактикой, деленному на ее скорость v (которая, по закону Хаббла, равна H_0d):

$$t = d/v = d/(H_0d) = 1/H_0.$$

Этот результат кажется простым – на самом деле так и есть. Но он очень информативен. Обратите внимание: время t не зависит от расстояния d до галактики. Следовательно, для любой галактики мы получим один и тот же момент в прошлом, когда эта галактика должна была находиться прямо над нами. Кажется, что в какой-то давний момент все галактики были сосредоточены в одной точке. Но, исследуя этот вопрос подробнее, не будем забывать, что озвученный факт *все равно* не означает, что мы находимся в центре расширения; мы могли бы изложить точно такую аргументацию, но взять за «точку отсчета» любую другую галактику, и получили бы все тот же результат. Напрашивается вывод, что в какой-то момент истории Вселенной вся ее материя была сосредоточена в одной точке. Все «изюминки» были спрессованы воедино. И мы знаем, когда это было! $1/H_0$ времени назад. Вот еще одна причина, почему нас так интересует значение постоянной Хаббла. Эта постоянная позволяет узнать возраст Вселенной.

Давайте считать. Наилучшая оценка постоянной Хаббла, имеющаяся у нас сегодня, получена при помощи спутника Планк и составляет 67 (км/с)/Мпк, так что обратная величина $1/H_0$ равна 1/67 с х Мпк/км. Мегапарсек равен 3,086 × 1019 км, поэтому, подставив это значение для Мпк/км и

разделив его на 67, находим, что $1/H_0$ равна 4,67 × 1017 с. Если перевести эту величину из секунд в годы, то получится, что все галактики были сосредоточены в одном месте примерно 14,6 миллиарда лет назад.

Этот момент времени называется «Большой взрыв». Сам термин предложил Фред Хойл в конце 1940-х годов. Хотя Хойл всю жизнь не признавал модель Большого взрыва и умер в убеждении, что идея ошибочна, термин с тех пор закрепился. В 1994 году Карл Саган, научный журналист Тимоти Феррис и телеведущий Хью Даунс, подобно Кальвину из приведенного ниже комикса, высказались, что концепция Большого взрыва настолько важная и основополагающая для современного понимания космологии, что она заслуживает более выразительного названия, чем «Большой взрыв». Они объявили международный конкурс, попросив зрителей предлагать альтернативные названия. Поступило более 13 000 версий, они рассмотрели все, а затем, совершенно сдавшись, признали, что «Большой взрыв» совсем неплох.

Закон Хаббла наводит на мысль, что когда-то давно, 14,6 миллиарда лет назад, вся Вселенная была сжата в одну точку и с тех пор расширяется. Расчеты времени, истекшего с момента Большого взрыва, были сделаны довольно грубо, и мы полагали, что каждая галактика движется с постоянной скоростью, но современная оценка, построенная на более сложных вычислениях, дает величину примерно 13,8 миллиарда лет. Есть ли смысл в этой оценке возраста Вселенной (ведь именно возраст нас и интересует)? Мы знаем возраст Солнечной системы в основном по измерению радиоактивного распада в лунных и метеоритных породах; он равен около 4,6 миллиарда лет. Это величина того же порядка, что и время расширения Вселенной, хотя она поменьше и поэтому звучит уютнее. Солнце и Солнечная система насыщены тяжелыми элементами, сформировавшимися при взрывах древних сверхновых, поэтому нельзя полагать, что Солнце сформировалось в числе первых звезд. Кроме того, мы рассказали, как можно определять возраст шаровых звездных скоплений, исходя из того, где на диаграмме Герцшпрунга – Рассела для этих скоплений находится точка ухода с главной последовательности: таким методом возраст древнейших шаровых скоплений оценивается в 12–13 миллиардов лет.

Совершенно удивительно, что три этих разных и абсолютно независимых способа оценки возраста Вселенной (и возраста древнейших объектов в ней) не противоречат друг другу! Остается изумляться, что три эти оценки согласуются друг с другом в пределах коэффициента 3; это

великий триумф наших фундаментальных идей об устройстве Вселенной. Тот факт, что все это величины одного порядка (и древнейшие известные нам объекты во Вселенной образовались позже Большого взрыва), действительно убеждает, что наши базовые физические идеи верны.

Рис. 14.2. Комикс «Сверхужасный космотрахбабах» из серии «Кальвин и Хоббс». Рисунок предоставлен: CALVIN AND HOBBES © 1992 Watterson. Публикуется с разрешения UNIVERSAL UCLICK. Все права защищены

Теперь давайте представим, как Вселенная выглядела в прошлом. Поскольку Вселенная расширяется, ее плотность со временем уменьшается, и определенная масса в более поздний период будет занимать больший объем, чем раньше. Итак, давным-давно Вселенная была гуще. Точно как и в случае со звездой: чем плотнее объект, тем жарче он становится, и раньше Вселенная была гораздо горячее, чем сейчас (в главе 15 будет рассказано, что мы понимаем под температурой Вселенной; оказывается, эта концепция достаточно четко определена). Действительно, на основе простейших экстраполяций приходим к выводу, что около 13,8

миллиарда лет назад был момент, когда вся наблюдаемая Вселенная имела бесконечную температуру и бесконечную плотность, и с тех самых пор до сегодняшнего дня она расширяется и остывает. Нельзя заглянуть в прошлое дальше чем на 13,8 миллиарда лет – в нашем понимании это момент рождения Вселенной. Расширение Вселенной началось в момент ее рождения и продолжается до сих пор по закону Хаббла.

Итак, в момент Большого взрыва Вселенная должна была иметь бесконечную температуру и бесконечную плотность. Была ли она в то же время бесконечно малой? Вот здесь все становится интереснее. Ответ таков: на самом деле нет, если употреблять слово «малый» в обычном значении. Предположим, что сегодня Вселенная бесконечно велика. «Подождите-ка! – могли бы возразить читатели – вы в вашей книге постоянно говорите, что наблюдаемая Вселенная конечна, ее радиус – несколько десятков миллиардов световых лет!» Так и есть. Мы различаем Вселенную в целом и *наблюдаемую* часть Вселенной – ту, которую видим сегодня; именно наблюдаемая часть Вселенной имеет конечный размер. Вселенная расширяется и, следовательно, плотность ее снижается, но если она бесконечна сегодня, то и в компактном виде, давно в прошлом, она также была бесконечной – и, определенно, она была бесконечной и в момент Большого взрыва. Таким образом, в момент рождения Вселенная была бесконечно протяженной, бесконечно плотной и бесконечно горячей. У нее не было центра и, конечно же, не было края, из-за которого можно было бы взглянуть на всю Вселенную целиком.

Все это может показаться софистикой, но именно так проще всего изложить наши современные представления о ранней истории Вселенной. Здесь я излагаю словами решения соответствующих уравнений общей теории относительности Эйнштейна, о которых мы подробнее поговорим в следующих главах. Большой взрыв напоминал не детонацию, как его иногда ошибочно изображают, а расширение очень маленького и плотного объекта в окружающее пустое пространство. На бомбу непохоже. Поскольку у Вселенной нет краев, нет и пустого пространства «за ее пределами», куда она могла бы расширяться. Расширялось *само пространство*.

Если внешних границ Вселенной не существует, то возможен ли вопрос: а что существовало до Большого взрыва? К сожалению, наши уравнения не позволяют нам его задать. Да, это разумный вопрос, но общая теория относительности не дает на него ответа. Согласно уравнениям общей теории относительности, плотность в момент Большого взрыва была бесконечной. Когда в науке уравнение дает результат «бесконечность», это

означает, что теория неполна; физика обширнее, чем область применения этих уравнений.

Таким образом, уравнения общей теории относительности отказывают в момент Большого взрыва, и именно поэтому мы не можем заглянуть в прошлое до Большого взрыва. «Что было до Большого взрыва?» – космологи постоянно задают этот вопрос и, к сожалению, часто признаются в его бессмысленности, то есть считают, что задавать такой вопрос просто глупо. Нет, не глупо; если уравнения отказывают в момент Большого взрыва, то это признак проблем с теорией, а не с вопросом! Мы вернемся к этим темам в главах 22 и 23, когда будем говорить об общей геометрии Вселенной и о том, какое событие могло инициировать Большой взрыв.

Так или иначе, по причине такого незнания космологи считают, что время началось в момент Большого взрыва. Это наш современный миф о сотворении, но, как мы убедились, он основан на непосредственных наблюдениях Вселенной и на современных представлениях о физике. Вселенная кажется бесконечной в пространстве, но возраст ее конечен. Конечный возраст (его предельность обусловлена предельностью скорости света) означает, что мы можем наблюдать лишь некоторую часть Вселенной. Рассмотрим, например, современную ситуацию: с момента Большого взрыва минуло 13,8 миллиарда лет, мы находимся в галактике Млечный Путь. Вселенная вокруг нас бесконечна, но мы не можем увидеть ее целиком, поскольку скорость света конечна. Свет от самых дальних образцов материи, который мы можем видеть, летел к нам 13,8 миллиарда лет и преодолел всего 13,8 миллиарда световых лет расширяющегося пространства между этой материей и нами. Но мы видим материю такой, какой она была в прошлом. Где она сейчас? Расширение Вселенной, продолжающееся в течение этого времени, сегодня уже унесло эту материю на 45 миллиардов световых лет от нас. Именно такова современная граница наблюдаемой части Вселенной. За этими галактиками лежат другие, более отдаленные галактики, от которых мы не получили ни одного фотона. Итак, за границами наблюдаемой части Вселенной расстилается гораздо более обширная Вселенная, объем которой в самом деле бесконечен, если доверять современным измерениям геометрии наблюдаемой части Вселенной и нашим космологическим моделям. Можно считать, что это величайшая экстраполяция в науке: мы выполняем измерения в наблюдаемой сегодня части Вселенной, чей радиус составляет «всего» 45 миллиардов световых лет, и экстраполируем их на бесконечную Вселенную!

Глава 15
Ранняя Вселенная

Автор: Майкл Стросс

Сразу после Большого взрыва ранняя Вселенная была очень плотной и горячей, но она расширялась и остывала. Наши уравнения позволяют подробно просчитать ожидаемое состояние материи в ранней Вселенной. Это плодотворная область исследований для физиков, поскольку в данном случае требуется вычислять свойства материи при экстремально высоких значениях температуры и плотности. Более того, ядерные реакции, происходившие на том этапе, выразительно повлияли на частоту встречаемости химических элементов в современной Вселенной. Мы видим, что прогнозы встречаемости легких элементов, выстраиваемые на основе физики Большого взрыва, красиво согласуются с наблюдениями, и поэтому можно не сомневаться: мы действительно понимаем, что происходило в первые мгновения после Большого взрыва. Начнем с первой секунды. Вселенная невероятно горячая, ее температура достигает около 10^{10} К (10 миллиардов кельвинов!), а также невероятно густая по человеческим меркам – она в 450 000 раз плотнее воды. Галактик, звезд и планет пока не существует. На самом деле, при такой жаре не могут сформироваться ни атомы, ни молекулы, ни даже атомные ядра. На данном этапе Вселенная состояла в основном из электронов, позитронов, протонов, нейтронов, нейтрино и, разумеется, обильного излучения черного тела (то есть фотонов). Если, как считается сегодня, темная материя состоит из пока неоткрытых элементарных частиц, то логично ожидать, что на том этапе эти частицы в огромном количестве встречались во Вселенной.

Но через две с половиной минуты Вселенная остыла до температуры «всего» миллиард градусов. На тот момент фотонный спектр абсолютно черного тела достигал пиковых значений в области гамма-излучения. Миллион кельвинов – достаточно умеренная температура, при которой могут начаться реакции термоядерного синтеза, и при этих реакциях протоны смогут сливаться с нейтронами. Мы наблюдаем, что на Солнце в условиях высокой температуры и плотности протоны сливаются с образованием ядер гелия (см. главу 7). Уходят миллиарды лет, пока в недрах таких звезд, как Солнце, 10 % водорода превратится в гелий. В ранней Вселенной ядерные реакции протекали гораздо быстрее, поскольку

там присутствовали свободные нейтроны и протоны. Протонно-протонные столкновения требуют высоких энергий, поскольку протоны положительно заряжены и отталкиваются друг от друга; из-за этого столкновения между ними редки. Нейтроны электрически нейтральны (так что протоны их не отталкивают), поэтому нейтронно-протонные слияния происходят чаще. При слиянии протонов с нейтронами происходит термоядерный синтез, это путь к образованию гелия. Таким образом удается пропустить медленные этапы солнечного термоядерного синтеза (протонно-протонные столкновения).

Протоны и нейтроны могут превращаться друг в друга. Нейтрон может сливаться с позитроном, в результате образуется протон и электронное антинейтрино, и наоборот. При слиянии нейтрона с электронным нейтрино получается протон и электрон, и наоборот. Нейтрон может распадаться, превращаясь в протон и испуская при этом электрон и электронное антинейтрино. При 10 миллиардах кельвинов (такова была температура Вселенной, когда ее возраст составлял 1 секунду) эти процессы уравновешиваются. Нейтроны чуть тяжелее протонов, то есть на их образование уходит немного больше энергии, и поэтому через секунду после Большого взрыва нейтронов было немного меньше, чем протонов. Но к моменту, когда Вселенная остывает до миллиарда кельвинов, продолжая при этом расширяться, баланс изменяется: все больше нейтронов превращается в более легкие протоны, и на каждый нейтрон приходится семь протонов. Когда температура составляет всего миллиард кельвинов, доступно уже не так много тепловой энергии для обеспечения ($E = mc^2$) разности масс между протонами и нейтронами; следовательно, нейтроны начинают встречаться реже, чем протоны. На этом этапе Вселенная достаточно остыла, чтобы нейтрон мог столкнуться с протоном и образовать *дейтрон* (ядро тяжелого водорода, дейтерия), причем дейтрон не распадается сразу же после столкновения со следующей частицей. Затем дейтрон может участвовать в дальнейших ядерных реакциях и, добавив к своему составу еще один нейтрон и один протон, превратиться в ядро гелия (два протона и два нейтрона). Всего через несколько минут такого ядерного горения практически все нейтроны встраиваются в ядра гелия, и к этому моменту Вселенная становится достаточно прохладной и разреженной, чтобы такие ядерные реакции остановились.

Давайте посчитаем, сколько ядер гелия получится в результате. В каждом ядре гелия – два нейтрона. При соотношении «один нейтрон на семь протонов» на два нейтрона приходится 14 протонов. Два из этих протонов также включаются в ядро гелия, и остается 12 протонов. Таким

образом, на каждые 12 протонов образуется одно ядро гелия (а отдельные протоны – это, естественно, ядра водорода). Спустя эти несколько минут Вселенная настолько остывает и истончается, что ядерные реакции в ней продолжаться не могут. Значит, после Большого взрыва образовалось значительное количество ядер гелия, а также следовые количества остаточных дейтронов (ядер дейтерия), ядер лития и бериллия (которые затем распадаются в ядра лития) и никаких более тяжелых элементов.

Эти базовые вычисления впервые выполнили в 1940-е годы Георгий Гамов и его студент Ральф Альфер. Они не удержались и в качестве соавтора статьи с описанием своих результатов упомянули Ганса Бете, так что получилось знаменитое «Альфер-Бете-Гамов» («α-β-γ»). Показатель «одно ядро гелия на каждые 12 протонов» отлично согласуется с результатами экспериментов, восходящих к работе Сесилии Пейн-Гапошкиной, согласно которым звезды примерно на 90 % состоят из водорода и на 8 % из гелия[20] (см. главу 6). Следовательно, наши предположения о том, какие условия сложились во Вселенной всего через несколько минут после Большого взрыва, в целом объясняют, почему водород и гелий – два наиболее распространенных элемента и почему они встречаются именно в наблюдаемых пропорциях! Это ошеломительный успех модели Большого взрыва, убедительно обосновывающий, почему можно экстраполировать процесс расширения Вселенной вплоть до первых минут ее существования, когда температура достигала миллиарда кельвинов.

Первоначально Гамов и Альфер надеялись объяснить происхождение всех элементов на этапе Большого взрыва, но их расчеты показали, что ядерные реакции поддерживаются лишь на материале самых легких элементов. Все сравнительно тяжелые элементы (в том числе углерод, азот и кислород, из которых состоят наши тела, а также никель, железо и кремний, из которых в основном состоит Земля) появились позднее, при ядерных процессах, происходящих в недрах звезд, – эти процессы были описаны в главах 7 и 8. Фред Хойл, оппонент Гамова, надеялся продемонстрировать ровно противоположное: возможность синтеза как легких, так и тяжелых элементов в водородной звездной печи. В таком случае можно отвергнуть предположение, что на раннем этапе своей истории Вселенная была плотной и горячей, поэтому Хойл потратил значительную часть своей карьеры на поиск таких доказательств. Он во многом разработал наши современные представления о формировании тяжелых элементов в звездах. Но количество гелия, образующегося в звездах, несопоставимо с наблюдаемым изобилием гелия.

Тот факт, что сегодня во Вселенной встречается некоторое количество дейтерия, также отсылает нас к Большому взрыву. Дейтерий (в атоме которого один протон и один нейтрон) неустойчив и разрушается в ядрах звезд, превращаясь в гелий, но не образуется в звездах. Звезды не могут его синтезировать. Единственный известный нам способ изготовления дейтерия – Большой взрыв, и расчеты объемов дейтерия, возникших в первые минуты после Большого взрыва (одно ядро дейтерия примерно на 40 000 ядер водорода), отлично согласуются с наблюдаемым значением. Ядерное горение после Большого взрыва вдруг прекращается, когда Вселенная становится достаточно разреженной, и в ней остается небольшое остаточное количество дейтерия, который «не успел» превратиться в гелий. Неравновесная природа такого горения, связанная со стремительным изменением условий во Вселенной в то время, – это ключевой фактор, позволяющий понять, почему сегодня в природе есть следы дейтерия. Гамов это понял. Гамову наблюдаемое в космосе количество дейтерия казалось железной уликой, указывающей на факт Большого взрыва.

По мере расширения Вселенной растягивается само пространство и, соответственно, увеличивается и длина волны у фотонов, летящих в космосе. Это всего лишь феномен красного смещения, который мы уже обсуждали. Если космос расширяется, а мы наблюдаем далекую галактику, то видим, что долетающие от нее фотоны смещены в красную сторону спектра. Этот эффект мы можем интерпретировать как доплеровское смещение. Но мы с тем же успехом можем интерпретировать его как расширение самого пространства, как увеличение расстояния между нами и далекой галактикой и увеличение длины волны фотона, летящего от галактики до нас. Проведите волнистую линию по толстой резиновой полоске и растяните ее; в таком случае длина нарисованной вами волны увеличится. Обе интерпретации красного смещения эквивалентны: можно считать его доплеровским смещением от далекого объекта, удаляющегося от нас из-за расширения пространства, либо трактовать красное смещение как увеличение длины волны, связанное с расширением пространства. Фотоны из ранней Вселенной сохраняют свой спектр абсолютно черного тела (планковский спектр), но поскольку длина волны у них увеличивается из-за расширения пространства, температура фотонов падает. Гамов и его ученики Альфер и Герман описали Вселенную, которая началась с горячего Большого взрыва, а затем стала расширяться и постепенно остывать.

Эйнштейн, размышляя об общей природе Вселенной около 1917 года, предложил так называемый *космологический принцип*: «в больших

масштабах в один и тот же момент времени, независимо от места наблюдения, Вселенная выглядит примерно одинаково». Если отойти на достаточное расстояние и оглядеть Вселенную в достаточно крупном масштабе, то вся материя в ней должна быть распределена равномерно. Один из аспектов гипотезы Эйнштейна мы уже обсудили: расширение Вселенной выглядит одинаково из любой галактики. Из этого мы сделали вывод, что у Вселенной нет центра. Аналогично, на бесконечной плоскости нет точки, которую можно было бы назвать «центр», и на искривленной поверхности сферы также нет точки, которую можно было бы обозначить «центр», поскольку все точки на поверхности сферы эквивалентны.

Разумеется, сегодня мы рассматриваем Вселенную, и она выглядит какой угодно, но только не однородной! Масса в нашей Солнечной системе сконцентрирована в планетах и Солнце. Звезды удалены друг от друга на огромные расстояния по сравнению с их размерами. Звезды группируются в галактики, между которыми – миллионы световых лет, а сами галактики группируются в скопления. Согласно космологическому принципу Эйнштейна, следует отойти еще дальше и рассмотреть Вселенную в масштабе тысяч галактик – и в таком случае она покажется нам примерно однородной. Наблюдения Хаббла продемонстрировали, что при подсчете галактик их количество в разных направлениях одинаково; действительно, в самых крупных масштабах Вселенная выглядит однородной.

Фред Хойл развил этот принцип еще на шаг: он утверждал, что Вселенная не просто однородна в пространстве, в какую бы сторону мы ни взглянули – она однородна и во времени. Прошлое должно выглядеть точно так, как и настоящее, решил Хойл. Законы физики со временем не меняются – почему же должна меняться Вселенная? Если воспринимать это утверждение буквально, то у Вселенной не должно быть начала, никакого Большого взрыва; Вселенная существовала всегда. Хойл назвал эту идею *совершенный космологический принцип*. Учитывая, что из-за расширения Вселенной расстояние между галактиками со временем увеличивается, Хойлу пришлось предположить, что в межгалактическом пространстве создается новая материя, которая, в конечном итоге, идет на образование новых галактик, – пожалуй, это безумная идея, но он считал ее не столь невероятной, как возникновение целой Вселенной из микроскопического объема с бесконечной температурой и плотностью, сопровождающееся к тому же возникновением времени.

Какая из этих картин верна? Продолжая исследовать прогнозы, сделанные в рамках модели Большого взрыва, и сравнивая их с наблюдениями, мы получаем эмпирические подтверждения теории

Большого взрыва, и соответствие теоретических данных и наблюдений действительно очень убедительное.

Первый прогноз в модели Большого взрыва заключается в том, что Вселенная должна расширяться, – мы это и наблюдаем. Эта модель также позволяет оценить возраст Вселенной – 13,8 миллиарда лет, – что согласуется с чуть меньшим возрастом древнейших звезд, обнаруженных во Вселенной. Это бесспорный успех модели Большого взрыва: если бы мы нашли звезды возрастом в триллион лет, то вынуждены были бы признать, что модель Большого взрыва ошибочна. Действительно, в прошлом мы уже пережили подобный кризис: первая оценка постоянной Хаббла, сделанная еще самим Хабблом, составляла H_0 = 500 (км/с)/Мпк, и в таком случае время, истекшее с момента Большого взрыва ($1/H_0$), оценивалось всего в 2 миллиарда лет. К 1930-м годам по радиоизотопной датировке горных пород уже было ясно, что Земля старше. Ее возраст не согласовывался с моделью Большого взрыва: не могла же Земля быть старше самой Вселенной! Это несоответствие было аргументом в пользу модели Хойла, поскольку он считал Вселенную бесконечно старой и вечно расширяющейся, причем в межгалактическом пространстве в этой модели постоянно образовывались новые галактики. Расхождение удалось устранить в 1950-е и 1960-е годы, когда были гораздо точнее измерены расстояния до галактик. Величина постоянной Хаббла значительно уменьшилась, и число $1/H_0$ стало согласовываться с возрастом древнейших звезд.

Мы также увидели, что, согласно модели Большого взрыва, на каждое ядро гелия во Вселенной должны приходиться 12 ядер водорода, а на каждое ядро дейтерия – 40 000 ядер обычного водорода, в точности как мы и наблюдаем. Все вполне могло быть иначе; до того, как окончательно оформилась научная спектроскопия, а Сесилия Пейн-Гапошкина и другие определили, что Солнце состоит в основном из водорода, люди практически не представляли себе, какова должна быть относительная распространенность элементов во Вселенной.

Давайте инвентаризируем элементы, существовавшие через несколько минут после Большого взрыва. В принципе, все свободные нейтроны к тому моменту уже оказались в ядрах гелия. Ядерное горение прекращается, поскольку Вселенная уже слишком холодная и разреженная, и в ней не могут возникать новые реакции. Вдобавок к этим ядрам гелия и следовым количествам дейтерия и лития у нас также есть протоны, электроны, нейтрино и фотоны – раньше были еще позитроны, но они аннигилировали с электронами, образовав дополнительные фотоны. Осталось ровно столько

электронов, что они уравновешивают общий заряд всех протонов. По-прежнему очень жарко, а горячие объекты, как известно, излучают фотоны, поэтому окружающая среда также изобилует фотонами. Температура и плотность Вселенной продолжают падать, но состав Вселенной не меняется еще на протяжении около 380 000 лет.

В течение этого периода вся материя во Вселенной находится в состоянии *плазмы* (как в недрах звезд): атомные ядра и электроны не связаны, а движутся независимо друг от друга. Если протон ненадолго захватывает электрон и образуется нейтральный атом водорода, в него очень скоро попадает один из многочисленных высокоэнергетических фотонов, отрывающий электрон от протона. Более того, поскольку фотоны так активно взаимодействуют со свободными электронами (теми, которые не заключены в атомы), фотон не успевает улететь далеко, а почти сразу сталкивается с другим электроном и отскакивает от него (на научном языке говорят «*рассеивается*») в ином направлении. Я имею в виду, что Вселенная в те времена была непрозрачной; она немного напоминала густой туман, в котором почти ничего перед собой не видишь. Примерно аналогичные условия мы находим в недрах звезд: они непрозрачны, а энергия, выделяющаяся в ядре в виде фотонов, просачивается до поверхности звезды очень долго – фотон тратит на это около пары сотен тысяч лет.

Ситуация радикально изменилась, как только температура упала примерно до 3000 К, это произошло где-то через 380 000 лет после Большого взрыва. К этому моменту у фотонов уже не хватает энергии, чтобы ионизировать водород, электроны и протоны начинают объединяться в нейтральные атомы. Нейтральный водород не рассеивает фотоны с той активностью, какая характерна для отдельных свободных электронов, и Вселенная вдруг становится прозрачной: туман сгинул. Теперь фотоны могут двигаться по прямым траекториям.

Таким образом, мы, обитатели современной Вселенной, должны быть в состоянии увидеть эти фотоны, которые свободно льются на нас с тех самых пор, как Вселенная стала прозрачной, то есть спустя 380 000 лет после Большого взрыва. Если у Вселенной нет краев, то эти фотоны должны прилетать к нам со всех участков неба. То есть в какую бы точку неба мы ни взглянули, на определенном расстоянии от нас должны оказаться фотоны, излученные через 380 000 лет после Большого взрыва и долетающие до нас только сейчас.

Эти фотоны излучались газом, имевшим температуру 3000 К и, следовательно, должны обладать спектром абсолютно черного тела,

соответствующим этой температуре. Пик такого излучения абсолютно черного тела приходится на волны с длиной около 1 микрона (10–6 м). Однако в данном случае нужно учесть и еще один важный аспект этой истории: ведь Вселенная расширяется! Поэтому излучение абсолютно черного тела, соответствующее температуре 3000 К, подверглось красному смещению. Со времен 380 000-летнего возраста Вселенная, которой уже 13,8 миллиарда лет, расширилась примерно в 1000 раз. Длина волны интересующего нас излучения увеличилась во столько же раз за счет расширения пространства. Соответственно теперь это тепловое излучение достигает пиковых значений при длине волны не 1 микрон, а 1 миллиметр. Если пиковая длина волны увеличилась в 1000 раз, то температура должна была уменьшиться во столько же раз. Таким образом, теперь мы должны наблюдать, что это тепловое излучение льется на нас со всего неба и имеет температуру около 3 К. Это излучение – след тех времен, когда Вселенная просуществовала всего 380 000 лет, 0,003 % от ее нынешнего возраста.

В 1948 году Альфер и Роберт Герман, еще один ученик Гамова, спрогнозировали, что Вселенная и сегодня должна быть наполнена этим тепловым излучением, сохранившимся со времен Большого взрыва, и вычислили, что на настоящий момент его температура должна была упасть до 5 К – это значение оказалось близким к истине.

Но к 1960-м годам прогноз Германа и Альфера в основном забыли, и Боб Дикке, Джим Пиблс, Дэйв Уилкинсон и Питер Ролл с физического факультета Принстонского университета схожим путем сформулировали такой же прогноз. Они сделали еще один шаг, осознав, что излучение абсолютно черного тела, достигающее пиковых значений при длине волны 1 миллиметр, можно обнаружить при помощи радиотелескопов и таких датчиков, которые разработал Дикке. (Таким образом, они собирались искать *микроволны*, короткие радиоволны, образующиеся, например, при работе микроволновой печи.) Они приступили к сборке микроволнового телескопа на крыше одного из зданий в принстонском кампусе, чтобы проверить, удастся ли зафиксировать тепловое излучение юной Вселенной, которое просто должно было сохраниться, если идея Большого взрыва верна.

Но в итоге их обставили. Шел 1964 год, самое начало космической эры, и компания *Bell Laboratories* начинала продумывать, как использовать искусственные спутники для дальнодействующей коммуникации. Двое научных сотрудников из *Bell Laboratories*, Арно Пензиас и Роберт Вильсон, исследовали, можно ли организовать спутниковую коммуникацию в микроволновом диапазоне, и пытались охарактеризовать космическое

излучение, наблюдаемое на такой длине волн. Они пользовались большим радиотелескопом, установленным в кампусе *Bell Laboratories* в городе Холмдел, штат Нью-Джерси. Как же они удивились, обнаружив, что со всего неба льется микроволновое излучение – куда бы они ни направляли телескоп. Когда новость об этом дошла до Принстона, там поняли, что Пензиас и Вильсон открыли космический микроволновый фон – теоретически предсказанное реликтовое излучение (РИ). Две статьи – принстонская с этим прогнозом и статья Пензиаса и Вильсона с описанием открытия – были одна за другой опуликованы в майском номере *The Astrophysical Journal* за 1965 год.

Такие результаты позволили подтвердить наблюдениями еще один фундаментальный прогноз модели Большого взрыва. Когда Вселенной было 380 000 лет, РИ лилось из каждой ее точки – соответственно оно должно поступать сразу со всего неба и везде иметь одинаковую интенсивность. Действительно, это наблюдение напоминает нам, что Большой взрыв произошел сразу и везде, центра как такового у него не было, поэтому остаточное тепловое излучение Большого взрыва одинаково льется со всего неба. В 1967 году Пензиас и Вильсон опубликовали статью с описанием пределов изменчивости силы этого излучения по всему небу, предел составил несколько процентов. По мере того как совершенствовались технологии, измерения стали гораздо точнее, и ниже мы увидим, что это излучение отличается умопомрачительной однородностью: отклонения от него встречаются с частотой 1 к 10^5.

В своей первой статье от 1948 года Альфер и Герман прогнозировали, что температура спектра абсолютно черного тела у РИ должна быть около 5 К. В исходной статье Пензиаса и Вильсона указана величина 3,5 К (позже уточненная до 2,725 К). Эта цифра была поразительно близка к исходной оценке Альфера и Германа. Открытие РИ убедило астрономическое сообщество в правильности модели Большого взрыва. К примеру, модель неизменной Вселенной, которую отстаивал Фред Хойл, не может естественным образом объяснить РИ, но РИ – прямое и неизбежное следствие модели Большого взрыва. Именно так и развивается наука. Ученые постоянно проверяют идеи на прочность, чтобы убедиться в их правильности. В 1978 году Пензиас и Вильсон за свое открытие были удостоены Нобелевской премии по физике.

В 1965 году научная карьера Пиблса и Уилкинсона только начиналась. После открытия РИ они решили посвятить себя космологии, изучению Вселенной в целом. Джим Пиблс стал одним из виднейших теоретиков, работающих в этой области. Дэйв Уилкинсон еще точнее измерил РИ,

сначала при помощи наземных радиотелескопов, а затем – при помощи спутников, собиравших информацию прямо в космосе. (Должен упомянуть, что Уилкинсон – мой научный дедушка. Мой научный руководитель Марк Дэвис, под руководством которого я писал докторскую, защитил свою докторскую под руководством Дэйва Уилкинсона в 1974 году.)

Сначала Уилкинсон пытался ответить на такой вопрос: на самом ли деле РИ обладает спектром абсолютно черного тела? Он был одним из ведущих научных сотрудников, работавших над спутником NASA «Исследователь космического фонового излучения» (COBE), спроектированным для высокоточного измерения спектра РИ. Проект превосходно удался: спектр РИ, измеренный COBE, отлично совпал с формулой спектра абсолютно черного тела, с минимальными погрешностями. Этот эксперимент был назван «самым точным измерением спектра абсолютно черного тела в природе» (рис. 15.1).

Далее Уилкинсон взялся за следующий большой вопрос: насколько однородно РИ, то есть обладает ли оно одинаковой интенсивностью (или, что аналогично, одинаковой температурой) во всех направлениях? Космологический принцип, предполагающий, что в максимальных масштабах Вселенная должна быть очень однородной, влечет исключительную изотропность[21] РИ.

Рис. 15.1. Предварительные результаты измерения спектра реликтового излучения (РИ), полученные при помощи спутника COBE. Дэвид Уилкинсон продемонстрировал этот спектр на лекции, прочитанной в Принстоне в 1990 году, и зал взорвался аплодисментами. График поразительно точно совпадает с теоретической планковской кривой спектра абсолютно черного тела. (На схеме планковская кривая спектра абсолютно черного тела [непрерывная линия] отложена по линейным шкалам, а данные, демонстрирующие предел ошибки при наблюдениях, даны в виде квадратиков. Планковские спектры абсолютно черного тела, показанные в главах 4 и 5, построены в логарифмическом масштабе, поэтому выглядят немного иначе.) График из архива Ричарда Готта

Первые измерения Пензиаса и Вильсона позволяли лишь в самых общих чертах (в пределах нескольких процентов) сориентироваться,

насколько оно изотропное, но к 1970-м годам Уилкинсон и другие открыли, что температура РИ не вполне одинакова по всем направлениям, а слегка варьируется в разных точках неба, изменяясь примерно на 0,006 К. Вскоре стало очевидно, в чем причина таких вариаций. Наряду с относительным движением галактик, связанным с общим расширением Вселенной, галактики могут двигаться и независимо, поскольку между ними существует взаимное гравитационное притяжение. Кроме того, само Солнце вращается вокруг центра нашей Галактики. Все эти движения сообщают Солнцу скорость около 300 км/с относительно основной массы материи во Вселенной, от которой исходит РИ. Поэтому в РИ возникает доплеровское смещение примерно на одну тысячную (поскольку 300 км/с – это 1/1000 скорости света). РИ имеет небольшое синее смещение в направлении нашего движения и небольшое красное смещение – в противоположном направлении, а его средние значения слегка варьируются, что мы и наблюдаем.

Здесь давайте сделаем паузу и еще раз озвучим, какие разнообразные варианты движения мы одновременно претерпеваем, пусть нам и кажется, что мы спокойно сидим на месте. Земля вращается вокруг своей оси; на североамериканских широтах скорость такого вращения составляет примерно 270 м/с. Земля вращается вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Солнце вращается вокруг центра Млечного Пути со скоростью 270 км/с, а Млечный Путь и галактика Андромеды летят навстречу друг другу со скоростью около 100 км/с. Наконец, обе эти галактики вместе движутся со скоростью почти 600 км/с относительно средней скорости всей материи в наблюдаемой части Вселенной. Сложив все эти различные разнонаправленные движения, получим, что Солнце движется относительно РИ со скоростью около 300 км/с. На самом деле, просто мурашки по коже, когда представляешь все это и понимаешь, что видишь перед собой доказательство слов Галилея, уточненных при помощи теорий Эйнштейна: важны именно *относительные* движения. Без сложных астрономических измерений нам кажется, что мы просто сидим на месте.

Из-за доплеровского смещения, связанного с нашим движением на фоне РИ, и возникает небольшая неоднородность РИ – отклонение в 1 часть на 1000, которое сегодня уже удалось наблюдать с высокой точностью. Вычитаем этот эффект.

Далее Уилкинсона интересовал следующий вопрос: есть ли на фоне РИ естественная рябь, присущая самому излучению, а не связанная с нашим движением? Если мы правильно понимаем Большой взрыв, то ответ должен быть утвердительным. Действительно, ранняя Вселенная не могла

быть совершенно гладкой, без всяких неоднородностей. Совершенно однородная Вселенная расширялась бы равномерно, и в ней вообще ничего бы не образовалось: ни галактик, ни звезд, ни планет, ни людей, которые могли бы глядеть в небеса и задумываться, что все это значит. Тот факт, что мы живем во Вселенной, наполненной различными структурами, выдает отклонение от неоднородности – а значит, и ранняя Вселенная, и РИ не могли быть совершенно однородными.

Как во Вселенной оформились такие структуры? Рассмотрим регион ранней Вселенной, где плотность материи чуть выше, чем в соседних регионах. Этот регион также обладает чуть большей массой, поэтому он оказывает чуть более заметное гравитационное воздействие, чем материя вокруг него. К этому региону подтянется пролетавший мимо атом водорода или частица темной материи. Таким образом, плотность региона увеличится за счет окружающего пространства. Материя и далее будет стекаться в этот регион, его масса будет расти, и в гравитационном перетягивании материи он будет все эффективнее накапливать вещество. По мере развития этого процесса начинаются небольшие флуктуации в плотности материи, которые со временем растут, – в принципе, их достаточно, чтобы образовались все те тела, которые мы видим вокруг. Джим Пиблс в восхитительно лаконичной манере описывает такой процесс *гравитационной неустойчивости*: «Гравитация сосет!» – любит говорить он.

Учитывая степень структурированности Вселенной в настоящее время, а также физику тяготения, насколько сильны должны были быть флуктуации в ранней Вселенной (и, следовательно, наблюдаемая «рябь» РИ)? Это непростой расчет: история осложняется тем, что Вселенная расширяется, а материя в то же время продолжает скучиваться под действием гравитации. Также нужно понимать все составляющие материи, учитывать как темную материю, так и обычную, из которой состоят атомы. Выше мы упоминали, что, пока Вселенная была полностью ионизирована (в первые 380 тысяч лет после Большого взрыва), фотоны постоянно рассеивались, отскакивая от свободных электронов. Давление этих фотонов не позволяло, нарастать флуктуациям в распределении обычной материи (электронов и протонов). Если бы этим все и ограничивалось, то нарастание флуктуаций могло начаться лишь с того времени, когда Вселенная стала нейтральной, и неоднородности в РИ были бы выше, чем мы наблюдаем сегодня.

Однако в 1980-е годы Джим Пиблс понял, что темная материя помогает объяснить это несоответствие. Темная материя *темная*; она так

называется, потому что не взаимодействует с фотонами, и, следовательно, флуктуации темной материи могут возрастать под действием тяготения того вещества, которое нечувствительно к давлению фотонов. После того как Вселенная становится нейтральной, обычная материя может сгруппироваться вокруг уплотнений темной материи, которые нарастали уже некоторое время. Итак, если темная материя существует, то отправной точкой могут стать меньшие флуктуации РИ, чем если бы в природе имелась лишь обычная материя. К 1980-м годам пределы флуктуаций РИ были обозначены так строго, что все модели, не учитывавшие темную материю, оказались отбракованы.

Итак, темная материя, присутствие которой угадывается по вращению галактик, нужна и для понимания РИ. Из чего состоит темная материя? Детальное сравнение распространенности гелия и особенно дейтерия с моделями процессов, протекавших в ранней Вселенной, показывает, что средняя плотность обычной материи (состоящей из протонов, нейтронов и электронов) составляет всего 4×10^{-31} грамма на кубический сантиметр. Это соответствует одному протону на четыре кубических метра! Да, нам напомнят о поистине бескрайних (и в основном пустых) просторах между звездами в галактиках и отдельными галактиками. Но измерения движения галактик, а также флуктуаций РИ (о которых я сейчас расскажу) показывают, что общая плотность материи во Вселенной примерно вшестеро выше. Разница возникает за счет темной материи, но мы приходим к выводу, что темная материя не может состоять из обычных протонов, нейтронов и электронов. Мы полагаем, что темная материя состоит из невидимых элементарных частиц неизвестного типа, которые еще только предстоит открыть и которые, предположительно, сформировались в условиях экстремальной температуры и давления, характерных для ранней Вселенной, – вместе с протонами, нейтронами и электронами. Существует ряд версий о том, что могут представлять собой эти частицы. Теория *суперсимметрии* прогнозирует, что у каждой наблюдаемой частицы должна быть суперсимметричная частица-партнер: *фотино* у фотона, *селектрон* у электрона, *гравитино* у гравитона и так далее. Поиск таких частиц продолжается на Большом адронном коллайдере. Если хотя бы одна из них будет открыта, тем самым подтвердится теория суперсимметрии. В 1982 году Джим Пиблс предположил, что темная материя состоит из слабо взаимодействующих массивных частиц (астрономы сокращенно называют их WIMP[22]), которые значительно тяжелее протона. Возможно, самый легкий

суперсимметричный партнер известной частицы вот-вот найдется. В качестве такого кандидата Джордж Блюменталь, Хайнц Пейджелс и Джоэл Примак в 1982 году предложили *гравитино*. Эта частица должна быть самой легкой, так как, теоретически, более тяжелые частицы нестабильны; они распадаются на более легкие составляющие и надолго не сохраняются.

Согласно другой версии, темная материя может состоять из частиц, которые называются *аксионами*. На границе Франции и Швейцарии установлен Большой адронный коллайдер, где проводятся самые грандиозные эксперименты в физике частиц. Именно с ним связаны самые большие надежды по поиску и идентификации таких кандидатов. Но если большая часть массы Млечного Пути приходится на темную материю, то частицы темной материи должны повсюду нас окружать. Они должны прямо сейчас пронизывать ваше тело. Но, повторюсь, они темные, а значит, почти не взаимодействуют с обычной материей (только на уровне гравитации). Однако суперсимметричные и аксионные модели темной материи прогнозируют, что изредка частицы темной материи все-таки могут взаимодействовать с атомным ядром и вызывать реакцию, которую, возможно, удастся наблюдать. Сейчас ставятся эксперименты по постановке таких реакций. Это сложная игра: в одном таком эксперименте используется 100 кг жидкого ксенона, и ученые ждут вспышку, которая должна возникнуть, если частица темной материи отскочит от ядра ксенона. Такие эксперименты ставятся в глубоких шахтах, чтобы свести к минимуму помехи – взаимодействия с обычными частицами. Пока такие эксперименты еще не дали никаких подтверждений существования темной материи; их свойства только приближаются к тем пределам, начиная с которых должны работать модели, выстраиваемые в физике частиц. Поиск темной материи приводит нас на передний край физики частиц.

Если учесть присутствие темной материи, то в таком случае РИ должно быть изотропным, с флуктуациями не более 1: 100 000. Приборы для спутника COBE проектировались с расчетом именно на такой уровень чувствительности. Помню, как в 1992 году побывал на презентации Дэйва Уилкинсона, которую он проводил для принстонского астрономического сообщества и описывал спутниковые измерения. По его соображениям, в РИ должны были присутствовать флуктуации (согласно нашим представлением о том, как развивалась структура Вселенной в модели Большого взрыва), и они в конце концов были зарегистрированы этим спутником на уровне 1: 100 000, практически как и прогнозировали Пиблс и коллеги.

На тот момент Уилкинсон уже задумывался о спутнике нового

поколения, приборы которого позволяли бы измерять такие флуктуации (или, на научном языке, *анизотропию*) с еще более высокой точностью. Уилкинсон собрал команду, в которую вошли многие ветераны, работавшие еще над COBE, и вместе они сконструировали Зонд для изучения анизотропии[23] космического микроволнового излучения (MAP). MAP был запущен в 2001 году и картировал небо в течение 9 лет.

К сожалению, в этот период Уилкинсон заболел раком. Он успел увидеть первые результаты работы спутника незадолго до кончины в сентябре 2002 года. В феврале 2003-го группа опубликовала результаты работы за первый год. В NASA решили переименовать спутник в память Уилкинсона; с тех пор он называется Зондом для изучения анизотропии космического микроволнового излучения им. Уилкинсона (WMAP).

На рис. 15.2 показана карта температурных флуктуаций микроволнового реликтового излучения, сделанная спутником WMAP после девятилетнего сбора данных (в 2010 году). На эллиптической карте охвачена вся небесная сфера. Северный галактический полюс находится сверху, южный – снизу, а галактический экватор, совпадающий с плоскостью Млечного Пути, проходит по горизонтали прямо в середине карты. Излучение межзвездной среды в Млечном Пути, а также отклонения «один случай на тысячу», связанные с нашим движением относительно РИ, на карте не учитываются.

На самом деле, перед нами снимок новорожденной Вселенной – именно так она выглядела на заре существования. Эти фотоны летели до нас на протяжении почти всех 13,8 миллиарда лет, вернее, на 380 тысяч лет меньше. Контрастность этой карты повышена, так чтобы самые яркие красные и синие пятна соответствовали флуктуациям в несколько раз выше ±0,001 %; более типичны значения около ±0,001 % (то есть одна часть на 100 тысяч).

Рис. 15.2. Карта космического микроволнового реликтового излучения, сделанная спутником WMAP в 2010 году, после девятилетнего сбора данных. Это карта всего неба, та же проекция, которая показана на рис. 11.1 и 12.2. Здесь не учитывается микроволновое излучение самого Млечного Пути, а также доплеровское смещение, связанное с движением Земли на фоне реликтового излучения. Красным цветом обозначены точки, где температура немного выше среднего, синим – точки, где температура немного ниже, а зеленым – области со средней температурой. Снимок предоставлен: спутник WMAP, NASA

На рис. 15.3 измеренная величина этих флуктуаций показана в зависимости от углового масштаба (обратите внимание на шкалу снизу). Эти измерения выполнены спутником следующего поколения под названием «Планк», запущенным Европейским космическим агентством, а также различными наземными телескопами.

Пиковые значения достигаются при угловом масштабе 1°, это типичный размер «бугорков», заметных на изображении с WMAP. На графике, к примеру, видно, что между 18-градусными пятнами прослеживаются меньшие вариации, чем между 1-градусными. Там, где планки погрешностей не видны, погрешности при наблюдениях меньше размера красных точек.

Гладкая кривая, проходящая через точки, – это результат расчетов «на кончике пера», основанных на теории Большого взрыва, с учетом воздействия темной материи, темной энергии и инфляции (о которой мы подробнее поговорим в главе 23). При больших угловых масштабах линия

расширяется, охватывая теоретически ожидаемый разброс в спрогнозированных результатах. Соответствие между двумя графиками поразительное: эмпирические данные следуют теоретически рассчитанной кривой в пределах наблюдаемых ошибок. Модель Большого взрыва снискала и иной успех: она в подробностях прогнозирует природу исключительно тонких флуктуаций, наблюдаемых в РИ.

Рис. 15.3. Величина флуктуаций космического реликтового излучения как функция углового масштаба (точки) по сравнению с теоретическим прогнозом (кривая) от инженерной команды спутника «Планк», 2013. Величина вариаций космического реликтового излучения откладывается по вертикали как функция масштаба флуктуаций в градусах. Единицы по оси ординат – это микрокельвины в квадрате, отражающие отклонения от равномерной температуры 2,7325 K с частотой один раз на 100 тысяч. Волны на кривой обусловлены влиянием звуковых волн, рассекавших Вселенную до эпохи рекомбинации. Непрерывная линия, идущая через точки данных, – это теоретически спрогнозированная кривая, рассчитанная по модели Большого взрыва с учетом воздействия темной материи, темной энергии и инфляции (о которой мы подробнее поговорим в главе 23). Такое практически идеальное соответствие наблюдений и теории – завораживающее подтверждение правильности модели Большого взрыва. Данные, полученные со спутника NASA WMAP, позволяют сделать практически такой же вывод. Иллюстрация предоставлена ЕКА и коллаборацией «Планк»

После рекомбинации вещество начало концентрироваться в виде постоянно уплотняющихся сгустков, из которых образовались первые звезды и галактики. Но учитывая угловой размер структур, наблюдаемых в РИ, предполагается, что Вселенная должна отличаться значительной упорядоченностью и в более крупных масштабах, чем на уровне галактик, поперечник которых составляет всего лишь порядка 100 000 световых лет. То есть галактики не должны быть произвольно распределены в пространстве, они должны объединяться в более крупные структуры. Чтобы нанести на карту такие структуры, вновь обратимся к закону Хаббла. Как уже упоминалось, когда мы рассматриваем астрономические изображения, мы видим все объекты, словно они нарисованы на плоском куполе неба, абсолютно не воспринимаем перспективу и вполне можем не отличить близлежащую галактику от далекой. Но закон Хаббла позволяет нам заглянуть в третье измерение: измеряя красное смещение каждой галактики, мы можем определить расстояние до нее и проверить, как галактики распределены в пространстве.

С конца 1970-х годов астрономы всерьез принялись измерять красное смещение тысяч галактик и смогли построить трехмерную карту их расположения. В итоге было замечено, что галактики распределены в пространстве совсем не как попало: они образуют скопления (до 3 миллионов световых лет в поперечнике), в которых насчитываются тысячи галактик, а между скоплениями лежат пустынные области – войды – поперечником по 300 миллионов световых лет, где галактики практически отсутствуют. Действительно, такие первые карты заставили усомниться в космологическом принципе: на этих картах столь явственно прослеживалась структурность, что возникал вопрос: а есть ли вообще такой масштаб, при котором Вселенная выглядит однородной, или все более обширные обзоры неба будут выявлять все более крупные структуры? Проект «Слоановский цифровой обзор неба» разрабатывался, в том числе, и ради ответа на этот вопрос. Его телескоп специально предназначен для картографирования неба; сегодня он измерил красные смещения уже более чем у 2 миллионов галактик. На рис. 15.4 показана карта небольшой доли этих галактик, укладывающихся в четырехградусный сегмент, расположенный в экваториальной плоскости Земли. Если бы мы отобразили на этом графике все точки данных, то они легли бы так плотно, что вся сетка была бы покрыта сплошным слоем краски и никакой структуры не было бы видно.

Каждая из более чем 50 000 точек на этом рисунке соответствует

галактике, в которой 100 миллиардов звезд. На секунду задумайтесь об этих числах и прочувствуйте всю их колоссальность.

Мы видим два больших сегмента круговой диаграммы; галактика Млечный Путь расположена в центре изображения. Пустые области слева и справа не охвачены обзором; эти регионы не просматриваются из-за пыли, рассеянной по Млечному Пути, и в них сложно вычленить далекие галактики.

Рис. 15.4. Распределение галактик в экваториальном сегменте по данным Слоановского цифрового обзора неба. Каждая точка – это галактика. На двух лепестках отображены галактики, попавшие в область обзора; два пустых региона не охвачены обзором. Радиус схемы – примерно 2,8 миллиарда световых лет. Иллюстрация предоставлена: J. Richard Gott, M. Jurić, Astrophysical Journal 624: 463–484

Радиус этого изображения равен 860 мегапарсеков – почти 3 миллиарда световых лет. На такой картинке даже скопления галактик кажутся маленькими; большинство галактик, по-видимому, расположены вдоль волокон – это галактические нити, протянувшиеся на сотни миллионов световых лет. Одно из особенно известных волокон было названо «Великая стена Слоана», оно расположено немного выше центра карты. Длина этой стены – 1,37 миллиарда световых лет. Но мы нигде не находим таких структур, которые бы простирались на целый сегмент обзора; таким образом, на величайших масштабах космологический принцип Эйнштейна соблюдается.

Обратите внимание: у краев карты плотность расположения галактик радикально снижается. Это не означает, что космологический принцип ошибочен: все дело в том, что галактики из этих областей наиболее удалены от нас, и поэтому они самые тусклые. Лишь малая доля таких далеких галактик обладает достаточной светимостью, чтобы в Слоановском цифровом обзоре неба удалось измерить их спектры и, таким образом, учесть их красные смещения на этой карте.

Если сравнить эту карту с картой РИ, полученной спутником WMAP, то даже с учетом гравитационной неустойчивости совсем не очевидно, как флуктуации порядка «один на 100 тысяч» могли привести к образованию такой Вселенной, невероятно структурированной на уровне распределения галактик, какую мы наблюдаем сегодня. Уравнения гравитационной неустойчивости (основанные на ньютоновском законе всемирного тяготения, но учитывающие дополнительные сложности, связанные с расширением Вселенной) можно решить приблизительно и убедиться, что числа в целом верны. Но чтобы посчитать как следует и понять, какое гравитационное воздействие оказывает каждая частица материи во Вселенной на каждую другую частицу, нужен большой компьютер. В качестве исходных данных берем распределение материи с небольшими флуктуациями на том уровне, который зафиксирован на карте РИ. Затем подключаем действие гравитации плюс эффект расширения Вселенной и моделируем на компьютере, как эта структура должна была развиваться в течение 13,8 миллиарда лет. Результирующее распределение галактик, которое дают такие компьютерные модели, демонстрирует такую же структурность, которую мы видим на картах: скопления, войды и волокна – точно таких размеров и с такой же контрастностью, как и при наблюдениях.

Разумеется, мы не рассчитываем, что компьютерные модели позволят в точности воспроизвести структуры, встречающиеся в современной

Вселенной, – нет, это будут просто структуры с такими же статистическими свойствами. Как вы помните, та часть Вселенной, которую мы видим в форме РИ, очень далека от нас; мы не можем наблюдать, как из материи формируются ближайшие к нам галактики. Но мы действительно полагаем, что общие свойства (и в том числе флуктуации) материи, породившей РИ, статистически подобны свойствам материи, из которой образовались галактики, расположенные вокруг нас. В целом крупные компьютерные симуляции, основанные на модели Большого взрыва, удивительно успешно воспроизводят волокнистую паутиноподобную структуру, которую мы видим при наблюдениях.

Итак, вот он, окончательный триумф модели Большого взрыва. Мы исследовали прогнозы этой модели и сравнили их с наблюдениями всеми доступными способами. Мы логически заключили, что возраст Вселенной, 13,8 миллиарда лет, отлично согласуется с возрастом древнейших звезд (то есть Вселенная немного старше). Мы пришли к выводу, что ядра водорода и гелия сформировались в первые минуты после Большого взрыва в соотношении 12: 1, что в точности соответствует наблюдениям, а также смогли спрогнозировать количество образующегося при этом дейтерия, что также полностью согласуется с наблюдениями. Мы предсказали существование космического фонового микроволнового излучения и его различные свойства: температуру, спектр и невероятную равномерность; все это абсолютно согласуется с наблюдениями. Вероятно, наш самый впечатляющий успех – в следующем прогнозе: мы предсказали, что реликтовое излучение должно быть не совершенно изотропным, а содержать флуктуации масштаба примерно «один к ста тысячам», причем вариации излучения зависят от углового масштаба, который описывается сложной кривой. Измерения, сделанные со спутников WMAP и «Планк», также хорошо подтвердили этот прогноз. Наконец, компьютерные модели нарастания таких флуктуаций в условиях гравитационной неустойчивости демонстрируют, что в настоящее время Вселенная должна быть строго структурирована: галактики выстраиваются нитями длиной в сотни миллионов световых лет – именно такие нити мы видим на картах Слоановского цифрового обзора неба. Модель Большого взрыва уже давно не «просто теория»: она подтверждается обширной совокупностью эмпирических и количественных доказательств и блестяще проходит все испытания, при помощи которых мы пытаемся ее проверить.

Глава 16
Квазары и сверхмассивные черные дыры

Автор: Майкл Стросс

В 1950-е годы радиоастрономия (наука об электромагнитном излучении астрономических объектов на длинах более сантиметра) только зарождалась. В те годы лишь начиналось картографирование неба при помощи радиотелескопов. Было непросто определить, какие астрономические объекты являются источниками наблюдаемых радиоволн, поскольку радиотелескопы не давали достаточного разрешения, которое бы позволило точно локализовать радиоисточник в небе. То есть телескоп мог указать положение радиоисточника с точностью примерно до градуса, и было совершенно неочевидно, какая из тысяч звезд и галактик, расположенных в этом регионе неба, излучает радиоволны.

Самые лучшие радиокарты неба в то время были сделаны в Англии; радиоастрономы из Кембриджского университета, занимавшиеся этой работой, опубликовали несколько каталогов с радиоисточниками, которые нашли на этих картах. Наша история начинается с 273-й записи в третьем кембриджском каталоге, лаконично названной 3C 273. Оказалось, что путь Луны на небе случайно пересекает 3C 273, и, аккуратно зафиксировав, когда именно радиоисточник исчезает за Луной, астрономы смогли локализовать его с исключительной точностью. Затем астрономы сфотографировали эту область неба в видимом свете, чтобы посмотреть, что же за объект излучает радиоволны. К их удивлению, объект 3C 273 напоминал звезду – слишком тусклую, поэтому незаметную невооруженным глазом, но, определенно, объект был достаточно ярок, чтобы без проблем изучать его при помощи крупнейшего оптического телескопа в мире. Это был 200-дюймовый (5,08 м) телескоп Хейла Паломарской обсерватории.

Мартен Шмидт, молодой профессор из Калифорнийского технологического института в Пасадене, осознавал: чтобы выяснить, что это за звезда, нужно измерить ее спектр. Он получил этот спектр при помощи пятиметрового телескопа в 1963 году, но, изучив данные, так и не понял, что перед ним.

Он видел серию очень широких эмиссионных линий, длины которых не соответствовали никаким известным атомам. Сначала он подумал, что

это может быть какая-то крайне необычная карликовая звезда, но потом его осенило. Он понял, что перед ним – обычные эмиссионные линии водорода из серии Бальмера, образующие характерный узор, хорошо известный по изучению других звезд. Однако эти линии находились не в том волновом диапазоне, где положено, а были все как одна сдвинуты в красную область спектра на ошеломительные 16 % (рис. 16.1). Таким образом, длины волн у всех составляющих этого спектра были на 16 % больше, чем при бальмеровских переходах, наблюдаемых в лабораторных условиях на Земле.

Рис. 16.1. Спектр квазара 3C 273. В эмиссионном спектре наиболее заметны линии водорода из серии Бальмера, как показано на рисунке. В каждом случае проведена стрелка от значения длины волны в системе покоя к наблюдаемому значению длины волны. Во всех этих случаях фиксируется красное смещение на 15,8 %. Также в спектре присутствуют эмиссионные линии кислорода, гелия, железа и других элементов. Иллюстрация предоставлена: Майкл Стросс, по данным, полученным на «Нью Текнолоджи Телескоп» в Ла-Силья, Чили; M. Türler et al. 2006, Astronomy and Astrophysics 451: L1–L4, http://isdc.unige.ch/3c273/#emmi, http://casswww.ucsd.edu/archive/public/tutorial/images/3C273z.gif

Могло ли такое красное смещение быть связано с расширением Вселенной? Такое огромное красное смещение соответствует (исходя из современного значения постоянной Хаббла) расстоянию примерно в 2 миллиарда световых лет. На тот момент уже были известны некоторые галактики, обладавшие подобными большими значениями красного смещения, но они были невероятно тусклыми, рассматривать такие объекты можно было лишь на пределе возможности телескопов. Но 3С 273 был в несколько сотен раз ярче, чем такие тусклые и размытые галактики. Более того, он походил на звезду, то есть на яркую точку, и не был вытянут подобно галактике. Оставались две возможные интерпретации: (1) может быть, до этого объекта гораздо меньше 2 миллиардов световых лет – возможно, он находится даже в пределах нашей Галактики – и его красное смещение никак не связано с расширением Вселенной либо (2) этот объект обладает колоссальной светимостью. Согласно закону обратных квадратов, если объект 3С 273 действительно удален от нас на 2 миллиарда световых лет, то он может быть таким ярким, лишь если в сотни раз превосходит по светимости целую галактику с 1011 звезд!

Мартен Шмидт рассказал о своем открытии коллеге Джесси Гринстейну. Оказалось, что Гринстейн измерял спектр другого радиоисточника 3С 48; тогда Джесси сразу понял, что два этих объекта похожи, но красное смещение у 3С 48 было еще выше и составляло 0,37 (или 37 %). Шмидт рассудил, что в небе должно быть еще множество таких неизвестных объектов и самое время приняться за их поиски. Когда он и другие ученые стали открывать все новые звездоподобные радиоизлучающие объекты такого рода, с еще более значительными красными смещениями, для этих объектов потребовалось название. Сначала использовали термин «*квазизвездный радиоисточник*», но он был слишком громоздким, поэтому его вскоре сократили до слова «*квазар*». Хотя первые квазары были обнаружены по радиоизлучению, Алан Сендидж (прославившийся измерениями постоянной Хаббла) вскоре открыл аналогичные звездоподобные объекты с сильным красным смещением, которые не излучали радиоволн. На самом деле, большинство квазаров слабо излучают в радиочастотном диапазоне.

Рис. 16.2. Фриц Цвикки с каталогом галактик. Снимок предоставлен архивом Калтеха

Фриц Цвикки, о котором мы уже говорили в главе 12, работал в Калтехе вместе со Шмидтом и Гринстейном. Он был одним из самых ярких и эксцентричных деятелей астрономии XX века (рис. 16.2). Цвикки сделал ряд открытий, настолько опередивших свое время, что все остальное астрономическое сообщество «нагоняло» Цвикки десятилетиями. Как вы уже знаете, в 1933 году он первым логически вывел существование темной материи, обратив внимание на движение галактик в скоплениях. Идея о темной материи закрепилась в астрономическом сообществе только в 1970-е годы, когда Мортон Робертс, Вера Рубин и ее коллеги начали измерять вращение внешних областей галактик, а Джереми Р. Острайкер, Джим Пиблс и Амос Яхил, вооружившись аргументами об устойчивости, постепенно нашли в галактиках большие количества темной материи. Цвикки и его коллега Вальтер Бааде в 1934 году (верно!) предположили, что при взрывах сверхновых могут образовываться нейтронные звезды, – эта идея подтвердилась лишь 30 лет спустя, после открытия пульсаров. Именно Цвикки и Бааде придумали термин «*сверхновая*». Также Цвикки верно спрогнозировал (за целые десятилетия до экспериментального

подтверждения), что эйнштейновский эффект искривления света, описанный в теории относительности, позволяет уподобить далекие галактики гравитационным линзам, «увеличивающим» еще более далекие галактики, расположенные за ними. И Цвикки заявил, что именно он первым открыл квазары.

Цвикки понимал, насколько он умен, и не стеснялся высказывать собственное мнение, если считал, что другие ошибаются. Не имея доступа к пятиметровому Паломарскому телескопу, Цвикки выполнял почти всю работу на миниатюрном исследовательском телескопе Паломарской обсерватории с диаметром зеркала всего 46 сантиметров и при помощи этого телескопа открывал сверхновые (за всю жизнь он нашел более 100 таких объектов), а еще каталогизировал галактики. Он заметил, что некоторые из зафиксированных им галактик были довольно компактными, на вид почти как звезды. Но поскольку он не мог работать с пятиметровым Паломарским телескопом, Цвикки был не в состоянии измерить спектры этих галактик и определить их физическую природу. Позже оказалось, что некоторые из замеченных им компактных галактик являются квазарами того же типа, какие впоследствии открывали Шмидт и Сендидж, поэтому Цвикки небезосновательно заявлял, что именно ему принадлежит честь этого открытия.

Аспиранты из Калтеха любили Цвикки – он устроил кабинет рядом с их помещениями на цокольном этаже в здании астрономического факультета в кампусе. Цвикки скончался в 1974 году; мой коллега Джим Ганн, который в 1960-е годы учился в аспирантуре Калтеха, и Рич Готт, который был там постдоком в 1973–1974 годы, с удовольствием вспоминают его.

Принципиальная догадка Цвикки была верной. В некоторых компактных галактиках имелись непонятные точечные источники света, обладавшие невероятной светимостью (квазары). Такой источник сиял из центра галактики и затмевал ее сравнительно тусклые окружающие области. Поэтому и сама галактика становилась похожей на точку, как звезда.

Этот феномен хорошо заметен на снимках квазаров, сделанных при помощи космического телескопа «Хаббл»: на этих четких изображениях просматривается свет, идущий от квазара, а также тусклое размытое свечение самой галактики, в которой он находится. Эти снимки сделала моя жена София Кирхакос совместно с коллегами Джоном Бакалом и Доном Шнайдером, так что мне особенно приятно публиковать их в этой книге (рис. 16.3). В центре каждого изображения – очень яркий точечный

источник света; это сам квазар. Его окружает галактика (а в одном из случаев – даже пара галактик, которые, по-видимому, сталкиваются); заметны спиральные рукава. Подобные изображения снимают все вопросы относительно расстояний: квазары действительно удалены от нас настолько, насколько позволяет судить их красное смещение (это совсем не какие-то экзотические звезды в Млечном Пути), и, следовательно, квазары обладают невероятной светимостью.

Чтобы понять, что представляет собой феномен квазара, вернемся к спектру 3С 273. Эмиссионные линии у этого объекта широкие, они захватывают большие волновые диапазоны, хотя в главе 6 мы и говорили о том, что атомные переходы соответствуют конкретным, абсолютно точным энергиям и, соответственно, длинам волн. Это явление считается одним из эффектов доплеровского смещения: внутри квазара находится газ, движущийся одновременно с разными скоростями. Сам квазар удаляется от нас примерно на 16 % скорости света, но относительно этого общего движения некоторые газовые области движутся навстречу нам (голубое смещение эмиссионных линий относительно среднего значения), а некоторые – от нас (и эти области характеризуются даже большим красным смещением, чем сам квазар). Поэтому эмиссионная линия расширяется. Допустим, эмиссионная линия соответствует излучению газа, вращающегося вокруг массивного центра: газ распределен по всей круговой орбите, есть в каждой ее точке, и каждая из этих точек обладает своим компонентом движения вдоль луча зрения и, соответственно, собственным доплеровским смещением. Такая широкая эмиссионная линия соответствует целому диапазону доплеровских смещений.

Рис. 16.3. Квазары и галактики, в которых они находятся. Снимки космического телескопа «Хаббл». Снимки предоставлены: J. Bahcall и M. Disney, NASA

Можно развить эту картину. Ширина эмиссионной линии позволяет судить, как быстро движется газ; типичное значение для квазара – 6000 км/с. Что-то заставляет газ вращаться с такой чудовищной скоростью. Предположим, что эти движения обусловлены гравитацией: то есть газ движется по орбите вокруг центрального объекта, и хотелось бы понять, что это за объект.

Каков радиус этой орбиты? Если бы удалось его определить, то можно было бы воспользоваться законами Ньютона и нашими знаниями о скорости, чтобы вычислить, насколько массивен должен быть этот центральный объект. Мы уже знаем, что квазары кажутся точечными (напоминают звезды) и, следовательно, они слишком малы, что не позволяет рассмотреть их в наши телескопы. Судить об их истинном размере стало проще после следующего открытия: оказалось, что квазары *переменные*; их яркость значительно меняется за период около месяца.

Допустим, что свет от квазара поступает из области, имеющей один световой год в поперечнике. Свет, прилетающий с «лицевой» (обращенной

к нам) стороны квазара, прибудет к нам на год раньше, чем свет с его тыльной стороны. Даже если бы светимость всего этого тела каким-то образом мгновенно удвоилась, то фиксируемая нами яркость постепенно нарастала бы в течение года, пока нас достигал бы свет сначала с лицевой и, наконец, с тыльной стороны квазара. Следовательно, тот факт, что яркость квазара периодически меняется примерно за месяц, говорит о следующем: диаметр квазара вряд ли значительно превышает один световой месяц. Это поразительно небольшой размер: как вы помните, расстояния между звездами в нашем Млечном Пути составляют по несколько световых лет, а этот объект диаметром один световой месяц (или даже меньше) излучает столько энергии, сколько несколько сотен обычных галактик.

Теперь нам известно, с какой скоростью движется газ в квазаре, а также насколько этот газ удален от источника гравитации, приводящего его в движение. Можно повторить те же расчеты, которыми мы занимались в главе 12, когда определяли массу Млечного Пути по параметрам галактической орбиты Солнца: масса пропорциональна квадрату скорости, умноженному на радиус. Выполнив такие вычисления для квазара, находим, что масса его ошеломляюще велика и составляет 2 × 108 солнечных масс.

Резюмируем: квазары располагаются в центрах галактик, их диаметр составляет не более одного светового месяца, их светимость – в сотни или тысячи раз выше, чем у целых галактик, а массы – в сотни миллионов раз больше, чем у Солнца. Огромная масса в миниатюрном объеме: похоже на черную дыру? Но черные дыры потому и называются *черными*, что из них не может улететь даже свет, а квазары – одни из рекордсменов по светимости среди всех небесных тел. Кроме того, известен лишь один способ образования черной дыры: коллапс массивной звезды. Самые массивные из известных нам звезд примерно в сотню раз тяжелее Солнца; но черная дыра в 200 миллионов солнечных масс таким образом не сформируется. Что же происходит?

Да, черные дыры могут постепенно наращивать массу. Допустим, газ стекается к черной дыре. Если он поступает прямиком в дыру, то дыра попросту будет его поглощать, и он исчезнет без следа. Масса черной дыры увеличится, но больше никаких эффектов не возникнет. Однако гораздо вероятнее, что газ течет к черной дыре под некоторым углом, то есть обладает моментом импульса относительно черной дыры. Именно из-за этого момента импульса он не будет сливаться прямо в дыру, а станет вращаться вокруг черной дыры. Проводя аналогию со звездами,

вращающимися по Млечному Пути, мы предполагаем, что газ образует вокруг черной дыры сплюснутый вращающийся диск. У черной дыры сильное тяготение; тот газ, что расположен в непосредственной близости от нее, вращается с бешеной скоростью, составляющей существенную долю скорости света. Между этой ближайшей к дыре областью газа и более отдаленными газовыми областями будет возникать трение. Под действием такого трения газ может невероятно сильно разогреваться, достигая температуры в сотни миллионов градусов. А горячие объекты, как мы неоднократно убеждались, излучают энергию.

Итак, сама черная дыра невидима, а окружающий газ, который еще не успел в нее упасть, может обладать колоссальной светимостью. Квазар – это сверхмассивная черная дыра, окруженная диском из газообразной материи, которая сияет так жарко, что квазар перекрывает свечение целой галактики, в которой находится. На самом деле, именно материя, падающая в черную дыру, может спровоцировать ее рост; исходно такая черная дыра может быть небольшой и возникнуть, например, в результате гибели массивной звезды при сверхновом взрыве. Вещество, падающее в черную дыру, образует диск и сияет; это и есть квазар, постоянно увеличивающий массу черной дыры. Квазар подпитывается гравитационной энергией, превращающейся в кинетическую по мере того, как газ все глубже и глубже засасывается по спирали в гравитационный колодец черной дыры. Масса черной дыры постепенно увеличивается за счет окончательно тонущего в ней газа. Такой аккреционный процесс продолжительностью в сотни миллионов лет может порождать черные дыры в миллионы или даже в миллиарды раз тяжелее Солнца.

Невероятная энергия, заключенная в диске, примыкающем к черной дыре, провоцирует излучение высокоэнергетических частиц. Эти частицы блокируются в плоскости диска и должны извергаться из него в виде струи вещества, перпендикулярной самому диску (так называемый джет). Отчасти направление этого джета задают мощные магнитные поля. Такой узкий джет заметен как небольшая продолговатая деталь на рис. 16.4 (снимок с телескопа «Хаббл»); если сравнить изображение 3С 273 с циферблатом часов, то джет указывает примерно на цифру 5. Четкие прямые «иголочки», исходящие из квазара, – это оптические дефекты, вызванные самим телескопом.

Рис. 16.4. Квазар 3С 273 и его джет. Снимок предоставлен: космический телескоп «Хаббл», NASA

Черную дыру часто сравнивают с космическим пылесосом, который проглатывает все, что окажется поблизости. Однако вообразите, что завтра Солнце как по волшебству превратится в черную дыру (но масса этого тела останется прежней). Для нас это обернется катастрофой: мы перестанем получать от Солнца свет и тепло, и Земля замерзнет. Но орбита Земли не изменится. Момент импульса, удерживающий Землю на ее орбите, также сохранится, и Земля продолжит вращаться как на протяжении последних 4,6 миллиарда лет. Аналогично, те звезды, что вращаются по своим орбитам вокруг черной дыры, находящейся в центре Млечного Пути, в обозримом будущем в нее не упадут. Вероятно, эта черная дыра в далеком прошлом успела побывать квазаром, когда и нарастила нынешнюю массу (в 4 миллиона больше солнечной). Сегодня можно вычислить массу этой черной дыры, определив элементы орбит отдельных звезд, вращающихся вокруг нее. Однако материя больше не сливается в эту черную дыру и не образует диск; сегодня черная дыра успокоилась и не сияет, как квазар.

В близлежащих регионах Вселенной квазары – редкость. На самом деле, объект 3С 273, до которого 2 миллиарда световых лет, – один из

ближайших к нам сияющих квазаров. В юной Вселенной квазары были гораздо более распространены; большинство из них обладает огромным красным смещением, и, следовательно, они очень удалены от нас. Свет от этих далеких квазаров летел к нам миллиарды лет. Поэтому мы видим, как они выглядели, когда Вселенная была гораздо моложе. Тот факт, что количество квазаров во Вселенной со временем меняется, – прямое доказательство ее эволюции, противоречащее совершенному космологическому принципу Хойла (см. главу 15); как вы помните, Хойл отстаивал гипотезу о неизменной Вселенной.

По количеству квазаров, наблюдаемых в ранней Вселенной, можно предположить, что в настоящее время сверхмассивные черные дыры повсеместно распространены. В конце концов, черные дыры могут только расти; образовавшись, черная дыра уже никуда не девается (в главе 20 будет рассказано, что черная дыра все-таки может испариться и виной тому – квантовые эффекты, но в случае сверхмассивных черных дыр этот процесс протекает очень медленно, и в масштабах нескольких миллиардов лет, о которых мы говорим здесь, им действительно можно пренебречь). Поскольку мы сегодня не видим в близлежащих галактиках таких черных дыр, сияющих, как квазары, можно заключить, что современные черные дыры «успокоились» и газ в них не поступает. Сверхмассивная черная дыра в центре Млечного Пути, присутствие которой угадывается по движению звезд вблизи от нее, – и есть один из таких примеров.

Искать черные дыры в центрах других галактик – непростая задача. Если черная дыра не подпитывается газом, текущим из аккреционного диска, то вокруг нее не будет никакого квазароподобного излучения и, соответственно, мы ее не увидим. Тем не менее можно ориентироваться на доплеровское смещение звезд вблизи от центров галактик и по этому эффекту угадывать присутствие объекта, обладающего огромной силой тяготения. Такой метод работает преимущественно с близлежащими галактиками, центральные области которых можно рассмотреть в телескоп. В этих областях движение звезд подчинено тяготению черной дыры.

К настоящему моменту астрономы прошерстили в поисках черных дыр примерно 100 галактик. В сущности, всякий раз, когда позволяла чувствительность аппаратуры, в центре галактики обнаруживалась сверхмассивная черная дыра. Насколько можно судить, в любой крупной галактике с полноценным балджем (речь идет об эллиптических и о большинстве спиральных галактик) находится черная дыра. Наш Млечный Путь с черной дырой примерно в 4 миллиона солнечных масс относительно нетипичен; наиболее массивные черные дыры в

близлежащих галактиках в несколько *миллиардов* раз тяжелее Солнца (как, например, в галактике M87). Более того, чем крупнее эллиптическая галактика (или балдж спиральной галактики), тем массивнее будет расположенная там черная дыра. Масса черной дыры, как правило, составляет 1/500 от массы балджа окружающих ее звезд.

Поскольку квазары обладают колоссальной светимостью, они выглядят гораздо ярче галактик. Таким образом, далекий квазар намного ярче и, соответственно, заметнее, чем галактика, расположенная на том же расстоянии. Как далеко находится самый далекий квазар, который мы можем наблюдать во Вселенной? Опять же, поскольку скорость света конечна, тот свет, который мы видим, покинул квазар во времена, когда Вселенная была гораздо моложе. Когда астроном рассматривает далекие объекты, он видит их такими, какими они были в прошлом, так что телескоп подобен машине времени.

В главе 15 я рассказал о Слоановском цифровом обзоре неба – в рамках этого проекта были получены фотографии и красные смещения 2 миллионов галактик. Кроме того, он позволил узнать спектры более чем 400 000 квазаров. Эта выборка свидетельствует, что квазары были наиболее распространены в период от 2 до 3 миллиардов лет после Большого взрыва; считается, что именно в ту эпоху сверхмассивные черные дыры, обнаруживаемые сегодня в крупных галактиках, нарастили большую часть своей материи. Два миллиарда лет после Большого взрыва, то есть около 12 миллиардов лет назад, соответствуют величине красного смещения 3. Это означает, что длины волны спектральных линий в квазарах в 4 раза длиннее (то есть красное смещение + 1), чем были бы без поправки на расширение Вселенной. В данном случае красное смещение не малозаметный феномен, а серьезный эффект!

Эдвин Хаббл обнаружил линейную взаимосвязь между красным смещением галактик и расстоянием до них. Но при очень большом красном смещении это отношение немного усложняется. Оказывается, что квазар с красным смещением 3 сейчас удален от Земли примерно на 20 миллиардов световых лет. Как такое возможно, если Вселенной всего 13,8 миллиарда лет? Напоминаю, что с тех пор, как этот свет покинул квазар, Вселенная расширилась вчетверо (опять же, величина красного смещения + 1) и унесла квазар далеко. Поэтому сейчас он находится именно в 20 миллиардах световых лет от нас (такое расстояние называется *сопутствующим*).

На рис. 16.5 показан спектр самого далекого квазара, который удалось найти нам с коллегами при помощи Слоановского цифрового обзора неба.

Очень выраженная эмиссионная линия с длиной волны 9000 Å (0,9 микрон) соответствует переходу со второго энергетического уровня к основному состоянию водорода – это водородная линия Лайман-альфа. В направлении синей части спектра (то есть в сторону коротких длин волн) спектр падает до нуля; оказывается, все дело в абсорбирующем эффекте водорода, находящегося в пространстве между квазаром и нами. Спектр характеризуется эмиссией в ближнем инфракрасном спектре, а на более коротких волнах эмиссии нет, поэтому данный объект и кажется невероятно красным.

Рис. 16.5. Спектр квазара SDSS J1148+5251 с красным смещением 6,42. Этот квазар открыли Майкл Стросс, Сяохуэй Фань и их коллеги в 2001 году. Данный квазар обладал самым большим красным смещением на момент открытия, рекорд был побит лишь в 2011 году. Свет квазара, который мы видим, был излучен, когда возраст Вселенной составлял менее 900 миллионов лет. Максимальный пик (эмиссионная линия) этого квазара связан с излучением от атомов водорода (переход с $n = 2$ на $n = 1$; см. рис. 6.2), причем излучение значительно сдвинулось в красную сторону спектра: от 1216 Å в состоянии покоя до актуальных 9000 Å. Резкий спад в

спектре ниже 9000 Å связан с абсорбирующим эффектом водорода, находящегося в пространстве между нами и квазаром. Иллюстрация предоставлена: Майкл Стросс по данным из R.L. White, et al. 2003, Astrophysical Journal 126: 1 и A.J. Barth et al. 2003, Astrophysical Journal Letters 594: L95

Следовательно, задача поиска квазаров с максимальным красным смещением проста: отсматриваем снимки Слоановского цифрового обзора неба, ищем на них самые красные объекты, какие можем найти. Это не так просто, как кажется: в ходе Обзора было сфотографировано почти полмиллиарда объектов, и мы хотим убедиться, что выраженная краснота какого-либо конкретного объекта не связана с каким-нибудь редким дефектом обработки.

Есть и еще одна загвоздка. Изучая звезды, мы усвоили, что чем прохладнее звезда, тем краснее она кажется. В 1998 году, когда были получены первые снимки Слоановского цифрового обзора неба, мы с моим студентом Сяохуэем Фанем начали проект по получению спектров самых красных объектов, которые могли найти в этом массиве, – чтобы подтвердить, что это квазары, и определить их красные смещения. Мы воспользовались телескопом Апачи-Пойнт (он находится в той же обсерватории, что и телескоп Слоановского цифрового обзора неба, – в городе Санспот, штат Нью-Мексико). Этим телескопом можно удаленно управлять через интернет: не летишь через всю страну, а спокойно обедаешь дома и едешь на работу, где можешь заняться наблюдениями и управлять телескопом, до которого больше трех тысяч километров.

Когда мы принялись измерять спектры этих очень красных объектов, мы практически сразу наткнулись на нечто стоящее – но не там, где искали. Оказалось, что в россыпи квазаров с огромным красным смещением попадаются некоторые из самых холодных (и легких) звезд в природе – прямо здесь, у нас, в Млечном Пути. На самом деле, это субзвездные объекты, рассмотренные в главе 8, – их массы просто не хватает, чтобы водород в ядре начал гореть. Температура таких звезд – 1000 К или даже ниже, а когда мы только начали находить такие объекты, их спектры показались нам довольно незнакомыми. Помню, в каком аврале я просматривал в три часа ночи несколько статей с описанием таких холодных звезд, когда мы измеряли их спектры и бились над ними. Всего за одну ночь наблюдений мы определили спектры двух субзвездных объектов с минимальной светимостью, известной на тот момент (до них было всего 30 световых лет), и спектры сияющих квазаров, расположенных у самого

края наблюдаемой части Вселенной. Вот вам выразительнейший пример той проблемы, о которой я уже упоминал: рассматривая астрономическое изображение, не ощущаешь глубины. Совсем близкие (в астрономических масштабах) и очень далекие объекты одновременно кажутся очень тусклыми красными точками, и, чтобы отличить их друг от друга, требуется подробно проанализировать их спектры.

Мы продолжали поиск все более красных объектов по мере того, как совершенствовались методы устранения дефектов на изображениях. Мы неоднократно побили известный на тот момент рекорд красного смещения у квазара (когда мы только начинали работать, он составлял 4,9). Всякий раз при взятии очередного рекорда мы звонили Джиму Ганну (он трудился на проекте Слоановского обзора и сам был одним из первопроходцев в изучении квазаров). Прерывая его десятый сон (дело все-таки было в три часа ночи или около того), мы говорили: «Джим, рекорд снова побит!» – «Хорошо работаете, ребята, – отвечал он, – всегда мечтал, чтобы меня будили именно по такому поводу». И снова ложился спать.

Водородная линия Лайман-альфа, хорошо заметная в спектре нашего наиболее удаленного объекта с рис. 16.5, обычно соответствует длине волны 1216 Å. Здесь она сильно сдвинута в ближнюю инфракрасную область спектра, и длина волны достигает 9000 Å. Красное смещение (9000 Å – 1216 Å)/1216 Å составляет 6,42, таким образом, сейчас между нами и этим квазаром 28 миллиардов световых лет. Когда мы открыли его в 2001 году, этот квазар обладал максимальным красным смещением среди всех известных объектов. Вероятно, огромное расстояние до него даже не столь поразительно, как следующий факт: мы видим свет, покинувший этот объект примерно 13 миллиардов лет назад, когда Вселенной было всего 850 миллионов лет. Если реликтовое излучение – отсвет новорожденной Вселенной, то сейчас мы исследуем свет из времен Вселенной-карапуза.

Здесь мы подходим к еще одной космической тайне. Как отмечалось выше, спектр квазара позволяет оценить массу черной дыры, подпитывающей его. Типичная масса большинства далеких квазаров – около 4 миллиардов солнечных масс, примерно столько весят и крупнейшие черные дыры, известные сегодня в наблюдаемой части Вселенной. Но, как вы помните, изотропность РИ свидетельствует, что ранняя Вселенная была практически полностью однородной. Требуется объяснить, как в условиях такого почти полного отсутствия всяческих структур сверхмассивные черные дыры (максимально плотные из известных объектов) могли сформироваться всего за 850 миллионов лет. Чтобы могла появиться такая черная дыра, во Вселенной уже должны были

родиться и состариться первые звезды, они должны были взорваться как сверхновые, и на их месте должны были остаться черные дыры, сопоставимые по массе со звездами. Аккреция материи в таких черных дырах должна была происходить с колоссальной скоростью, чтобы они успели нарастить такую огромную массу. Теоретические модели свидетельствуют, что это едва возможно даже в идеальных условиях и, таким образом, подобные квазары с высоким красным смещением должны встречаться редко. Так и есть; поиски продолжаются уже более десяти лет, а мы нашли всего несколько десятков квазаров с огромными красными смещениями.

Поиск все более далеких квазаров продолжается; в 2011 году наш рекорд был побит с запасом – открыли квазар с красным смещением 7,08. Это удалось сделать при помощи телескопа, настроенного на еще более длинные волны (расположенные дальше в инфракрасной части спектра), чем в Слоановском обзоре. С тех пор как квазар излучил свет, который мы видим сегодня, Вселенная расширилась в 8,08 раза. Другие группы работают с космическим телескопом «Хаббл», телескопом «Субару» на Гавайях и с другими телескопами, позволяющими находить галактики с еще более высокими красными смещениями. Пока неясно, удастся ли объяснить эти и будущие открытия при помощи имеющихся моделей образования галактик и роста черных дыр, если рекорды красного смещения так и будут обновляться. Впереди нас ждет много интересного!

Астрономия чудесна тем, что всякий раз, когда ты посмотришь в небеса по-новому, начинаются фундаментальные и непредвиденные открытия. Хорошее подтверждение тому – Слоановский цифровой обзор неба, о сделанных с его помощью открытиях много рассказывалось в этой главе и главе 15. В настоящее время строится телескоп Large Synoptic Survey Telescope, расположенный в чилийских Андах. Его светособирающая способность будет еще выше, чем у Слоановского телескопа, и в течение десятилетнего срока эксплуатации он позволит изучать свойства тусклых галактик и квазаров, картировать распределение темной материи по данным о гравитационном линзировании и искажению форм галактик. Также этот телескоп позволит открыть сотни тысяч сверхновых и других недолговечных феноменов. Телескоп отснимет четверть всего неба: 860 полноценных кадров за 10 лет. В ходе этого обзора должны быть открыты сотни тысяч объектов в поясе Койпера, а также выявлены астероиды, приближающиеся к Земле. Но самых поразительных открытий мы, вероятно, даже себе не представляем; процитировав знаменитые слова Дональда Рамсфелда, можно сказать, что это

«неизвестные неизвестности».

Часть 3
Эйнштейн и Вселенная

Глава 17
Путь Эйнштейна к теории относительности

Автор: Дж. Ричард Готт

Фамилия Эйнштейн уже стала синонимом слова «гений». Например, кто-то может сказать: «Эй, Эйнштейн, иди сюда!» («Эй, гений, иди сюда») или «Он не Эйнштейн», то есть «Он не гений». Эйнштейн знаменит своей гениальностью. Ньютон тоже был гением. Но во всем мире и в разные эпохи жили и другие гении. Кто величайшее светило английской литературы? Шекспир! Анализируя его пьесы и стихи, многие утверждают, что у Шекспира был самый богатый в истории подтвержденный словарный запас. В его произведениях насчитывается 31 534 разных слова. Статистический анализ его творчества, выполненный Брэдли Эфроном и Рональдом Тистедом, позволяет предположить, что на самом деле Шекспир знал более 66 000 разных слов. Шекспир победил бы Ньютона в вербальном разделе SAT, а Ньютон, подозреваю, обставил бы Шекспира в математическом разделе SAT. Часто Ньютон оказывается в таких рейтингах выше Эйнштейна, поскольку не только изучал тяготение и оптику, но и сделал важный вклад в математику, изобретя дифференциальное и интегральное исчисление. Но Ньютону еще и повезло родиться в нужном месте в нужное время: в Европе, где обсуждались именно такие задачи. Исаак Барроу, кембриджский профессор, который также стал наставником Ньютона, интересовался вычислением объема бочек и других подобных емкостей – такая задача лучше всего решается именно при помощи интегрального исчисления. Естественно, на тот момент наука уже дозрела до открытия дифференциального и интегрального исчисления. Фактически философ и математик Готфрид Вильгельм Лейбниц был вторым человеком в Европе, который изобрел интегральное и дифференциальное исчисление независимо от Ньютона. Взгляните на карту – Лейбниц был современником Ньютона и жил всего в нескольких сотнях километров от него. Это не просто совпадение – такие идеи в то время обсуждались по всей Европе.

Мир конца XVII века готов был разродиться великими открытиями, ведь Кеплер уже успел количественно выразить наблюдения за положениями планет, изложенные Тихо Браге на 600 страницах, и сформулировал на их основе три простых закона движения планет, причем эти законы подчинялись математическому анализу. Как рассказывал Майкл в главе 3, Ньютон воспользовался третьим законом Кеплера для расчета

силы тяготения, $1/r^2$. Аналогичная ситуация возникла и в XX веке: экспериментальные данные о длине волны водорода в серии Бальмера вывели ученых на формулу, описывающую энергетические уровни в атоме водорода и подготовили почву для квантовой трактовки атома, предложенной Нильсом Бором и Эрвином Шрёдингером.

Журнал *Time* назвал Эйнштейна наиболее влиятельным человеком XX века. В других веках такого звания по версии *Time* удостоились Гутенберг, королева Елизавета I, Джефферсон и Эдисон. Шекспир в список не попал, поскольку в XVII веке *Time* выделил Исаака Ньютона.

В Тринити-колледже Кембриджского университета установлена очень красивая статуя Ньютона в полный рост. Уильям Вордсворт написал о ней стихи, где есть строки:

Как циферблат ума, что в одиночку
Плывет сквозь Мысли тайные моря.

На постаменте надпись: «*Newton Qui genus humanum ingenio superavit*», что переводится как «Ньютон, кто превзошел своим умом весь род человеческий». Для тех, кто подобно Нилу считает Ньютона умнейшим человеком в мире, эта фраза послужит реальным аргументом, увековеченным в мраморе. Статуя Эйнштейна гораздо выше человеческого роста установлена в Вашингтоне, столице США, неподалеку от Мемориала ветеранов войны во Вьетнаме и перед фасадом Национальной академии наук. Этот монумент изображает сидящего Эйнштейна, и все равно его высота больше 3,5 м. Дети приходят и играют у колен Эйнштейна.

Теперь давайте немного подробнее сравним Эйнштейна и Ньютона. Я не собираюсь оспаривать мнение Нила о том, что Ньютон – величайший ученый всех времен. Хочу воздать Ньютону должное. Но я собираюсь доказать, что Эйнштейн мог бы посоперничать за это звание и был человеком того же калибра, что и Ньютон.

Каково самое знаменитое уравнение Ньютона?

$$F = ma.$$

А самое знаменитое уравнение Эйнштейна?

$$E = mc^2.$$

Какая из двух этих формул более известна? Ньютоновское уравнение,

подробно рассмотренное в главе 3, означает, что чем массивнее объект, тем тяжелее он набирает скорость. Формула важна с точки зрения динамики, но довольно проста. На фортепиано сложнее играть, чем на гармошке. Уравнение Эйнштейна означает, что крохотную массу можно преобразовать в огромную энергию. Этот секрет – суть атомного взрыва. Он позволяет понять, как светит Солнце. Какое уравнение кажется вам более важным?

У Ньютона есть еще одно знаменитое уравнение, $F = GmM/r^2$, характеризующее гравитационное взаимодействие между двумя материальными точками с массами m и M. Оно довольно важное. У Эйнштейна также есть другое уравнение: $E = h\nu$, означающее, что свет состоит из порций энергии, именуемых *фотонами*, и энергия фотона равна произведению постоянной Планка h на частоту фотона ν.Следует признать: Ньютон считал, что свет состоит из частиц, однако Эйнштейн это доказал. Свет обладает как корпускулярными, так и волновыми свойствами, и такой дуализм критически важен для квантовой механики.

Оба наших героя изобретали. Ньютон сконструировал телескоп-рефлектор. Все крупные телескопы современности – рефлекторы. Космический телескоп «Хаббл» и телескопы обсерватории Кека – рефлекторы. Эйнштейн разработал принципы, на основе которых работает лазер. Всякий раз, когда вы слушаете CD или смотрите DVD, вы пользуетесь изобретением Эйнштейна. Оба наших героя отметились на государственной службе. Ньютон заведовал Королевским монетным двором. Он изобрел насечки на гурте монеты, с тех пор края у монет ребристые. С такими насечками воры уже не могли спиливать края серебряных монет и пускать эти монеты в оборот по номиналу. Если насечки спилены, это сразу видно. Всякий раз, держа в руках монетку, можно пощупать изобретение Ньютона. Ключевое вмешательство Эйнштейна в мировую политику также известно: он написал президенту Франклину Рузвельту историческое письмо, благодаря которому был запущен Манхэттенский проект и созданы атомные бомбы. Тот поступок Эйнштейна был настолько важен, что эффект его ощущается и сегодня.

Эйнштейн был настолько известной персоной, что о нем даже любили рассказывать анекдоты, которые затем вошли в «эйнштейниану». Вот одна из таких шуток (возможно, не строго историческая). Как-то раз Эйнштейн говорил с одним человеком в Принстонском институте перспективных исследований. Вдруг собеседник вытащил из кармана пальто блокнотик и что-то в нем записал. «Что это»? – спросил Эйнштейн. «А, блокнот, – ответил человек, – всегда ношу с собой, так что если на ум придет хорошая идея – записываю, чтобы не забыть». – «Я легко обхожусь без такого

блокнота, – ответил Эйнштейн, – у меня было всего три хорошие идеи». Итак, что же это были за идеи и как Эйнштейн до них додумался?

Первая – это специальная теория относительности, благодаря которой появилась формула $E = mc^2$. Вторая – это идея о фотоэлектрическом эффекте, заложенная в формуле $E = h\nu$; именно за это открытие Эйнштейн получил в 1921 году Нобелевскую премию по физике. Третья – общая теория относительности, при помощи которой Эйнштейн объяснил гравитацию как свойство искривленного пространства-времени. Проработав уравнения этой теории, Эйнштейн спрогнозировал, что свет должен искривляться, проходя в пространстве-времени поблизости от Солнца, а также рассчитал, какова должна быть такая кривизна. Звезды, расположенные вблизи от солнечного диска во время солнечного затмения, должны казаться немного смещенными в небе по сравнению со снимками тех же звезд, сделанных несколькими месяцами ранее, когда Солнце находилось совсем в другой части неба. Величина искривления, спрогнозированная Эйнштейном (1,75 секунды дуги близ *лимба*, края солнечного диска), была вдвое больше аналогичной величины, которую Ньютон, согласно собственной теории, мог бы дать для частиц, летящих со скоростью света. Сэр Артур Эддингтон возглавил экспедицию, специально снаряженную для того, чтобы измерить этот эффект. Оказалось, что прогноз Эйнштейна верен, а прогноз Ньютона ошибочен. Сегодня мы оперируем теорией Эйнштейна, а не теорией Ньютона. Давайте сделаем паузу и оценим это!

В самом конце XX века я видел по телевизору программу о величайших спортивных достижениях уходящего столетия: Джесси Оуэнс – чемпион стометровки на олимпиаде 1936 года в Берлине; жеребец Секретариат выигрывает забег «Белмонт Стэйкс», обойдя ближайшего конкурента на 31 корпус, и завоевывает «Тройную Корону»[24]; Мохаммед Али нокаутирует Джорджа Формана в Заире и возвращает себе титул чемпиона мира по боксу в тяжелом весе. А каков был величайший эпизод в истории науки XX века? Представьте себе: Ньютон и Эйнштейн соревнуются на баскетбольной площадке.

Ньютон завладел мячом. Ведет дриблинг. И это не просто мяч, а его теория тяготения – самое пафосное достижение, которое он сделал в жизни! Тут Эйнштейн догоняет его, отбирает мяч, бросок, и – *вжух*! – мяч в корзине. Это величайшая игра в науке XX века.

Хочу объяснить, как Эйнштейн нащупал свои великие идеи. Он хорошо учился в школе. Имел высокие баллы по естественным наукам.

Возможно, вы слышали истории о плохой успеваемости Эйнштейна – забудьте их. Эйнштейн познакомился с наукой в четыре года, когда отец показал ему компас. Он весьма увлекся этой игрушкой, и с нее начался путь Эйнштейна в науку. Эйнштейн самостоятельно освоил интегральное и дифференциальное исчисление, будучи примерно в двенадцатилетнем возрасте. Умный малый. А когда ему было 16, Эйнштейн стал размышлять о самой захватывающей физической теории своего времени – максвелловской теории электромагнетизма. Максвелл объединил все разнообразные законы электричества и магнетизма.

Электрические заряды могут быть или положительными, или отрицательными. Противоположные заряды притягиваются, а одинаковые отталкиваются с силой, пропорциональной $1/r^2$. Два положительных заряда отталкиваются, и два отрицательных тоже отталкиваются, а положительный и отрицательный – притягиваются. Это *закон Кулона*. Именно он – причина статического электричества. Заряды генерируют электрические поля, заполняющие пространство между ними, причем если вы – заряд, то электрическое поле придает вам ускорение. Электрическое поле сообщает вам силу, пропорциональную $1/r^2$. Именно поэтому одежда зимой накапливает статическое электричество, из-за которого к чему-нибудь прилипает. Но движение зарядов вдобавок порождает магнитное поле, а если вы – движущийся заряд, то это магнитное поле может на вас воздействовать. Если заряд не движется, то приложенная к нему магнитная сила равна нулю, но если он движется в магнитных полях, то на этот заряд будет действовать некоторая магнитная сила. Эти идеи выражены в виде еще нескольких физических законов: *закон Ампера* сообщает, как движущиеся заряды (например, ток в проводе) генерируют магнитное поле, и вы, зная значения магнитного и электрического полей в некоторой точке, можете вычислить, каковы электрические и магнитные силы, воздействующие на движущийся заряд в данной точке. *Закон Фарадея* описывает, как изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле. Причем давно известно, что «магнитных зарядов» не бывает; то есть вы нигде не найдете отдельный северный (или отдельный южный) магнитный полюс, от которого распространяется магнитное поле. По *закону сохранения заряда* общее количество зарядов (число положительных минус число отрицательных) остается постоянным. Например, если в некоторой области 10 положительных зарядов и 9 отрицательных, то общий заряд этой области равен +1. Положительные и отрицательные заряды могут притягиваться, компенсируя друг друга, например, может

остаться 9 положительных зарядов и 8 отрицательных, но общий заряд останется равным +1.

Максвелл изучил известные в его время законы электромагнетизма и заключил, что они противоречат закону сохранения заряда. Чтобы исправить это, он показал, что необходимо учесть еще один эффект: изменяющееся электрическое поле порождает магнитное поле. Все эти эффекты он выразил в виде четырех уравнений, которые называются *уравнениями Максвелла* (иногда студенты-физики даже носят футболки с этими уравнениями!).

В уравнениях Максвелла есть постоянная c, характеризующая соотношение сил электрических и магнитных зарядов. Если у нас есть сгусток зарядов, движущийся со скоростью v, то соотношение порождаемых ими электрических и магнитных сил будет пропорционально v^2/c^2, где c – некоторая скорость. Затем он принялся ставить лабораторные эксперименты, сравнивая электрические и магнитные силы и стараясь вычислить, чему равна постоянная c. У него получилось очень высокое значение: эта константа равнялась примерно 310 740 км/с. Максвелл также нашел исключительно интересное решение собственных уравнений: им удовлетворяла электромагнитная волна, распространяющаяся в вакууме со скоростью c.

Магнитные и электрические поля располагались перпендикулярно вектору скорости волны. Волна имела форму синусоиды, и электрические и магнитные поля колебались по синусоиде в некоторой точке, через которую проходила эта волна. Следовательно, изменялось и электрическое, и магнитное поле. Изменяющееся электрическое поле порождало магнитное, а изменяющееся магнитное поле порождало электрическое, и они так и тащили друг друга вдоль волны, распространяясь в вакууме со скоростью c = 310 740 км/с.

Эврика! Максвелл понял, что скорость c – это скорость света. Должно быть, свет – это электромагнитные волны! Это был один из научных триумфов. Откуда Максвелл знал скорость света? Помогли астрономы – здесь я хочу выступить от имени астрономов, – уже измерявшие скорость света! В 1676 году датский астроном Оле Рёмер заметил, что последовательные затмения Ио, спутника Юпитера, случались чаще, когда Земля приближалась к Юпитеру, и реже, когда Земля удалялась от Юпитера. Спутники Юпитера, за которыми наблюдал Рёмер, напомнили ему гигантский циферблат. Когда мы приближаемся к Юпитеру, эти часы спешат, а когда удаляемся от него, они запаздывают. Рёмер сделал верный вывод: это происходит, поскольку скорость света конечна. Когда мы

приближаемся к Юпитеру, расстояние до него уменьшается, свет, отражающийся при последовательных затмениях, достигает нас быстрее. Этот эффект напоминает доплеровское смещение от множества затмений, рассматриваемых как одно целое. Рёмер вычислил, что свет должен преодолевать радиус земной орбиты приблизительно за 11 минут. На самом деле для этого требуется примерно 8 минут, так что оценка Рёмера получилась довольно точной. Когда Земля и Юпитер максимально сближаются, «часы» Юпитера спешат примерно на 8 минут, а когда две планеты дальше всего друг от друга, эти часы запаздывают на 8 минут. В главе 8 мы уже обсуждали, как Джованни Кассини в 1672 году измерил расстояние до Марса по его параллаксу и таким образом смог определить радиус земной орбиты. Воспользовавшись данными Рёмера и примерно зная радиус земной орбиты, Христиан Гюйгенс смог вычислить скорость света: у него получилось 220 000 км/с (что всего на 27 % ниже истинного значения 299 792 км/с).

В 1728 году другой астроном, Джеймс Брэдли, измерил скорость света иным способом. Представьте себе звезду прямо над головой. Ее свет падает прямо на вас, словно дождь. Когда едешь на машине, дождь льется по стеклам под углом, поскольку вы движетесь. Земля летит по околосолнечной орбите со скоростью 30 км/с и похожа на движущуюся машину. Если направить телескоп прямо вверх, то свет будет падать на него и попадать в окуляр под наклоном, ведь мы движемся. Чтобы рассмотреть звезду, телескоп нужно наклонить, чтобы он находился под таким же углом, что и «дождь», льющийся на «машину», то есть на Землю. Насколько? Телескоп нужно наклонить примерно на 20 секунд дуги. Наблюдая ту же звезду спустя 6 месяцев, вы должны будете отклонить телескоп на 20 секунд дуги в другую сторону. Брэдли удалось измерить такой эффект, который называется «*звездная аберрация*». Степень такого уклона равна $v_{\text{ЗЕМЛ}}/v_{\text{СВЕТ}}$, Брэдли в данном случае получил результат примерно 1 часть на 10 000. Таким образом, он сделал вывод, что скорость света примерно в 10 000 раз выше скорости орбитального движения Земли (30 км/с) и, следовательно, равна 300 000 км/с. Поэтому Максвелл в 1865 году, спрогнозировав, что электромагнитные волны должны распространяться в вакууме со скоростью около 310 740 км/с, тогда же понял, что это и есть скорость света, уже измеренная астрономами (300 000 км/с). Два этих числа вполне соответствовали друг другу с поправкой на понятную погрешность его прогноза (связанную с ошибками при измерении электрических и магнитных сил), а также на ошибки при астрономических

наблюдениях. Оказалось, что свет – это электромагнитные волны. Максвелл понял, что длина разных электромагнитных волн может быть гораздо короче или длиннее, чем волн видимого света. Короткие электромагнитные волны сегодня известны под названием «ультрафиолетовые лучи», «рентгеновские лучи» или «гамма-лучи», а сравнительно длинные называются «инфракрасные лучи», «микроволны» и «радиоволны». В 1886 году Генрих Герц доказал существование электромагнитных волн, передавая радиоволны по комнате и принимая их там же. Во времена Эйнштейна теория Максвелла была самой захватывающей научной теорией, и Эйнштейн также проявлял к ней самый живой интерес.

В 1896 году, когда Эйнштейну было всего 17 лет, он вообразил следующий мысленный эксперимент. Допустим, ровно в полдень мы начали удаляться от башенных курантов со скоростью света. Если мы обернемся и посмотрим на них, то стрелки как будто застынут на отметке «полдень», поскольку свет, отразившийся от них в этот момент, будет лететь с той же скоростью, что и мы. Останавливается ли время, когда летишь со скоростью света? Эйнштейн задумался, как будет при этом выглядеть луч света, летящий рядом. В таком случае он увидел бы неподвижные волны электрических и магнитных полей, напоминающие борозды на обычном поле; они не будут двигаться относительно наблюдателя. Если лететь с той же скоростью, что и волна, то волна покажется неподвижной. Но такая *стационарная* волноподобная конфигурация электрических и магнитных полей в вакууме не допускалась максвелловскими уравнениями поля. Картина, которую мы бы увидели из иллюминатора воображаемой фотонной ракеты, казалась невозможной. Эйнштейн понял, что ситуация парадоксальна, а значит, он где-то ошибается. Ему потребовалось девять лет, чтобы догадаться, как исправить эту ошибку.

Эйнштейн действовал очень оригинально. В 1905 году он решил принять два постулата.

1. Движение относительно. Эффекты физических законов должны выглядеть одинаково для любого наблюдателя, находящегося в *равномерном движении* (это движение с постоянной скоростью в одном и том же направлении, без поворотов).

2. Скорость света в вакууме постоянна. Скорость света *c* должна получаться одинаковой, если ее измерит любой наблюдатель, находящийся в равномерном движении.

Два этих постулата лежат в основе *специальной теории*

относительности Эйнштейна. Она называется теорией *относительности*, поскольку «движение относительно» (первый постулат), и *специальной* – потому что касается только равномерного движения. Первый постулат вы испытываете на себе. Доводилось ли вам летать на пассажирском самолете со скоростью 800 км/ч (по прямой, без поворотов), когда шторки в салоне опущены и можно посмотреть какой-нибудь плохой фильм? Вам кажется, что вы сидите, как будто и не взлетали. В летящем самолете вы находитесь словно в состоянии покоя. Прямо сейчас мы летим вокруг Солнца со скоростью 30 км/с, но нам кажется, что мы никуда не движемся. Первый постулат теории относительности: важны лишь относительные движения, и абсолютный эталон неподвижности определить невозможно. Закон тяготения Ньютона соответствует этому постулату. Согласно этому закону, ускорение (изменение скорости) двух материальных точек зависит от расстояния между ними и никак не связано со скоростями самих этих частиц. Следовательно, Солнечная система была бы устроена одинаково, если бы Солнце оказалось неподвижным, вокруг него вращались бы планеты, либо если бы все это хозяйство летело как одно целое на скорости 100 000 км/с. С точки зрения Ньютона оба случая равноценны. Невозможно поставить в Солнечной системе такой гравитационный эксперимент, который бы показал, движется эта система или нет. На самом деле она движется, вращается вокруг центра Галактики со скоростью около 220 км/с. Теория Ньютона подчиняется первому постулату, и Эйнштейн считал, что уравнения Максвелла также должны ему подчиняться. Все законы физики должны подчиняться этому постулату.

Второй постулат непростой. Он означает, что если я измерю скорость пролетающего мимо меня луча света, то она должна составить 300 000 км/с. Но если кто-то другой пронесется мимо меня на скорости 100 000 км/с и измерит скорость того же луча света, она также должна составить 300 000 км/с, а не 200 000 км/с, как мы могли бы предположить. Он должен увидеть луч света, летящий со скоростью 300 000 км/с, то есть с такой же скоростью, которую измерил бы я. Это безумие!

Да, здравый смысл здесь отсутствует. Скорости должны складываться. На самом деле, парадокс обретает смысл, только если часы у второго наблюдателя идут с иной скоростью, нежели у меня, и измеренные нами расстояния также отличаются. Примечательно, что Эйнштейн просто поверил в два этих постулата, а здравый смысл отбросил за ненадобностью. В шахматной партии мы бы назвали подобный шаг «отличный ход» (обозначается!!) – подобный ход может обеспечить мат сопернику спустя 17 ходов. Эйнштейн предположил, что два его постулата верны, решил

доказать теоремы на основе мысленных экспериментов, выводимых из этих постулатов, и посмотреть, что получится. Если потом сверить эти теоремы с наблюдениями – и наблюдения их подтвердят, то, значит, и сами постулаты верны. Это было поразительно. Никто и никогда ранее не делал ничего подобного. Постулаты Эйнштейна поддавались опровержению[25]. Если бы эйнштейновские теоремы привели его к выводам, которые противоречили бы наблюдениям, то теория тем самым была бы опровергнута. Если бы теоремы согласовывались с наблюдениями, то самих постулатов мы, конечно бы, при этом не доказали, но нашли бы факты в их пользу.

Почему Эйнштейн поверил во второй постулат? Потому, что скорость света в уравнениях Максвелла являлась постоянной и была связана с соотношением магнитных и электрических сил, которые можно измерить в лаборатории. Максвелл вычислил, что волны света распространяются в вакууме со скоростью около 300 000 км/с. Если бы вы зафиксировали луч света, летящий с другой скоростью – например, 200 000 км/с, – то могли бы логически заключить, что движетесь со скоростью 100 000 км/с, вообще понять, что движетесь. Это противоречило бы первому постулату. В 1887 году Альберт Майкельсон и Эдвард Морли поставили знаменитый эксперимент, при котором пытались измерить скорость Земли, вращающейся вокруг Солнца, по отражению солнечных лучей от установленных в лаборатории зеркал. Фактически они измеряли разницу скоростей света относительно своей лаборатории для лучей, летящих параллельно и перпендикулярно вектору скорости Земли. Они добились достаточной чувствительности эксперимента для измерений на скорости 30 км/с, с которой Земля движется вокруг Солнца. Удивительно, но скорость Земли у них получилась нулевой, как если бы Земля была неподвижной, а лучи света относительно их лаборатории летели бы во всех направлениях с одинаковой скоростью. Но именно такой результат они и должны были получить в соответствии со вторым постулатом Эйнштейна. Измеренная вами скорость света всегда будет одинакова, независимо от того, движется Земля или нет. Следовательно, если вы верите во второй постулат, то могли бы спрогнозировать, что Майкельсон и Морли зафиксируют в своем эксперименте нулевую скорость.

Итак, Эйнштейн решил поверить в два своих постулата и доказывать теоремы, исходя из них. Вот один из его выводов: нельзя сконструировать ракету, развивающую сверхсветовую скорость. Почему так? Допустим, я направляю лазерный луч на стену комнаты; он достигает стены. Я могу полагать, что нахожусь в состоянии покоя. Но если сконструировать ракету,

развивающую сверхсветовую скорость, и повторить у нее на борту тот же эксперимент, то результат будет иным. Если вы находитесь в центре ракеты и направляете лазер в ее носовую часть, то свет туда никогда не долетит. Любой спортсмен вам скажет, что нельзя догнать соперника, который бегает быстрее вас и опережал вас на старте. Лазерный луч никогда не долетит до носовой части ракеты, так как носовая часть летит быстрее него (быстрее света) и стартовала раньше. Естественно, если бы вы поставили такой эксперимент в корпусе ракеты, то лазер никогда не достиг бы ее носовой части, и вы бы знали, что движетесь (на самом деле быстрее света). Но подождите – это противоречит первому постулату. Поскольку вы летите с постоянной скоростью в одном и том же направлении, вы никак не можете доказать, что движетесь. Ваш эксперимент должен дать тот же результат, что и эксперимент у меня в комнате. Следовательно, невозможно сконструировать ракету, развивающую сверхсветовую скорость. Странный результат, но с ним придется согласиться, если вы согласны с двумя постулатами. Если ракета летит медленнее скорости света, то лазерный луч рано или поздно попадет в ее носовую часть. На это может уйти немало времени, но, например, если ваши часы идут достаточно медленно, то все получится. Летать со субсветовой скоростью можно, но нельзя сконструировать ракету, развивающую сверхсветовую скорость. Этот тезис был проверен на ускорителях частиц, где протоны и электроны разгоняют все сильнее и сильнее, они развивают скорости все ближе и ближе к световой, но скорости света так и не достигают.

Вот другой результат. Вообразите себе «светочасы», устройство, в котором луч света отражается по вертикали между двумя зеркалами, одно из которых расположено, скажем, на потолке, а второе на полу. Каждое отражение – это такт часов. Скорость света равна 300 000 километров в секунду или примерно 30 см в наносекунду. Одна наносекунда – это миллиардная часть секунды. Если расположить два зеркала на расстоянии всего 90 см, то часы будут тикать с частотой раз в 3 наносекунды (рис. 17.1).

Рис. 17.1. Светочасы. Мои светочасы тикают каждые 3 наносекунды. Аналогичные светочасы взял с собой астронавт, корабль которого летит относительно меня со скоростью 80 % от световой. Свет движется с постоянной скоростью: 30 сантиметров в наносекунду. Я вижу, как лучи света от часов астронавта летят по длинным полутораметровым диагональным отрезкам и, следовательно, мне кажется, что светочасы астронавта тикают каждые 5 наносекунд. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, адаптирована из Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Это очень быстрые часы. По конструкции похожи на стоячие часы с маятником, только очень быстрые. Свет будет отражаться между двумя зеркалами туда-сюда, туда-сюда. На моих светочасах он будет попадать в зеркало каждые 3 наносекунды. А теперь представьте себе астронавта,

летящего на ракете со скоростью 80 % от световой и взявшего с собой аналогичные светочасы (рис. 17.1). Он летит медленнее скорости света, так что опыт сработает. С точки зрения астронавта, его часы тикают нормально, свет преодолевает путь от зеркала до зеркала за 3 наносекунды. Но если я загляну в иллюминатор его ракеты, то увижу, что его часы летят вместе с ракетой на скорости 80 % от световой, а луч света в них летит по диагональной траектории. Луч света летит снизу, но к тому времени, как он преодолеет 90 см, верхнее зеркало уже успеет сдвинуться вправо на 120 см. Свет летит по диагональной траектории, состоящей из отрезков по 150 см. Получается прямоугольный треугольник со сторонами 3–4–5: 90 см по вертикали, 120 см слева направо и гипотенуза длиной 150 см. Треугольник удовлетворяет теореме Пифагора: $3^2 + 4^2 = 5^2$. Тогда как относительно меня свет проходит 150 см по диагонали из левой нижней точки в правую верхнюю, с точки зрения астронавта свет преодолевает 120 см слева направо. Следовательно, астронавт движется относительно меня с 4/5, или 80 %, скорости света. Поскольку мне должно казаться (согласно второму постулату), что луч света преодолевает 30 см в наносекунду, я должен сказать, что свет успевает пройти отрезок диагональной траектории длиной 150 см, из нижней точки слева в верхнюю точку справа. Именно это я и наблюдаю. Еще через 5 наносекунд он вновь опустится по диагонали и попадет в нижнее зеркало на 240 см правее, нежели в начале предыдущего отскока. Соответственно я должен сказать, что часы астронавта тикают с частотой раз в 5 наносекунд, а не раз в 3 наносекунды. Мне кажется, что его часы идут медленнее моих со скоростью 3/5 по отношению к ним.

Теперь переходим к самому интересному. Мне должно казаться, что и сердце у астронавта бьется медленнее, чем у меня (также со скоростью 3/5 от моего), либо он сам сравнит ход светочасов со своим пульсом и заметит, что они идут медленнее, и таким образом сможет логически догадаться, что движется (а это противоречит первому постулату). Любые часы, имеющиеся у него на борту, также должны замедляться, идти со скоростью 3/5 от обычной, либо он сможет понять, что движется. Если у астронавта будет *мюон* (это нестабильная элементарная частица тяжелее электрона), который непременно распадается, то на борту ракеты он должен распадаться медленнее. Астронавт медленнее съедает обед. Еще… он… медленнее… разговаривает. Все процессы на борту ракеты идут медленнее.

Степень замедления зависит от того, с какой скоростью движется астронавт. Если я успею состариться на 10 лет, то (согласно аналогичным расчетам с использованием светочасов[26]) астронавт за это время

состарится на 10 лет умножить на $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$[27]. Если говорить о скоростях, которые слишком малы по сравнению со световой – например, скорости, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, – то такой коэффициент старения будет практически равен 1. Если отношение v/c невелико по сравнению с 1, то величина (v^2/c^2) будет совершенно крошечной по сравнению с 1; если вычесть такой мизер из 1, то останется число, практически равное 1, а квадратный корень из 1 равен 1 – таким образом, этот коэффициент существенным образом не скажется на старении астронавта. То есть астронавт состарится на те же 10 лет, что и я, и разница в возрасте у нас будет незаметна. Вот почему мы обычно не замечаем, что движущиеся часы тикают медленнее неподвижных. Но если астронавт движется на субсветовой скорости, допустим, на 99,995 % скорости света, – то $v/c = 0{,}99995$ и $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ = всего 0,01. Можете проверить на калькуляторе. То есть за 10 лет я старею на 10 лет, а астронавт – всего на 1/10 года. При субсветовых скоростях замедление времени на космическом корабле может быть весьма впечатляющим.

Мы верим в эту формулу, так как она проверена экспериментально. Физики брали атомные часы на борт самолета и летели на восток, так что скорость самолета складывалась со скоростью вращения Земли. Оказалось, что эти атомные часы действительно отстали (примерно на 59 наносекунд) по сравнению с атомными часами, оставшимися в аэропорту. Период полураспада мюона в лабораторных условиях равен 2,2 микросекунды, то есть половина мюонов распадается за 2,2 микросекунды. Но мюоны (в виде космических лучей) подлетают к Земле почти на скорости света и распадаются гораздо медленнее (в соответствии с формулой Эйнштейна). Мы верим в правильность этой формулы, поскольку она многократно проверена. Мы живем в забавной Вселенной, работающей по странным законам, но, по-видимому, именно в такой Вселенной мы и живем. Кажется, два постулата Эйнштейна верны. В следующей главе мы рассмотрим, как из двух этих постулатов следует вывод, что $E = mc^2$(эта формула подтвердилась при взрыве атомной бомбы). Такие результаты поистине замечательны. Замечательны потому, что и сами постулаты выдающиеся. Чем больше мы проверяем эти выводы, тем больше убеждаемся в справедливости постулатов.

Глава 18
Следствия специальной теории относительности

Автор: Дж. Ричард Готт

Специальная теория относительности Эйнштейна произвела революцию в научных представлениях о пространстве и времени. Эта теория подразумевала, что время можно трактовать как четвертое измерение наряду с тремя пространственными измерениями. Интересно, что учитель Эйнштейна Герман Минковский воспользовался его работами о теории относительности и на их основе разработал свою геометрическую картину пространства и времени, опубликовав результаты работы в 1907 году. Эйнштейн сразу же согласился с его точкой зрения. Мы живем в четырехмерной Вселенной. Что это означает? Принято считать, что поверхность Земли двумерная. Чтобы обозначить любую точку на поверхности Земли, нужны две координаты: широта и долгота. Если вы знаете широту и долготу, то знаете, в какой точке Земли находитесь. Но Вселенная четырехмерна, а значит, чтобы указать местоположение во Вселенной, нужны четыре координаты. Если я хочу, чтобы вы пришли на вечеринку, то должен буду вам сообщить значения широты и долготы, под которыми она состоится, но еще должен сообщить и высоту. Вам же не нужно на четвертый этаж, если вечеринка будет на двенадцатом! Кроме того, я должен сказать вам, к какому времени прийти. Если вы придете не вовремя, то пропустите вечеринку, точно как если бы зашли не на тот этаж. Любое событие, например новогодние посиделки на 54-м этаже в здании, расположенном на пересечении 5-й авеню и 34-й улицы в Нью-Йорке, описывается четырьмя координатами: широтой, долготой, высотой над поверхностью земли и временем, к которому нужно прибыть. Поскольку для этого нужны четыре координаты, нам известно, что мы живем в четырехмерной Вселенной.

Вооружившись этой идеей, можно чертить пространственно-временные схемы. Несомненно, вы видели картинку, на которой Земля обращается вокруг Солнца. Солнце – большой белый круг в центре, а орбита Земли показана как прерывистая окружность вокруг него (поскольку эллиптическая земная орбита по форме очень близка к круговой). Землю можно изобразить как маленькую голубую точку, причем если сопоставить картинку с циферблатом, то 1 января точка Земли

окажется на 12 часах. Если бы мы хотели показать, как Земля движется вокруг Солнца, то сделали бы последовательность картинок, и на них Земля двигалась бы по орбите против часовой стрелки. 1 февраля она оказалась бы на отметке 11 часов, 1 марта – на 10 часов и так далее. Вращение Земли можно изобразить в виде мультфильма: проматывая кадры, мы видим, как Земля совершает путь вокруг Солнца.

Теперь предположим, что мы взяли этот мультфильм и разрезали на отдельные кадры, а получившиеся фрагменты сложили в стопку друг на друга. Каждый кадр соответствует моменту времени, и чем выше кадр лежит в стопке, тем более поздний момент обозначает. Таким образом мы могли бы дать пространственно-временную картину вращения Земли вокруг Солнца. Ось времени пройдет по вертикали: прошлое будет находиться снизу, а будущее – сверху. Две горизонтальные линии соответствуют двум пространственным измерениям (изображаемым на двумерной модели орбитального вращения Земли вокруг Солнца). Солнце не движется, оно всегда в центре, и, следовательно, все солнечные круги складываются в «полосу», пронизывающую стопку кадров по вертикали. Но Земля в каждом кадре переходит на новое место, продолжая движение по околосолнечной орбите против часовой стрелки. Поэтому орбита Земли напоминает голубую спираль, вьющуюся вокруг центральной белой точки (Солнца). Радиус голубой спирали равен 8 световым минутам – это радиус земной орбиты. Спираль ежегодно оборачивается вокруг Солнца по вертикали. Голубая спираль, вьющаяся вокруг вертикальной белой колонки, – это пространственно-временная схема. На эту схему можно добавить орбиты Меркурия, Венеры и Марса, которые будут выглядеть как новые спирали, также вьющиеся вокруг белой колонки (Солнца). Это трехмерная схема, но я убираю одно из пространственных измерений, чтобы ее можно было визуализировать. В четырехмерном виде эту схему никак нельзя было бы визуализировать – в любом случае получилось бы не более трех измерений. В этой книге мы изобразили схему в трех измерениях, воспользовавшись стереопарой картинок (рис. 18.1). Можете полюбоваться этой иллюстрацией либо как парой фотографий, либо как трехмерной моделью, где обе картинки показаны в немного разных ракурсах. Чтобы увидеть эту картинку объемной, во всем ее великолепии, вернитесь к врезке рядом с рис. 4.2 и посмотрите на рис. 18.1, как там описано.

Рис. 18.1. Пространственно-временная схема внутренней части Солнечной системы. Время откладывается по вертикали, а два пространственных измерения – по горизонтали. Это объемное изображение, две картинки можно рассматривать как стереопару. О том, как правильно смотреть такие картинки, рассказано в пояснении к рис. 4.2. Мировая линия Солнца – это вертикальная белая полоса, идущая посередине. Земля вращается вокруг Солнца против часовой стрелки, поэтому ее мировая линия сначала проходит перед линией Солнца, а потом – за ней (выше на этой схеме). Чем дальше планета (Меркурий, Венера, Земля, Марс) от Солнца, тем больше ее сидерический период и, следовательно, тем менее плотную спираль она описывает. Иллюстрация предоставлена Robert J. Vanderbei и J. Richard Gott

Белая вертикальная полоса называется *мировой линией* Солнца – это путь Солнца в пространстве и времени. Она белая, поскольку само Солнце белое, а не желтое, – об этом мы говорили в главе 4. Голубая спираль – это мировая линия Земли, ее путь в пространстве и во времени. Обратите внимание, как голубая спираль проходит то перед вертикальной линией Солнца, то за ней. Оранжевая спираль, плотно обвивающая вокруг Солнца, – это мировая линия Меркурия. Он совершает оборот вокруг Солнца за 88 дней. Серая спираль соответствует Венере, а красная – Марсу. Если представить Землю в четырех измерениях, то она будет похожа не на шар, а на длинную макаронину, закрученную вокруг Солнца в виде спирали. Земля обладает протяженностью во времени.

У вас тоже есть мировая линия. Она начинается при рождении, проходит через все события вашей жизни и заканчивается со смертью. Толщина вашей мировой линии – сантиметров тридцать, ширина – сантиметров шестьдесят, высота – примерно метр восемьдесят, а продлится она лет восемьдесят, если вам повезет. В пространственно-временных схемах неподвижные мировые линии сплетаются, образуя четырехмерное изваяние.

Можно начертить пространственно-временные диаграммы отдельных мысленных экспериментов, при помощи которых Эйнштейн пытался проиллюстрировать феномен одновременности. Допустим, я сижу у себя в лаборатории, ее ширина – 9 метров. Я землянин. Моя лаборатория неподвижна относительно Земли, а я неподвижно сижу в центре лаборатории. В пространственно-временной схеме координата по оси абсцисс соответствует пространству, а координата по оси ординат – времени. Поскольку я двигаюсь вперед во времени, но не в пространстве (то есть не перемещаюсь ни влево, ни вправо), моя мировая линия растет вверх. Моя лаборатория, ее передняя и задняя стена, также никуда не движется, и мировая линия лаборатории тоже растет вверх. Задняя стена лаборатории, землянин (я) и передняя стена лаборатории образуют три параллельные мировые линии. Будущее вверху, прошлое – внизу. Мировая линия передней стены лаборатории показана по вертикали справа, а мировая линия задней стены лаборатории – по вертикали слева. Шкала по горизонтали откладывается в футах, а по вертикали – в наносекундах. Свет в вакууме преодолевает один фут за наносекунду. На схеме с рис. 18.2 лучи света – это диагональные линии, отклоненные от вертикали на 45°.

Рис. 18.2. Пространственно-временная схема с мировыми линиями моей лаборатории и ракеты, в которой летит астронавт. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, по образцу из его книги Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Допустим, в момент $t = 0$ (земное время ET; на моем рисунке обозначено часиками, стрелка которых указывает вверх) я посылаю два лазерных луча, один вправо, другой влево, и они отражаются соответственно от передней и задней стены моей лаборатории. Мировые линии двух этих лучей света – диагонали, отклоненные от вертикали на 45°. Они одновременно достигают один передней стены лаборатории, другой – задней (оба проходят одинаковое расстояние по 4,5 м), каждый за 15 нс по земному времени. На рисунке показаны двое часиков с циферблатами по 60 нс, стрелка у обоих часов стоит на отметке 15 нс; часы расположены в тех точках, где лазерные лучи попадают соответственно в переднюю и заднюю стенку лаборатории. Мировая линия землянина (моя) также снабжена часиками, стрелка которых стоит на отметке 15 нс (земное время). Трое этих часов, каждые из которых показывают 15 нс, соединены

прерывистыми линиями. С моей точки зрения, эта линия соединяет одновременные события. После того как лазерные лучи отразятся от зеркал, подвешенных на передней и задней стене лаборатории, эти лучи вернутся ко мне. Оба вернутся одновременно, спустя 30 нс после старта. Когда лазерные лучи вернутся ко мне, на моих часах будет значиться 30 нс, поскольку эти лучи, летящие со скоростью света, проделали путь 4,5 м туда и 4,5 м обратно, всего по 9 м за 30 нс. Пока все понятно.

Но затем, следуя логике Эйнштейна, рассмотрим, что будет происходить с астронавтом, летящим в ракете со скоростью, равной 80 % скорости света (слева направо). В таком случае мировая линия астронавта должна располагаться под наклоном. Каждые 120 см, которые он проходит вправо, соответствуют 5 нс вверх по оси времени. Он летит с 4/5 (или 80 %) скорости света. И нос, и хвост его ракеты движутся с одинаковой скоростью, и уклон их мировых линий одинаков. Мировая линия носа ракеты, мировая линия астронавта и мировая линия хвоста ракеты параллельны. Они не движутся друг относительно друга. Теперь астронавт сидит в центральной части ракеты и светит лазером в ее переднюю и заднюю часть, точно как я делал в лаборатории. Я измеряю длину его ракеты, получается 540 см. Подробнее я расскажу об этом ниже. Лазерный луч, летящий влево, попадает в корпус ракеты примерно через 270 см (это половина от 540 см). Я наблюдаю за этим экспериментом через иллюминатор ракеты. Вижу, что хвост ракеты за 5 нс смещается вправо на 120 см, а лазерный луч за те же 5 нс успевает пролететь 150 см влево. Итак, 120 см плюс 150 см равно 270 см, так что лазер астронавта попадает в хвост ракеты через 5 нс, покрывая это исходное расстояние (270 см). По моим (земным) часам лазерный луч долетает до хвоста ракеты за 5 нс. Лазерный луч летит влево, а ракета летит вправо, поэтому (с моей точки зрения) лазерный луч и хвост ракеты движутся навстречу друг другу. Тогда как на Земле лазерный луч преодолевает 1350 см за 45 нс (второй постулат Эйнштейна: свет летит со скоростью 30 см/нс), нос ракеты за то же время преодолевает всего 1080 см (4/5 от 1350 см). За 45 нс лазерный луч преодолевает 1350 см, а ракета – всего 1080 см, то есть на 270 см меньше, но у носа ракеты уже есть «фора» в 270 см. Соответственно по «земному» времени лазерный луч попадет в нос ракеты с запаздыванием в 45 нс. Это означает, что, с моей точки зрения, лазерный луч, летящий в хвост ракеты, достигнет цели *раньше*, чем другой лазерный луч, направленный в нос ракеты. Для меня попадание лазерных лучей в нос и в хвост ракеты – это не одновременные события.

Что же видит астронавт? Он движется с постоянной скоростью в

одном и том же направлении; по первому постулату Эйнштейна, астронавт должен полагать, что находится в состоянии покоя. Он сидит в центральной части ракеты, которая относительно него также не движется, и светит лазером в носовую и в хвостовую часть ракеты. Поскольку он сидит в центре ракеты и ракета относительно него не движется, он полагает, что два лазерных луча, летящих со скоростью света, должны за равное время попасть соответственно в нос и в хвост ракеты. С его точки зрения, он должен увидеть два одновременных события: попадание лазерного луча в нос ракеты и попадание другого лазерного луча в хвост ракеты. Я (землянин) не считаю два этих события одновременными: сначала я вижу, как лазер попадает в хвост ракеты, а затем – как другой лазерный луч попадает в нос ракеты. Мы с астронавтом не сойдемся во мнении о том, какие события одновременны, а какие – нет. Это противоречит здравому смыслу, но непосредственно следует из постулатов специальной теории относительности.

Интересно, что когда сам Эйнштейн сформулировал этот мысленный эксперимент, он говорил не об астронавте на ракете, в носовой и хвостовой части которой установлены два зеркала, а о пассажире поезда, причем два зеркала были установлены в голове и хвосте поезда. В 1905 году самым быстрым транспортным средством был поезд – он развивал скорость под 200 км/ч!

Для нас с астронавтом пространство-время сегментируется по-разному. Представьте себе, что пространство-время похоже на четырехмерную буханку хлеба. В Америке буханка похожа на кирпичик, так что ее можно поставить на один конец и нарезать горизонтальными ломтиками. Каждый из этих ломтиков будет соответствовать одному мгновению земного времени (ЕТ), и в каждом ломтике содержатся события, которые с моей точки зрения происходят одновременно. Астронавт нарезает пространство-время иначе. Он (назовем его Жак) нарезает хлеб, как это принято во Франции – под углом. Его скошенные ломтики соответствуют моментам *«астронавтского» времени* (АТ). Мы с Жаком не сможем сойтись во мнении о том, какие события одновременны, то есть какие события лежат в одном и том же ломтике. Мы с ним нарезаем буханку по-разному, но видим одну и ту же буханку. По Эйнштейну, реальны те феномены, которые не зависят от наблюдателя. Пространство и время не существуют в отдельности друг от друга. Я считаю, что настоящее – это ломтик обычной буханки-кирпичика, а для Жака настоящее – это ломтик скошенной набок французской буханки. Поскольку Жак движется относительно меня, мы не сможем прийти к общему мнению о том, что

есть настоящее. Соответственно мы по-разному будем относить события к прошлому и к будущему. Но у нас не возникнет споров относительно пространственно-временной буханки. Это четырехмерное пространство-время, и оно реально.

Теперь вернемся к тому, какой мне представляется ракета Жака. После того как лазерный луч Жака отразится от зеркала в носовой части ракеты, он вернется к Жаку всего через 5 нс (с моей точки зрения). Я вижу, как лазерный луч и астронавт приближаются друг к другу. Всего за 5 нс отраженный лазерный луч успевает пролететь 150 см, а ракета за то же время пролетает 120 см, таким образом, за 5 нс астронавт и лазерный луч сближаются на 270 см. С моей точки зрения, лазерный луч, отправленный в носовую часть ракеты, за 50 нс успевает слетать туда и обратно (45 нс + 5 нс). Лазерный луч, отправленный в заднее зеркало, догоняет астронавта за 45 нс. По земному времени (ЕТ) ему на это нужно 5 + 45 нс. Соответственно с моей точки зрения оба лазерных луча возвращаются к астронавту одновременно. Астронавту также должно казаться, что отраженные лучи возвращаются к нему одновременно, так как они возвращаются в неизменных пространственно-временных координатах.

У меня на часах между пуском и возвращением двух лазерных лучей проходит 50 нс. Я вижу, как лазерные лучи движутся на скорости 80 % от скорости света (v/c = 0,8), поэтому мне должно казаться, что часы астронавта идут с 60-процентной скоростью (или $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$) по сравнению с моими часами. За то время, пока на моих часах пройдет 50 нс, астронавт должен состариться всего на 30 нс. Когда астронавт фиксирует возврат лазерных лучей, он должен сказать, что они вернулись за 30 нс «астронавтского» времени (АТ), поскольку к моменту их прибытия он состарится на 30 нс. Лазерные лучи должны были одновременно достичь носа и хвоста ракеты через 15 нс АТ после пуска. Обратите внимание на ломоть французской буханки, на котором написано «15 нс АТ». С точки зрения астронавта, в этом ломте находятся одновременные события. Астронавту кажется, что он находится в состоянии покоя, и вся ситуация выглядит для него точно так же, как выглядела бы для меня в лаборатории на Земле. Поскольку по его времени лазерные лучи успевают обернуться за 30 нс, он должен логически заключить, что длина ракеты – 9 м.

Два события – попадание лазерных лучей в хвостовую и носовую часть ракеты – кажутся мне отдельными актами, разделенными в пространстве на 15 м и во времени на 45 нс. Если воспользоваться скоростью света (30 см/нс) для сравнения расстояний в пространстве и расстояний во времени, то можно сказать, что для меня эти события будут

разделены в пространстве сильнее, чем во времени. Такой феномен называется «*пространственноподобным интервалом*». Обязательно найдется астронавт, летящий с огромной скоростью (которая, однако, ниже световой), кому два этих события покажутся одновременными. Ему покажется, что эти события разделены в пространстве, но происходят одновременно. Эйнштейн продемонстрировал, что два наблюдателя могут прийти к общему мнению лишь о том, чему равен квадрат интервала между двумя событиями в пространстве минус квадрат интервала между этими же событиями во времени; обозначим эту величину ds^2. Выбрав систему отсчета, в которой скорость света равна единице (то есть 30 см = 1 нс), я нахожу, что два события должны быть разделены в пространстве на 50 единиц и во времени на 40 единиц. В таком случае я могу вычислить $ds2 = 50^2–40^2 = 2500–1600 = 900$. Но астронавт Жак считает, что два этих события произошли одновременно и они разделены в пространстве на 30 единиц (как вы помните, он считает, что длина его ракеты 9 м). Но когда он вычисляет ds^2, у него получается $30^2 – 0^2$, или 900, точно как у меня. Мы можем не сойтись в вопросах о времени и расстоянии, но, как ни удивительно, некоторые важные феномены остаются для нас тождественными.

Теперь рассмотрим интервал между тем моментом, когда астронавт отправляет световой сигнал, и моментом прибытия этого сигнала в хвост ракеты. Измеряемая мною в пространстве дистанция между двумя этими событиями составит 150 см, а временной интервал между двумя этими событиями – 5 нс. Итак, можно вычислить, что ds^2 равен (интервал в пространстве)^2 – (интервал во времени)^2 равен $5^2–5^2 = 0$. По измерениям астронавта, точки двух событий отстоят друг от друга на 150 см и между этими событиями проходит 5 нс. Таким образом, у него получается $15^2–15^2 = 0$, точно как и у меня. События, соединенные лучом света (в таком случае говорят о *нулевом интервале*), всегда имеют $ds^2 = 0$ с точки зрения любого наблюдателя. Согласно второму постулату Эйнштейна, все наблюдатели должны видеть луч света, летящий в этой системе координат с постоянной скоростью 1 (30 см/нс); следовательно, интервал в пространстве должен быть равен интервалу во времени и ds^2 должно быть равно нулю. На самом деле, знак «минус» в формуле ds^2 нужен для того, чтобы гарантировать, что второй постулат всегда выполняется.

По теореме Пифагора, если в плоскости с системой декартовых координат (x, y) две точки разделены отрезками dx и dy, то их (интервал в пространстве)$^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$. Это евклидова стереометрия, изучаемая в

старших классах. Но Эйнштейн утверждает, что ds^2 = (интервал в пространстве)2 – (интервал во времени)^2. Эту формулу можно переписать в виде $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$– (интервал во времени)2. Но интервал во времени равен просто dt. Итак, подставив это значение, имеем $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 – dt^2$. Так что есть разница между временным измерением t и любым из пространственных измерений (x, или y, или z): перед dt^2 стоит знак «минус». В этом минусике и есть вся разница. Именно он отличает время от известных нам обычных пространственных измерений.

Уф! Мы изрядно позанимались арифметикой, но подходим к важному моменту: разнице между временем и пространственными измерениями.

Как вы помните, в самом начале я измерил длину ракеты астронавта, и у меня получилось 540 см. Таким образом, ракета короче, чем кажется астронавту (он считает, что ее длина 9 м). Таким образом, мне его ракета кажется в $\sqrt{1 – (v^2/c^2)}$ раз короче, чем ему. Наши часы рассогласованы, наши рулетки рассогласованы – что, опять же, подтверждает, что наблюдаемая скорость света всегда равна 30 см/нс. Как могут разниться наши данные о ширине мировой линии его ракеты? Дело в том, что «ломтики» пространства-времени, приходящиеся на эту мировую линию, у нас отличаются. Я измеряю ширину мировой линии в конкретный момент земного времени (ЕТ), а он – в конкретный момент ракетного времени (АТ). Я режу его мировую линию горизонтальными ломтиками, как обычную американскую буханку, а он режет ее под углом, как французский хлеб. Другая метафора: допустим, я распилил ствол дерева по горизонтали и говорю: «Ширина ствола – 15 см». Если бы кто-то распилил этот же ствол наискосок, то у него мог бы получиться спил шириной 25 см, хотя ствол был бы тот же самый. Мы с астронавтом просто по-разному режем мировую линию ракеты.

Почему это важно? Рассмотрим крайний случай, когда астронавт летит мимо меня (я на Земле) со скоростью 99,995 % от скорости света; в такой ситуации волшебный коэффициент $\sqrt{1 – (v^2/c^2)}$ равен 1/100. Я вижу, что астронавт направляется к звезде Бетельгейзе, до которой 500 световых лет. На мой взгляд, он прибудет туда примерно через 500 лет: ведь он летит практически со скоростью света, а до Бетельгейзе 500 световых лет, так что пока он туда доберется, на Земле пройдет 500 лет (ЕТ). Но я увижу, что он состарился всего на 1/100 × 500 лет – на 5 лет. Мне кажется, что его часы идут очень медленно, именно потому, что он летит так быстро. Все его действия кажутся мне медленными – пока он позавтракает, у меня на часах пройдет пятеро суток! Достигнув Бетельгейзе, он действительно

состарится всего на 5 лет.

Как он сам воспринимает этот путь? Ему кажется, что он находится в покое, Земля удаляется от него со скоростью 99,995 % от скорости света, а Бетельгейзе – приближается с такой же скоростью. Сначала он видит, как мимо пролетает Земля – вжух! – потом, 5 лет спустя, как мимо пролетает Бетельгейзе – вжух! В принципе, Земля и Бетельгейзе находятся в состоянии покоя друг относительно друга, их мировые линии параллельны. Система Земля + Бетельгейзе для астронавта подобна огромной ракете, на носу которой расположена Земля, а в хвосте – Бетельгейзе. Поскольку эта ракета пролетает мимо него практически со скоростью света, то есть расстояние от Земли до Бетельгейзе преодолевается за 5 лет, астронавт приходит к выводу, что длина ракеты Земля – Бетельгейзе равна 5 световых лет. Именно таким, на его взгляд, должно быть и расстояние от Земли до Бетельгейзе. Расстояние от Земли до Бетельгейзе кажется ему в 100 раз меньше, чем мне. Мои «длины» кажутся ему сжатыми: все предметы кажутся ему в 100 раз короче, чем мне. Коэффициент укорачивания, который он фиксирует, равен $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, и именно с таким коэффициентом я наблюдаю замедление его старения. Несомненно, это один из самых впечатляющих результатов специальной теории относительности, прекрасной в своей симметрии и железной логике.

Тот факт, что различные наблюдатели по-разному трактуют одновременность, объясняет «парадокс шеста и сарая». Вообразим, что вышеупомянутый Жак, который путешествовал со скоростью 80 % от скорости света, теперь не астронавт, а прыгун с шестом. Он бежит с девятиметровым шестом, направленным по ходу движения. Когда он будет пробегать мимо меня, мне покажется, что длина этого шеста – всего 540 см. Допустим, у нас есть девятиметровый сарай. Передняя дверь сарая открыта, задняя – закрыта. Жак вбегает в открытую переднюю дверь; когда он добежит до центра сарая, я могу закрыть дверь, и его 540-сантиметровый шест будет заперт в моем девятиметровом сарае. Затем я открываю заднюю дверь и выпускаю Жака. Но как все это выглядит для Жака? Ему должно казаться, что он – в состоянии покоя, держит девятиметровый шест. Он видит, как мой сарай налетает на него со скоростью 80 % от скорости света. По мнению Жака, длина сарая должна составлять 540 см. Находясь в центре сарая, он видит, как его девятиметровый шест высовывается из сарая и через переднюю, и через заднюю дверь. Невозможно закрыть сразу обе двери и запереть его в сарае. Ситуация кажется парадоксальной. Но ответ таков: я одновременно закрываю обе двери, спереди и сзади от шеста, одновременно – с моей

точки зрения. Но для Жака два этих события не одновременны. Он иначе «нарезает» пространство-время, под углом, и ему кажется, что я закрываю двери сарая в разные моменты времени, сначала одну, потом другую. Жак не может увидеть, как две амбарные двери закрываются одновременно, но может увидеть, как его шест высовывается одновременно из первой и из второй двери сарая, пока он пробегает сарай с двумя открытыми дверьми.

Слава Эйнштейну, который смог детально проработать все эти мысленные эксперименты. Никто и никогда не пытался описывать эксперименты, исходя из постулатов, как это сделал Эйнштейн. Это была одна из наиболее оригинальных черт его работы.

Переходим к другому явному парадоксу, так называемому *парадоксу близнецов*. Первая близняшка, участница этого парадокса (назовем ее Гея) остается на Земле, а вторая близняшка, Астра, отправляется к звезде альфа Центавра, до которой 4 световых года. Астра летит со скоростью 80 % от скорости света, а затем возвращается также со скоростью 80 % от скорости света. Гея видит, как Астра летит со скоростью 4/5 от скорости света, поэтому ей кажется, что Астра за 5 лет долетает до альфы Центавра и за 5 лет возвращается обратно. К моменту возвращения Астры Гея повзрослеет на 10 лет. Поскольку Гея видит, как Астра летит со скоростью 80 % от скорости света, по нашей формуле $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ Астра должна взрослеть медленно, в темпе 60 % от взросления Геи. Гея считает, что по возвращении Астра повзрослеет всего на 6 лет. Пока все понятно. Но что видит Астра? Поскольку движение относительно, почему Астра не считает, что Гея улетела от нее со скоростью 80 % от скорости света, и почему не предполагает, что по возвращении Астры на Землю Гея должна быть младше, чем на практике? Дело в том, что Астра во время пути ускорялась, а неподалеку от альфы Центавра ей пришлось притормозить, чтобы развернуться и полететь обратно. Если бы она затормозила резко, то просто размозжилась бы о стекло капитанской рубки своего корабля. В пути она меняла скорость и меняла направление. То есть она нарушала условие, заложенное в первый постулат Эйнштейна, согласно которому *наблюдатель должен равномерно двигаться в одном и том же направлении с неизменной скоростью* (рис. 18.3).

Рис. 18.3. Пространственно-временная схема парадокса двух близняшек: Геи и Астры. Гея остается дома. Ее мировая линия прямая. Астра отправляется к звезде альфа Центавра, а затем возвращается – ее мировая линия изогнута. Астра стареет медленнее, чем Гея. Часы

показывают, сколько времени (в годах) истекло для каждой из близняшек. Прерывистыми линиями показаны время Геи (ЕТ) и время Астры (АТ). Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом

На первом этапе пути Астра летит прочь от Земли, и сегменты ее времени (АТ) нарезаются, как буханка французского хлеба. В момент прибытия к альфе Центавра ее часы отсчитали 3 года звездного времени (АТ), именно настолько она и повзрослела. Но линия одновременных событий «3 АТ» расположена под уклоном, поэтому она пересекает Землю лишь через 1,8 года после старта. Прибывая к альфе Центавра, Астра думает, что Гея с момента старта повзрослела всего на 1,8 года. Астре кажется, что она за это время повзрослела на 3 года, а Гея – всего на 1,8 года. Ведь 1,8 года – это 60 % от 3 лет. Поэтому Астре кажется, что Гея взрослеет медленнее, поскольку себя Астра воспринимает в состоянии покоя и ей кажется, что Гея удаляется от нее со скоростью 80 % от скорости света. На этот момент Астре кажется, что Гея повзрослела меньше нее. Но подождите! Астра включает торможение и ложится на обратный курс. В этой точке мировая линия Астры изгибается. Астра изменила скорость, и в тот же момент радикально изменилось ее представление об одновременности. Когда она улетает от альфы Центавра, у нее на часах прошли все те же 3 года АТ, но поскольку теперь она движется в противоположном направлении, сегмент «3 АТ», охватывающий одновременные события, будет направлен в противоположную сторону и пересечет Землю через 8,2 года после старта. Отправляясь от альфы Центавра, Астра думает, что это происходит в тот самый момент, когда Гея повзрослела на 8,2 года с момента отлета Астры с Земли. За время обратного пути Астры Гея успевает прожить еще 1,8 года, а Астра за то же время – 3 года. Таким образом, между отправлением и возвращением Астры Гея успевает повзрослеть на 8,2 + 1,8 = 10 лет, а Астра за то же время – на 3 + 3 = 6 лет. Итак, и Астра, и Гея согласятся, что в момент их следующей встречи Астра должна быть моложе Геи. Гея преодолела этот отрезок по прямой мировой линии, а мировая линия Астры была изогнута. Таково решение парадокса близнецов. Идея одновременности в данном случае очень важна.

Парадокс близнецов объясняет, как попасть в будущее. Если вы хотите посетить Землю спустя тысячу лет, то вам нужно просто сесть на ракету и отправиться к звезде Бетельгейзе на 99,995 % скорости света; до Бетельгейзе 500 световых лет. Ваши часы будут идти в 100 раз медленнее, чем шли бы на Земле. По земным часам, вы должны были добраться до

Бетельгейзе за 500 лет. Но за время полета вы состаритесь всего на 5 лет. Возвращайтесь обратно со скоростью 99,995 % от скорости света – и состаритесь еще на 5 лет. Но на Земле за время вашего отсутствия пройдет 1000 лет. Таким образом, вы переместитесь в будущее. Такое путешествие обошлось бы дороже, чем весь нынешний бюджет NASA (!) и, разумеется, технологий для конструирования таких космических кораблей пока не существует, но мы знаем, что подобный проект не противоречит законам физики. Протоны в ускорителях частиц разгоняются и до более высоких скоростей, поэтому известно, что достичь таких скоростей возможно. Дело за финансированием и инженерными решениями – NASA, возьмите на заметку.

Можно возразить, что высокое ускорение в точке разворота окажется убийственным. Но оказывается, что всю подобную миссию можно организовать так, чтобы перегрузки не превышали 1 *g*, привычного на Земле. Ноги будут твердо стоять на полу, так как ракета ускоряется. Путешествие немного затянется, зато будет комфортабельным. На пути к Бетельгейзе вы будете постепенно ускоряться в течение 6 лет и 3 недель по корабельному времени, и к этому моменту достигнете пиковой скорости в 99,99992 % от скорости света. Тогда вы будете находиться на полпути к Бетельгейзе. Затем вы станете замедляться до 1 g еще на протяжении 6 лет и 3 недель по корабельному времени, после чего останавливаетесь рядом с Бетельгейзе. Отправляетесь к Земле, постепенно ускоряясь в течение 6 лет и 3 недель, и в конце пути замедляетесь в течение 6 лет и 3 недель. За время пути вы постареете на 24 года и 3 месяца, но когда вернетесь на Землю, там пройдет 1000 лет. Чтобы путешествие получилось более комфортным, на него просто потребуется потратить больше времени (24 года, а не 10 лет). Марко Поло за 24 года совершил свое знаменитое путешествие в Китай и вернулся в Европу. Вам придется потратить на путешествие столько же времени, сколько ушло у Марко Поло на его путь, – и вы сможете побывать в будущем. В начале четвертого тысячелетия на Земле.

Российский космонавт Геннадий Падалка – величайший ныне живущий путешественник во времени. Во время работы на российской космической станции «Мир» и на Международной космической станции он провел 879 суток на околоземной орбите (космическая станция вращается вокруг Земли с высокой скоростью). Падалка состарился на 1/44 секунды меньше, чем его сверстники на Земле (в этой цифре также учтены небольшие релятивистские эффекты, связанные с пребыванием на большой высоте). Падалка вернулся на Землю и застал ее на 1/44 секунды в

будущем. Да, он переместился на 1/44 секунды в будущее. Вы, наверное, посмеиваетесь. Это не такое уж далекое путешествие, но это путешествие в будущее. Однажды в ходе интервью на Национальном общественном радио меня спросили, почему так просто путешествовать в пространстве и так сложно – во времени. Я ответил, что и в пространстве мы не так уж далеко погуляли! Эйнштейн показал, что, сравнивая промежутки в пространстве и промежутки во времени, следует оперировать скоростью света. Итак, когда астроном говорит, что от нас до альфы Центавра 4 световых года, он имеет в виду, что свет от этой звезды летит до нас 4 года. Самая дальняя экспедиция, в которую отправлялись наши астронавты, – на Луну. До Луны всего 1,3 световой секунды. Люди успели слетать на 1,3 световой секунды в пространстве и заглянуть в будущее на 1/44 секунды. Это вполне сравнимые величины.

Интересно, что сегодня на свете есть два настоящих астронавта-близнеца, на примере которых можно проиллюстрировать парадокс близнецов. Марк Келли провел на низкой околоземной орбите 54 дня, а его брат-близнец Скотт Келли – 519 дней на той же околоземной орбите. Поскольку Скотт был в космосе дольше, вращаясь вокруг Земли на большой скорости, сейчас он на 1/87 секунды моложе своего брата Марка.

Я отметил, что если бы мы отправили к Меркурию астронавта, который прожил бы там 30 лет, а потом вернулся на Землю, то он оказался бы на 22 секунды моложе, чем если бы провел все это время дома. Часы на Меркурии идут медленнее, чем на Земле, поскольку Меркурий быстрее вращается вокруг Солнца (это эффект специальной теории относительности) и сильнее погружен в гравитационное поле Солнца (эффект общей теории относительности)[28].

В 1905 году Эйнштейн продемонстрировал, что путешествия в будущее возможны. Это произошло всего через 10 лет после того, как Герберт Уэллс в 1895 году изложил такую идею в своей книге «Машина времени». В рамках ньютоновской физики о подобном можно было забыть: время для всех текло одинаково, все одинаково воспринимали «настоящий момент», путешествия в будущее были невозможны. Но Эйнштейн продемонстрировал, что не все наблюдатели одинаково трактуют момент «сейчас», время оказалось гибким – часы, находящиеся в движении, тикают медленнее. Эйнштейн предоставил нам совершенно новую картину Вселенной – такую, в которой присутствуют три пространственных и одно временное измерение.

Теперь я собираюсь вывести знаменитое эйнштейновское уравнение *E*

$= mc^2$. Допустим, у нас в лаборатории частица медленно движется со скоростью v и эта скорость намного, намного ниже скорости света c (то есть $v << c$). На частицу действуют законы Ньютона, и если она обладает массой m, то, согласно Ньютону, эта частица будет иметь импульс $P = mv$, предположим, направленный вправо. Частица испускает в противоположных направлениях два фотона, каждый из которых обладает энергией $E = h\nu_0$.Один фотон летит вправо, другой влево. Энергия фотона вычисляется по знаменитому уравнению Эйнштейна, где h – постоянная Планка, а ν_0 (греческая буква «ню») – это частота фотонов, измеренная на частице. Частица теряет энергию в количестве $\Delta E = 2h\nu_0$; именно такое количество энергии «с точки зрения» частицы уносят фотоны. Эйнштейн показал, что фотоны переносят не только энергию, но и импульс. Импульс фотона равен его энергии, деленной на скорость света c. С точки зрения частицы два фотона уносят в разные стороны равное количество энергии и при этом обладают одинаковым импульсом, но поскольку импульсы фотонов противоположны друг другу, с точки зрения частицы общий импульс равен нулю. Частица «считает», что находится в покое (по первому постулату Эйнштейна), и испускает два равночастотных фотона в противоположных направлениях. По правилам симметрии, если находящаяся в состоянии покоя частица испускает два равночастотных фотона в противоположных направлениях, то она остается в покое. Отдача от двух фотонов, сообщаемая частице, взаимно компенсируется. Мировая линия частицы остается прямой: скорость частицы не изменяется (рис. 18.4).

Далее рассмотрим, что происходит с двумя этими фотонами. Тот, что летит вправо, в итоге врежется в правую стену лаборатории. Он ударяется в стену, и стена при этом отскакивает вправо на крошечную величину. Эйнштейн продемонстрировал, что фотон несет импульс, равный его энергии, деленной на скорость света. Это эффект давления электромагнитного излучения: стена поглощает импульс фотона и под действием этого импульса немного подается вправо. Наблюдатель, сидящий у правой стены, увидит, что частота фотона, летящего вправо и врезающегося в правую стену, окажется выше, чем у того же фотона в момент, когда он был излучен, – ведь частица приближается к правой стене. Это пример доплеровского эффекта, который мы обсуждали в предыдущих главах. Напротив, наблюдатель, сидящий у левой стены, увидит, что к левой стене летит фотон с явным красным смещением, и, врезаясь в левую стену, этот фотон обладает меньшей частотой, чем в момент излучения, –

поскольку эта частица летит прочь от наблюдателя. Более высокочастотный фотон (с синим смещением) обладает большей энергией, чем сравнительно низкочастотный фотон (с красным смещением). Соответственно правая стена от такого толчка подается вправо немного сильнее, чем левая стена – влево. Два толчка не компенсируют друг друга, и вся лаборатория получает общий результирующий импульс, направленный вправо. То есть возникает лишний импульс. Ньютон полагал, что импульс должен сохраняться (иначе было бы возможно конструировать приборы для левитации, противоречащие законам физики!), и, следовательно, лишний импульс должен откуда-то браться. Единственный возможный источник этого импульса – сама частица.

Рис. 18.4. Пространственно-временная схема мысленного эксперимента, иллюстрирующего формулу $E = mc^2$. Частица движется слева направо со скоростью v, ее мировая линия отклонена. Частица излучает фотон влево (волны которого идут вверх и влево под углом 45°) и такой же фотон вправо (волны которого идут вверх и вправо под углом 45°). Лабораторное время, проходящее между распространением двух совокупностей гребней этих волн, равно $\Delta t'$, оно показано вертикальной прерывистой линией. За это время первый гребень волны, идущей влево, успевает распространиться влево на расстояние $c\Delta t'$, а частица за это время пролетает вправо на расстояние $v\Delta t'$, как показано на рисунке. Длина волны (расстояние между двумя ее соседними гребнями) у движущегося влево фотона дана на рисунке:$\lambda_Л = (c + v)\Delta t'$. Волна у фотона, движущегося вправо, короче ($\lambda_П = (c - v)\Delta t'$; это связано с доплеровским смещением. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом

Известно, что скорость частицы равна $v << c$, так что импульс частицы должен вычисляться по формуле Ньютона mv. Поскольку лаборатория приобрела импульс, у частицы он должен был уменьшиться. Но мировая линия частицы не изгибается, а остается прямой (см. пространственно-временную схему на рис. 18.4). Скорость частицы не изменяется. Если импульс частицы mvуменьшается, а скорость v остается прежней, это означает, что должна уменьшиться масса m частицы. Частица отдала какую-то энергию (в виде двух фотонов) и потеряла часть массы. Некоторая часть ее массы превратилась в энергию! Ого! Это довольно смелый вывод. Каково отношение между количеством испускаемой энергии и количеством утрачиваемой массы? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно всего лишь вычислить доплеровские смещения двух фотонов. Общий импульс от толчка вправо, который приобретут стены лаборатории, равен $2h\nu_0(v/c^2)$. Полностью эти вычисления изложены в приложении 1. Энергия, излучаемая частицей в виде двух фотонов, равна $\Delta E = 2h\nu_0$, так что полный импульс, приобретаемый стенами лаборатории от толчка вправо, равен $\Delta E(v/c^2)$. Множитель v/c^2 складывается из множителей v/c (доплеровское смещение) и множителя $1/c$, связанного с соотношением импульса и энергии у двух фотонов. В свою очередь, общий импульс от толчка вправо, приобретаемый стенами $\Delta E(v/c^2)$, должен равняться тому импульсу, который утрачивает частица $(\Delta m)v$. Итак, имеем тождество $\Delta E(v/c^2) = (\Delta m)v$. Разделим обе части уравнения на v (скорость

частицы сокращается!). Получается $\Delta E/c^2 = \Delta m$.Теперь умножим обе части уравнения на c^2.Получается $\Delta E = \Delta mc^2$.Избавляемся от символов Δ.Остается $E = mc^2$.

В мысленном эксперименте частица утрачивает часть энергии, излучая два фотона, а также теряет часть массы. Частица, теряющая массу, излучает энергию. Излучаемая энергия относится к теряемой массе по формуле $E = mc^2$. Да, эта формула настолько простая – и настолько могучая. Член c^2фигурирует в тождестве, так как и при вычислениях доплеровского смещения, и при вычислениях импульса учитывается свет, а c – скорость света.

Как известно, c – очень большая величина (приблизительно равная 300 000 км/с). Поэтому даже крошечная масса превращается в огромную энергию. По законам Ньютона кинетическая энергия грузовика равна ½ mv^2, где m – масса грузовика, а v – его скорость. Это соотношение соблюдается, пока $v << c$. Грузовик, идущий со скоростью 160 км/ч, преодолевает всего 0,045 км/с (это лишь 0,00000015 c). При лобовом столкновении двух таких грузовиков, каждый из которых гонит со скоростью 160 км/ч, вся их кинетическая энергия 2(½ mv^2) высвободится в виде страшного взрыва. Обломки грузовиков разлетятся во все стороны. Но теперь предположим, что грузовик, состоящий из вещества, врежется в грузовик из антивещества. Два этих грузовика аннигилируют, и вся их масса превратится в энергию – это крайний случай. В таком случае произойдет взрыв, при котором выделится 2(mc^2) энергии, что намного больше mv^2 при столкновении двух обычных грузовиков. Насколько больше? В $2/(0{,}00000015c)^2$ = 89 триллионов раз. Такой взрыв при аннигиляции вещества и антивещества был бы в 89 триллионов раз сильнее, чем взрыв от столкновения двух грузовиков, врезавшихся друг в друга на скорости 160 км/ч. Именно такое колоссальное количество энергии заключено в двух крупных телах, состоящих из обычной материи.

Именно в этом заключается секрет атомной бомбы. Атомы урана или плутония распадаются, и продукты такого деления ядер весят немного меньше самих атомов. Поэтому при атомном взрыве выделяется огромное количество энергии. На Солнце при термоядерном синтезе четыре ядра водорода образуют ядро гелия, которое весит чуть меньше четырех ядер водорода; в ходе этого процесса выделяется энергия. Именно на таком топливе Солнце горит последние 4,6 миллиарда лет. Химики в точности измерили атомные массы различных элементов, и эти расчеты показывают, что масса, приходящаяся на нуклон, у разных элементов немного

отличается. Следовательно, можно вычислить, сколько ядерной энергии может выделиться при термоядерном синтезе легких элементов или делении ядер тяжелых. Железо обладает наименьшей массой на нуклон. Из него невозможно добыть ядерную энергию, об этом шла речь в главе 7.

Эйнштейн, наряду с другими физиками, осознал, что его уравнение подсказывает путь к созданию атомных бомб, которые взрываются в результате деления атомного ядра. Именно об этом он рассказал 2 августа 1939 года в письме президенту Франклину Рузвельту, убеждая того в необходимости сконструировать атомную бомбу, пока этого не сделал Гитлер. Так зародился Манхэттенский проект, а физики-беженцы, работавшие в Америке и Европе, создали полноценную атомную бомбу. Как впоследствии узнали американцы, в Германии действительно была своя атомная программа, чего и опасался Эйнштейн, однако она оказалась неэффективной и не увенчалась успехом. К тому моменту, как США испытали первую атомную бомбу в Нью-Мексико, Германия уже капитулировала. Но в итоге две атомные бомбы были сброшены на Японию. Вскоре капитулировала и Япония, и на этом завершилась Вторая мировая война. Разрушительный эффект атомной бомбы оказался просто ужасающим: в результате атомных взрывов и их последствий (в том числе из-за облучения) погибли приблизительно 200 000 человек. Роберт Оппенгеймер, руководитель Манхэттенского проекта, впоследствии сказал, что первое испытание атомной бомбы напомнило ему строки из «Бхагавад-Гиты»: «Я стал смертью, разрушителем миров». Президент Трумэн принял на себя всю ответственность за решение об атомной бомбардировке. Он чувствовал, что такой шаг необходим для скорейшего завершения Второй мировой войны. Но Трумэн сказал: «Я осознаю всю трагическую важность атомной бомбы». Через много лет в личной библиотеке Трумэна была найдена книга об атомной бомбе, в которой тот подчеркнул слова из последней реплики[29] Горацио в «Гамлете»:

«А мне незнающим позвольте рассказать,
Как все произошло.
То будет повесть
Кровавых, неестественных убийств,
Суда случайного, нечаянных кончин
И козней, павших на главу злодеев».

После войны Эйнштейн посвятил свою жизнь борьбе за ядерное разоружение.

Размышляя о путешествиях с субсветовой скоростью (которые были заведомо нереализуемы в его время), Эйнштейн тем не менее открыл принцип, изменивший ход истории. Работа Эйнштейна, проделанная им в «чудесный» 1905 год, позволила ему войти в число научных тяжеловесов, встать в один ряд с Марией Кюри и Максом Планком. Но величайшее достижение Эйнштейна еще было впереди.

Глава 19
Общая теория относительности Эйнштейна

Автор: Дж. Ричард Готт

Величайшим научным достижением Эйнштейна была общая теория относительности – теория искривленного пространства-времени, объяснившая природу гравитации и заменившая ньютоновскую теорию тяготения.

Эйнштейн размышлял над следующей проблемой. Одновременно бросим тяжелый и легкий шары. Они упадут на пол одновременно. Галилею об этом было известно. А что сказал бы Ньютон? Он бы отметил, что сила тяготения между шаром и Землей равна $F = Gm_{\text{шар}}M_{\text{ЗЕМЛ}}/r_{\text{ЗЕМЛ}}^2$. Он бы также сказал, что $F = Gm_{\text{шар}}a_{\text{шар}}$, так что ускорение $a_{\text{шар}}$ равно силе, приложенной к шару, деленной на его массу. Совместив эти уравнения, получим $a_{\text{шар}} = GM_{\text{ЗЕМЛ}}/r_{\text{ЗЕМЛ}}^2$. Масса шара сокращается. Ускорение шара не зависит от его массы – поэтому и тяжелые, и легкие шары должны падать в одинаковом темпе. Ньютон бы сказал, что тяжелый шар испытывает более сильное тяготение Земли. Но он бы добавил, что такой шар хуже ускоряется, поскольку $F = ma$, что попросту скомпенсирует увеличенную силу, поэтому ускорение обоих шаров будет совершенно одинаковым. Это изрядное совпадение, позволяющее утверждать, что масса, используемая в формуле гравитации (*гравитационная масса*), и масса из формулы $F = ma$ (*инертная масса*) идентичны.

Эйнштейн обдумывал эту проблему иначе. Он размышлял, что бы произошло, окажитесь вы в ускоряющемся космическом корабле, летящем в межзвездном пространстве, где нет гравитации. (Подобно ускоряющемуся звездолету, работающему на аннигиляции вещества и антивещества, о котором Нил рассказывал в главе 10.) Если вы бросите два шара, они просто повиснут в невесомости друг рядом с другом. Затем, поскольку из сопел ракеты вырывается пламя и корабль с ускорением движется вверх, пол корабля с ускорением движется вверх и сталкивается с плавающими в невесомости двумя шарами. Шары, естественно, врезаются в пол в тот самый момент. Они просто плавали в пространстве, но ударились о пол корабля, потому что сам пол подскочил. Просто. В таком случае это не совпадение, что оба шара ударяются о пол одновременно.

Вновь представим, что мы бросаем два шара на землю. На этот раз попробуем вообразить, что шары просто плавают в пространстве друг рядом с другом, а пол подскакивает и сталкивается с ними. Люди знали, что на ускоряющемся космическом корабле эффект был бы точно таким, как если бы мы оставались дома на Земле. Но Эйнштейн сказал, что если эксперимент на ускоряющемся космическом корабле протекает точно как при гравитации, значит, это ускорение и есть гравитация. Он назвал это явление *принципом эквивалентности*. Он назвал эту находку «своей самой счастливой идеей», и осенила она его в 1907 году. Если два явления выглядят одинаково, значит, они должны быть идентичны. Это было очень смелое заключение.

Эйнштейн и ранее пользовался такой логикой. Заряд, движущийся мимо магнита, ускоряется под действием магнитного поля, но стационарный заряд испытывает точно такое же ускорение, когда мимо него движется магнит. Во втором случае, по уравнениям Максвелла, ускорение порождается электрическим полем, которое генерируется изменяющимся магнитным полем. Эйнштейн пришел к выводу, что два этих явления должны быть идентичны и что лишь относительное движение по-настоящему важно. Таким образом, представление об электрическом и магнитном поле как об отдельных сущностях было неверным, и два этих феномена требовалось заменить одним: *электромагнитным полем*. Аналогично, Эйнштейн обнаружил, что наши представления о пространстве и времени как о самостоятельных сущностях нужно заменить идеей четырехмерного пространства-времени. Зачастую крупные прорывы в науке происходят, когда кто-то догадывается, что два различных явления на самом деле идентичны. Так, Ньютон осознал, что яблоко падает под действием той самой силы, которая удерживает Луну на орбите. Аристотель знал, что яблоко падает на землю под действием силы тяжести, но предполагал, что Луну удерживает на орбите какая-то иная, небесная сила. Ньютон осознал, что два этих явления суть одно и то же.

Эйнштейн искренне верил в свою идею о принципе эквивалентности. Если одновременно бросить легкий и тяжелый шар, то они просто зависнут в свободном падении, но поверхность Земли подскакивает и ударяется о них. Вся беда заключалась в том, что подобное казалось бессмысленным. Как поверхность Земли может повсюду с ускорением двигаться вверх, если Земля при этом не увеличивается? Если бы она раздувалась, как воздушный шарик, то могла бы действительно подскакивать к шарам, которые мы бросаем. Но Земля ни на йоту не увеличивается, поэтому такая идея кажется бессмысленной. Она имела бы право на существование, лишь

если бы пространство-время было искривлено и не подчинялось законам евклидовой геометрии.

Давайте поговорим о кривизне. На рис. 19.1 показан глобус. Его поверхность искривлена, и поэтому евклидова планиметрия на ней не работает. Евклид учил, что сумма углов любого треугольника на плоскости равна 180°. Кратчайшая линия между двумя точками, которую можно провести на глобусе, – это дуга большого круга. *Большой круг* – это круг на глобусе, центр которого совпадает с центром глобуса. Экватор Земли – это большой круг. Любой меридиан – это большой круг. Кратчайшее расстояние между Нью-Йорком и Северным полюсом проходит по меридиану, соединяющему Нью-Йорк и Северный полюс. На глобусе можно построить треугольник, в вершинах которого лежат Северный полюс и две точки на экваторе, причем оба экваториальных угла этого треугольника будут равны 90°. Получится треугольник (состоящий из дуг большого круга), в котором будет три угла по 90°, всего 270°.

Если отправиться с Северного полюса и так и идти, пока не достигнешь экватора, то на экваторе потребуется повернуть на 90°, чтобы взять курс на запад. Затем, достигнув второй точки на экваторе, понадобится вновь повернуть на 90°, чтобы взять курс на север и вернуться на Северный полюс. Прибыв туда, вы увидите, что две стороны треугольника смыкаются на Северном полюсе опять же под углом 90°, поскольку это два меридиана, разделенные на 90°. Вы прошли по треугольнику с тремя прямыми углами, который невозможен по законам евклидовой планиметрии. Поверхность сферы искривлена, поэтому устроена иначе, нежели евклидова планиметрия.

Допустим, мы начертили на глобусе круг, центр которого совпадает с Северным полюсом. Пусть радиус круга, измеренный по поверхности глобуса, равен расстоянию от полюса до экватора (это 1/4 окружности Земли). Окружность такого круга, центр которого совпадает с Северным полюсом, – это экватор. Длина экватора равна длине окружности Земли, поэтому радиус круга, который вы начертите, должен быть равен 1/4 окружности Земли. Следовательно, в данном случае окружность круга вчетверо больше радиуса, то есть превышает радиус не в 2π раз, как положено в евклидовой геометрии, а меньше. Опять же оказывается, что искривленная поверхность сферы не подчиняется законам евклидовой планиметрии.

Рис. 19.1. Треугольник с тремя прямыми углами, построенный на сфере. Снимок предоставлен Дж. Ричардом Готтом

Эйнштейн представлял себе вращающуюся пластинку для фонографа. Если бы на пластинке стоял муравей, то ему пришлось бы крепко упираться лапками, чтобы не упасть. Понадобилось бы производить центростремительное ускорение (то есть крепко держаться), и при этом ощущалась бы «гравитационная» сила, которая тянет муравья к краю пластинки. На некоторых аттракционах можно испытать подобный эффект: кабина расположена в своеобразной емкости, напоминающей вращающуюся консервную банку, и в ней вы ощущаете силу g, толкающую вас на стенки цилиндра. Там можно даже ноги от пола оторвать. В обоих случаях: вращающаяся пластинка фонографа и вращающаяся кабина на аттракционе – ускоряющееся круговое движение имитирует гравитацию, точно как на ускоряющемся космическом корабле. Предполагается, что пластинка фонографа плоская. Но Эйнштейн знал: поскольку край пластинки стремительно движется, два наблюдателя (один сидит в центре

пластинки, а другой на краю), попытавшись измерить одинаковые линейки, лежащие на пластинке, получат разные результаты. Длина окружности вращающейся пластинки, измеренная сидящими на этой пластинке наблюдателями, не будет равна $2\pi r$ (но именно такова длина окружности в евклидовой планиметрии). Эйнштейн пришел к выводу, что вращающаяся пластинка фонографа обладает неевклидовой геометрией (имеет кривизну) именно потому, что вращается, и в таком случае на ней имитируется гравитация. Если такая смоделированная гравитация – *не что иное, как*гравитация (по принципу эквивалентности Эйнштейна), то кривизна пространства-времени сама по себе может порождать гравитацию.

Если я нахожусь в Нью-Йорке и хочу отправиться в Токио, то мой путь должен пролегать по дуге большого круга – кратчайшему возможному маршруту. Между двумя этими городами на глобусе можно даже натянуть струну. Дуга большого круга пройдет через север Аляски (рис. 19.2). Найдите глобус и попробуйте сами. Именно по такой траектории полетит самолет. Кроме того, это кратчайший возможный путь между двумя городами. Чтобы в этом убедиться, возьмите игрушечный грузовичок и прокатите его по глобусу от Нью-Йорка до Токио. Колеса у такой машинки катятся прямо вперед; если вы правильно нацелите его на Токио, то можете просто ехать по дуге большого круга, никуда не сворачивая, миновать Северную Аляску и прибыть на место назначения. Такой кратчайший возможный путь называется *геодезической линией*. Отправьте грузовичок по экватору в западном направлении, никуда не сворачивайте – и объедете весь экватор. Если поехать в любом направлении и ехать только прямо, не притрагиваясь к рулю, то ваш путь будет пролегать по геодезической линии. Взгляните на плоскую карту Земли в проекции Меркатора: геодезическая линия, связывающая Нью-Йорк и Токио (часть дуги большого круга), кажется искривленной. Поскольку оба города находятся примерно на сороковой параллели, по карте Меркатора может показаться, что кратчайший путь из Нью-Йорка в Токио пролегает по этой параллели. Но на самом деле этот путь длиннее. Он к тому же не прямой. Эта широта образует на глобусе малый круг; ее окружность меньше, чем у экватора, а центр этой окружности (расположенный внутри земного шара) лежит к северу от центра Земли. Это не большой круг. Граница между США и Канадой к западу от Великих озер – часть такого малого круга. Если бы вы ехали на грузовике вдоль этой границы с запада на восток, то вам пришлось бы постоянно немного подруливать влево, чтобы не сбиваться с маршрута. На плоской карте Земли (смотря в какой координатной системе она составлена) прямая геодезическая линия может казаться искривленной.

Рис. 19.2. На глобусе показана дуга большого круга, соединяющая Нью-Йорк и Токио. Снимок предоставлен Дж. Ричардом Готтом

Бросьте баскетбольный мяч в корзину – и он опишет дугу, а потом попадет в корзину. Да, очевидно, он летит по кривой линии (параболе). Может показаться, что траектория мяча изогнута на пару метров. Она изогнута точно так же, как и путь из Нью-Йорка в Токио на карте в проекции Меркатора. Идея Эйнштейна заключалась в том, что объекты в состоянии свободного падения будут, подобно баскетбольному мячу, двигаться по геодезическим линиям в искривленном пространстве-времени, по кратчайшим из возможных траекторий (если только на них не действуют другие силы, например электромагнитная). Считалось, что курс для частицы задать просто: «лети прямо». В физике частиц не суммируются совокупности сил, возникающих под действием различных масс, как предположил бы Ньютон. Любая частица попросту летит прямо. Пространство-время искривлено, и из-за этой кривизны возникает

гравитация. Вспомните пространственно-временную схему с рис. 18.1, где мировая линия Солнца изображена в виде вертикальной полосы, а мировая линия Земли – в виде спирали, закрученной вдоль этой полосы. На самом деле это очень продолговатая спираль. Ее ширина – восемь световых минут, а расстояние между соседними оборотами равно одному световому году. Эйнштейн предположил, что солнечная масса слегка искривляет окружающее пространство-время, так что спиралевидная мировая линия Земли фактически повторяет кратчайшую возможную траекторию через пространство-время, как грузовик, который едет прямо в Токио. Мировая линия Земли может казаться искривленной в той координатной системе, что дана на рис. 18.1, но на самом деле Земля летит по кратчайшей возможной геодезической линии в искривленном пространстве-времени. Если знать, какова эта кривизна, то можно вычислить геодезическую линию, описываемую Землей вокруг Солнца.

Именно так Эйнштейн объяснял гравитацию. Ньютон бы сказал, что если взять две массы и оставить их в покое посреди межзвездного пространства, то они с ускорением устремились бы друг к другу под действием силы тяготения, пока бы наконец не столкнулись. Ньютон бы так решил, поскольку две массы воздействуют друг на друга с некоторыми силами через разделяющее их расстояние, и эти силы притягивают две массы друг к другу. Эйнштейн сказал бы, что две массы искривляют пространство-время каждая вокруг себя. В такой искривленной среде две частицы просто летят по кратчайшим доступным им траекториям и в итоге слетаются вместе.

Рис. 19.3. Каждый из грузовичков едет прямо на север, но из-за кривизны глобуса они сближаются и сталкиваются на Северном полюсе. Снимок предоставлен Дж. Ричардом Готтом

Предположим, у нас есть два грузовика, расположенных на некотором расстоянии от экватора, и оба этих грузовика едут на север (рис. 19.3 внизу). Они отправляются в путь по параллельным траекториям, поначалу ни приближаясь друг к другу, ни отдаляясь друг от друга, но не остаются на параллельных маршрутах, так как поверхность Земли искривлена. Допустим, оба грузовика едут на север по соседним меридианам (а это геодезические линии). Оба они направляются на север и сначала движутся параллельно друг другу, но чем дальше на север они забираются, не отклоняясь от своих меридианов, тем ближе друг к другу оказываются. В конце концов они столкнутся на Северном полюсе.

Согласно Эйнштейну, масса каждой частицы – источник кривизны пространства-времени, и эта кривизна подобна кривизне Земли. Направление «на север» соответствует направлению времени в будущее. Меридианы, по которым едут два грузовика, соответствуют мировым линиям двух частиц. Такие максимально прямые мировые линии двух частиц рисуются вместе в силу кривизны пространства-времени. Обратите внимание: если пустить два грузовичка по двум параллельным трекам на плоской столешнице, то грузовички так и поедут параллельно друг относительно друга и их геодезические линии останутся на одинаковом расстоянии. В теории Эйнштейна гравитационное притяжение обусловлено кривизной пространства-времени.

Масса и энергия вызывают искривление пространства-времени – но как? Эйнштейн принялся работать над этой идеей. Он поинтересовался у одного из друзей-математиков: «Мне нужно будет изучить тензоры кривизны Римана?» Друг ответил: «Боюсь, что да». Бернхард Риман разработал теорию кривизны в многомерных пространствах. Он писал работу, аналогичную диссертации, под руководством Карла Фридриха Гаусса. Гаусс был великим математиком и сформулировал теорию (гауссовой) кривизны для плоских поверхностей – например, для поверхности Земли. Гаусс предложил Риману самому придумать три варианта темы для диссертации. Третьей из любимых тем Римана была кривизна в высших измерениях. Гаусс сказал: «Работайте над ней». Риман так и сделал, и это был настоящий подвиг. Риман продемонстрировал, что для понимания кривизны в многомерных пространствах нужна сущность, которая сегодня именуется «*тензор кривизны Римана*»:. В четырех измерениях он казался математическим монстром, насчитывавшим 256 компонент[30]. К счастью, многие из этих компонент были идентичны, так что, фактически, независимых компонент было всего 20 – все равно очень много. Эту математическую тварь Эйнштейну предстояло укротить. Он

хотел сформулировать уравнения гравитационного поля, которые были бы полностью аналогичны максвелловским уравнениям электрического и магнитного поля. Как именно энергия и масса искривляют пространство-время? Какие геометрии возможны? Он хотел получить ответы на эти фундаментальные вопросы при помощи своей теории, но теория также должна была хотя бы приблизительно согласовываться с ньютоновскими теоретическими построениями для малых скоростей и небольшой кривизны, поскольку в таких условиях теория Ньютона работает очень хорошо.

Эйнштейн работал над этой проблемой с 1907 по 1915 год. Для этого потребовалась очень сложная математика. Неоднократно Эйнштейн оказывался на тупиковом пути. Но он не сдавался. И вот в конце 1915 года он нащупал верные уравнения поля. Вот они (в соответствующих единицах, где постоянная Ньютона G и скорость света c приравнены к 1). Уравнения выглядят так: $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi T_{\mu\nu}$. Правая часть уравнения соответствует «материи» (массе, излучению и так далее), расположенной в некоторой точке пространства-времени, а левая часть уравнения показывает, каким образом пространство-время искривлено в этой точке[31]. Материя во Вселенной определяет, как именно искривляться пространству-времени. Эйнштейн избавился от таинственного ньютоновского «действия на расстоянии». Материя, содержащаяся в некоторой точке Вселенной (вещество, излучение), заставляет пространство-время определенным образом искривляться *именно в этом месте*. Частицы и планеты также выбирают курс строго локально: они просто перемещаются по прямой в искривленном пространстве-времени. Вывод этих уравнений оказался тем еще испытанием. Сначала Эйнштейн полагал, что верные уравнения имеют вид $R_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$.То есть он потерял один член. Интересно, что уравнения в таком виде корректны для вакуума. В вакууме никакой материи нет, поэтому, рассудил Эйнштейн, в вакууме $T_{\mu\nu} = 0$.Поэтому он решил, что в вакууме и $R_{\mu\nu} = 0$.Но если $R_{\mu\nu} = 0$ в пустоте, то R (вычисляемое по компонентам $R_{\mu\nu}$) также будет равно нулю, что будет удовлетворять и верным уравнениям поля с дополнительным членом $-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$, которые были сформулированы в 1915 году. Ведь в вакууме и дополнительный член тоже будет равен нулю. Хотя поначалу Эйнштейн исходил из ошибочных уравнений поля, они, к счастью, оказались корректны для вакуума. Неделю спустя он понял, что нужно добавить еще один член $-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$, чтобы в уравнениях учитывалось локальное сохранение энергии. Локальное

сохранение энергии связано с таким условием: общая масса-энергия в комнате может возрасти лишь в том случае, если через дверь в комнату попадет какая-то дополнительная материя. Это очень удобное свойство уравнений. Точно так и Максвелл заметил, что должен добавить в свои уравнения еще один член, чтобы обеспечить сохранение заряда, и именно этот дополнительный член натолкнул Максвелла на мысль, что свет – это электромагнитные волны.

Эйнштейн сделал кое-какие расчеты при помощи своих уравнений поля. Он вычислил, какова должна быть кривизна пространства в вакууме вокруг Солнца. Затем он смог вычислить геодезическую, соответствующую спиральной мировой линии планеты. Он обнаружил, что в целом планеты в искривленном пространстве-времени следуют не по обычным эллиптическим орбитам, как считал Кеплер, а по эллиптическим траекториям, для которых характерна *прецессия* (то есть медленное вращение). Планета при орбитальном вращении не описывает все один и тот же эллипс; на самом деле, эллиптическая орбита любой планеты медленно вращается. Для большинства планет, которые достаточно далеки от Солнца, этот эффект ничтожен, но у Меркурия, чья орбита расположена ближе всего к Солнцу и отличается наибольшей кривизной, такой эффект можно было измерить. Эйнштейн вычислил, что эллиптическая орбита Меркурия должна испытывать прецессию (поворачиваться) на 43 секунды дуги за столетие. Эврика! Тогда удавалось обосновать непонятную прецессию орбиты Меркурия, время от времени фиксируемую астрономами, – Эйнштейн знал об этом явлении, а Ньютон не мог объяснить.

Эйнштейн так разволновался от этих вычислений, что у него даже (по его словам) сердце заколотилось. Уравнения давали верный результат – 43 секунды дуги за столетие, – изреченный самой Природой. Эти расчеты он сделал 18 ноября 1915 года. На тот момент он еще пользовался неверными уравнениями поля $R_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$, но, к счастью, в данном конкретном случае они работали отлично, поскольку Солнце находится в вакууме.

В тот же день он вычислил, насколько должны искривляться лучи света, проходящие мимо Солнца. Он получил геодезическую линию, по которой должен идти свет в искривленном пространстве-времени поблизости от Солнца. У него получалось, что свет далекой звезды, который на пути к Земле пролетает мимо края солнечного диска, должен отклоняться на 1,75 секунды дуги. Такое отклонение можно наблюдать. Как рассмотреть звезды, расположенные у края солнечного диска? Нужно

дождаться солнечного затмения, когда Луна попросту затмевает яркий солнечный свет. Можно измерить положения звезд на фотопластинке во время затмения, а затем измерить их полгода спустя, когда Земля будет по другую сторону от Солнца, а само Солнце – вдали от этих звезд. Потом останется сравнить две эти фотографии и положения звезд на них. Согласно уравнениям Эйнштейна, близ солнечного диска звезды должны быть сдвинуты на 1,75 секунды дуги. Эйнштейн предложил провести такой эксперимент во время солнечного затмения.

В этом отношении ему повезло. Ранее, еще не до конца доработав уравнения поля, он выдвигал качественную аргументацию, опираясь на принцип эквивалентности в примере с ускоряющимся космическим кораблем. Луч света, летящий прямо по горизонтали в межзвездном пространстве, после попадания в космический корабль должен был искривляться, поскольку прямой горизонтальный луч света в итоге врежется в корабельный пол, который с ускорением движется вверх навстречу лучу. Руководствуясь этой аналогией, Эйнштейн утверждал, что луч света должен искривляться под действием гравитации. Этот аргумент верно учитывал искривление во времени, но упускал искривление в пространстве, необходимое для построения полноценных уравнений поля, так что Эйнштейн получал лишь половину правильного ответа. У него получалось отклонение в 0,875 секунды дуги – именно к такому ответу пришел бы и Ньютон. Эйнштейн опубликовал эти выкладки и предложил проверить их во время солнечного затмения в 1914 году. Но началась Первая мировая война, и никаких экспедиционных наблюдений сделать не удалось. К счастью для Эйнштейна. В 1915 году у него уже был верный показатель отклонения света в искривленном пространстве-времени – 1,75 секунды дуги, и этот показатель расходился с ньютоновским прогнозом. Если бы эксперимент показал отклонение 0,875 секунды дуги – это подтвердило бы правоту Ньютона и опровергло Эйнштейна. Если бы никакого отклонения не обнаружилось, то Эйнштейн бы оказался побежден, но правоты Ньютона это бы не отменяло: возможно, предположил бы Ньютон, масса притягивает массу, но не притягивает свет. В таком случае Ньютон оставался бы в деле. Оставалось последнее решающее испытание. Эйнштейновский расчет прецессии Меркурия был эпигнозом, то есть прогнозом задним числом. Этот эпигноз объяснял уже известный эмпирический факт, не учтенный Ньютоном. Но в данном случае Эйнштейн делал именно прогноз, причем куда более радикальный.

В мае 1919 года были снаряжены две британские экспедиции, которые должны были 29 мая 1919 года наблюдать солнечное затмение. Одна точка

наблюдения находилась в бразильском городе Собрал, а другая – на острове Принсипи у берегов Африки. Сэр Артур Эддингтон объявил о ее результатах на общем собрании Королевского общества и Королевского астрономического общества в Лондоне 6 ноября 1919 года. В Собрале наблюдалось отклонение света на 1,98 ± 0,30 секунды дуги, а на Принсипи – отклонение 1,61 ± 0,30 секунды дуги. Оба результата согласовывались с эйнштейновским значением 1,75 секунды дуги в пределах измерительной погрешности ±0,30 секунды дуги, и оба противоречили мнению Ньютона. Нобелевский лауреат Дж. Дж. Томпсон, первооткрыватель электрона, возглавлявший собрание, заявил: «Это самый важный результат, полученный в связи с теорией гравитации со времен Ньютона… Он представляет собой одно из величайших достижений человеческой мысли».

На следующий день фотография Эйнштейна появилась в газете *London Times* под заголовком «Революция в науке». Через два дня о нем написали и в *New York Times*. Именно тогда Эйнштейн превратился из выдающегося ученого своего времени в мировую знаменитость, человека, известного всем. В этот момент он сравнялся с Исааком Ньютоном.

Полученные Эддингтоном данные об искривлении света вскоре были независимо подтверждены с еще более высокой точностью У.У. Кэмпбеллом и Р. Трамплером, которые в 1922 году наблюдали солнечное затмение в Австралии. Они зафиксировали отклонение в 1,82 ± 0,20 секунды дуги, которое, опять же, согласовывалось с эйнштейновской оценкой 1,75 секунды дуги.

Вот как сам Эйнштейн говорил о своих мытарствах, пережитых в период работы над теорией относительности в 1907–1915 годах:

«Годы ревностного поиска истины во тьме, такой истины, которую чувствуешь, но не можешь выразить, когда испытываешь страстное желание и впадаешь то в уверенность, то в отчаяние, пока не достигаешь, наконец, ясности и понимания, все это ведомо лишь тем, кто сам испытывал подобное»[32].

Глава 20
Черные дыры

Автор: Дж. Ричард Готт

Эта глава посвящена самым таинственным объектам во Вселенной – черным дырам. Одно из первых точных решений, удовлетворявшее эйнштейновским уравнениям общей теории относительности, соответствовало черной дыре. Точное решение эйнштейновских уравнений – это пространство-время, чья геометрия в каждой точке характеризуется кривизной, и в каждой точке этого пространства-времени уравнения решаются локально. Особенно интересно решение для геометрии пустого пространства, окружающего точечную массу. Здесь мы говорим о *вакуумных* уравнениях поля, поскольку эти уравнения применимы к пустоте. Именно эти уравнения пытался решить Эйнштейн, исследуя орбиту Меркурия и искривление света в вакууме поблизости от Солнца. Но найти такое решение было сложно, поскольку никто не представлял, какова должна быть его геометрия, так что Эйнштейн удовлетворился приблизительным решением. В рамках этого решения он предполагал, что пространство-время приблизительно плоское, как и в специальной теории относительности, но с небольшими *возмущениями* (отклонениями от идеально плоской формы). Решать уравнения для небольших возмущений оказалось проще, поскольку уже было известно, какова должна быть исходная геометрия и, отталкиваясь от нее, было удобнее находить решения с учетом небольших поправок. Поскольку скорости объектов, вращающихся вокруг Солнца, невелики по сравнению со скоростью света, околосолнечное пространство лишь слегка искривлено. Поэтому приблизительное решение Эйнштейна оказалось достаточно точным, равно как и спрогнозированные им величины для орбиты Меркурия и искривления света около Солнца. Возможно, Эйнштейн считал, что найти точные решения для этих уравнений будет слишком сложно. Так или иначе, он остановился на приблизительном.

Первым, кому удалось найти точное решение для эйнштейновских уравнений поля в вакууме вокруг точечной массы, был немецкий астроном Карл Шварцшильд. Он обнаружил решение, описывавшее черную дыру, то есть точечный источник гравитации в абсолютной пустоте. Публикуя работы по общей теории относительности, Эйнштейн прикидывал, что в

мире найдется примерно дюжина человек, способных ее понять. Одним из них был Карл Шварцшильд. В 1900 году он написал статью о возможной кривизне пространства. Это было еще до появления специальной теории относительности. Он рассуждал, что пространство может обладать положительной кривизной, подобно шару, либо отрицательной кривизной, как у ковбойского седла. Шварцшильд хотел выяснить, каков должен быть радиус этой кривизны с учетом наиболее актуальных на тот момент астрономических наблюдений. Уже тогда он стремился исследовать кривизну пространства. Когда вышла статья Эйнштейна, Шварцшильд очень живо откликнулся на нее: понял эту статью и, что не менее важно, оказался способен справиться со сложной математикой, присущей тензорам кривизны Римана. Он оказался во всеоружии, чтобы извлечь из этих данных что-то новое и оригинальное. Шварцшильду удалось решить задачу, поскольку он стал решать эти уравнения в очень толковой системе координат, позволявшей воспользоваться следующим фактом: задача связана со сферической симметрией и неизменна во времени. Оказалось, что такое решение эйнштейновских уравнений для точечной массы в пустом пространстве описывает внешнюю часть черной дыры.

На Первой мировой войне Карл Шварцшильд подхватил редкое аутоиммунное заболевание, в то время смертельное; в 1916 году он был комиссован по болезни, уже дома узнал о статье Эйнштейна и нашел свое решение. Он отправил решение Эйнштейну, сообщив, что в разгар войны был счастлив «провести некоторое время в саду ваших идей». Через пару месяцев Шварцшильд умер.

Найти такое точное глобальное решение для вакуумных уравнений поля было сложно, как сшить лоскутное одеяло. В каждой точке пространства сшиваем кусочки, и локальные члены кривизны повсюду отличаются, но в сумме они дают ноль. Эти уравнения диктуют правила, по которым можно сшивать лоскуты. Просто шьешь и добавляешь кусочек за кусочком. Но, в конечном итоге, у тебя должно получиться глобальное решение – лоскутное одеяло, – каждая точка которого удовлетворяет этим уравнениям. Это довольно сложно. Карл Шварцшильд оказался одним из первых, кому удалось найти такое решение для искривленного пространства вокруг точечной массы.

Сын Карла Шварцшильда Мартин долгое время работал в Принстоне и был нашим коллегой (см. рис. 8.3). Он также стал астрономом и внес серьезный вклад в науку. Так, Мартин определил, что такие звезды, как Солнце, рано или поздно становятся красными гигантами. Он определенно пошел по стопам отца, которого, в сущности, и не знал – тот умер, когда

Мартину было всего 4 года. Интересно, что Карл в Первую мировую войну сражался за Германию, а Мартин бежал из Германии после того, как к власти пришел Гитлер, и во Вторую мировую войну выступал против Германии на стороне США.

Чтобы понять, что такое черные дыры, для начала вернемся к ньютоновскому тяготению. Если я возьму мяч и подброшу в воздух, то что произойдет? Мяч немного взлетит, а затем упадет. Есть даже пословица: «Чем выше взлетишь, тем больнее падать». Правда, вот незадача: эта пословица ошибочна. Если не учитывать сопротивление воздуха, то можно кинуть мяч с достаточной скоростью, превышающей вторую космическую, например 40 000 км/ч, – тогда мяч преодолеет земную гравитацию и никогда не упадет. Астронавты «Аполлона» летели к Луне практически на такой скорости. В теории Ньютона есть формула для расчета такой скорости убегания: $v_{уб}^2 = 2GM/r$, где G – ньютонова гравитационная постоянная, M – масса Земли, а r – радиус Земли. Теперь допустим, что у меня есть колоссальный пресс для мусора, при помощи которого я сжал Землю в малюсенький шарик, как будто она бумажная; в таком случае ее радиус уменьшится. Что произойдет со скоростью убегания? Масса Земли останется прежней, а радиус станет гораздо меньше, поэтому скорость, необходимая для отрыва от поверхности, возрастет. В конце концов я могу спрессовать Землю настолько сильно, что вторая космическая скорость сравняется со скоростью света c. Насколько мал должен быть такой радиус? Можно просто подставить в уравнение член $v_{уб}^2 = c^2 = 2GM/r$ и вычислить r. Получится, что $r = 2GM/c^2$. Эта величина называется «*радиус Шварцшильда*» в честь Карла Шварцшильда. При такой массе, как у Земли, радиус Шварцшильда равен 8,8 мм. Это размер крупной жемчужины. Если сжать Землю до еще меньшего радиуса, то вторая космическая скорость станет выше скорости света, и ничто, даже свет, с Земли улететь не сможет. Эйнштейн продемонстрировал, что превысить скорость света невозможно, поэтому если сплюснуть Землю до размеров менее радиуса Шварцшильда, то планета необратимо превратится в *черную дыру*. Мы называем ее «черной дырой», поскольку никакого света от нее не отражается. Масса, заключенная в черной дыре, будет и далее сжиматься все сильнее и сильнее, вторая космическая скорость продолжит расти. В пределах радиуса Шварцшильда гравитация превосходит все остальные силы, и вся масса сжимается в точку, в *сингулярность* с бесконечной кривизной в центре. Согласно теории относительности, размер такой точки должен быть нулевым, но считается, что под действием квантовых эффектов

сингулярность размажется до размера около 1,6 × 10^{-33} сантиметров, так называемой *планковской длины* (в главе 24 будет рассказано, откуда берется это число). Эта величина гораздо меньше атомного ядра. В итоге имеем в центре точечную массу (сосредоточенную фактически в нулевом объеме), а вокруг нее – пустое искривленное пространство.

Если бы мы вошли в пределы радиуса Шварцшильда, то смогли бы мы выбраться обратно? Нет. Для этого потребовалось бы развить сверхсветовую скорость, а Эйнштейн продемонстрировал, что это невозможно.

Радиус Шварцшильда черной дыры пропорционален ее массе. Чем больше масса, тем шире будет радиус Шварцшильда. Истина такова, что Землю было бы очень сложно сжать до радиуса Шварцшильда. Но когда массивная звезда сжигает все свое ядерное топливо, от нее остается плотное ядро, которое вполне может уменьшиться до собственного радиуса Шварцшильда. Когда Солнце погибнет, оно превратится в красный гигант, потом от него отделятся газовые оболочки и останется ядро – белый карлик размером примерно с Землю. Если масса звездного ядра окажется больше 1,4 солнечных масс, но не превысит 2 солнечных, то белый карлик будет сжиматься и дальше, пока не превратится в нейтронную звезду радиусом около 12 километров. Нейтронная звезда всего в 2–3 раза крупнее своего радиуса Шварцшильда, поэтому она близка к опасному пределу. Если же попытаться сформировать нейтронную звезду, которая будет немного тяжелее 2 солнечных масс, то получится нестабильный объект, который может сконцентрироваться в пределах радиуса Шварцшильда, – тогда гравитация полностью возобладает и возникнет черная дыра. Черная дыра в 10 солнечных масс, какая может образоваться в итоге гибели и коллапса очень массивной звезды, имеет радиус Шварцшильда 30 километров. У сверхмассивной черной дыры в 4 миллиона солнечных масс – такая черная дыра находится в центре нашей Галактики – радиус Шварцшильда равен 12 миллионам километров (чуть менее 1/10 а.е.). Одна из крупнейших когда-либо обнаруженных черных дыр находится в центре гигантской эллиптической галактики M87. Ее масса – 3 миллиарда солнечных и, соответственно, ее радиус равен 9 миллиардам километров. Эта величина вдвое больше радиуса всей Солнечной системы с учетом орбиты Нептуна.

Предположим, мы отправились за шварцшильдовский радиус в черную дыру, чья масса – 3 миллиарда солнечных. Допустим, в опыте участвуют профессор и аспирант; профессор хочет узнать, что происходит внутри, и посылает аспиранта на разведку. Профессор остается в ракете за пределами черной дыры и зависает на постоянной высоте, равной, скажем,

1,25 радиуса Шварцшильда. Профессор ощущает ускорение, обусловленное работой двигателей ракеты, которая должна оставаться на этом фиксированном расстоянии от черной дыры и не падать в нее. Пока профессор держится за пределами черной дыры, ничего дурного с ним не происходит. Однако отважный аспирант, чтобы исследовать черную дыру, просто пускается в свободное падение. ВЖУУУУУХ! Падая, аспирант радирует профессору и сообщает, как идут дела. Первый информационный фрагмент – слово «ДЕЛА». Радиосигнал летит прочь от аспиранта со скоростью света.

Тем временем аспирант продолжает падать, а радиосигнал достигает профессора. Он получает первое слово из сообщения: «ДЕЛА». Аспирант, падая, посылает второе слово из сообщения: «ИДУТ». Это слово было отправлено буквально на кромке радиуса Шварцшильда. Этот сигнал также улетает прочь со скоростью света, но ему требуется больше времени, чтобы достичь профессора. Профессор вынужден жечь топливо, просто чтобы оставаться на месте и не упасть в дыру, так что фактически он все время ускоряется в сторону от горизонта, и сигнал «ИДУТ» догоняет его довольно нескоро.

Тем временем аспирант пересекает радиус Шварцшильда. Это хорошо? К сожалению, нет. При этом он проходит точку невозврата, но никакого «дорожного знака» о такой точке не заметит. Здесь с аспирантом не произойдет ничего интересного. Ему кажется, что все нормально. На самом деле, прямо сейчас вы можете пересекать радиус Шварцшильда какой-нибудь колоссальной черной дыры, и с вашей комнатой, где вы читаете эти строки, ничего не случится. Крохотный участок пространства-времени локально кажется практически плоским, поэтому локальные измерения абсолютно не позволяют судить, каково глобальное решение. Миновав радиус Шварцшильда, аспирант посылает третье слово: «ДОСТАТОЧНО». Второе слово, «ИДУТ», по-прежнему летит к профессору. Пока профессор получил только слово «ДЕЛА». Итак, аспирант оказался в пределах радиуса Шварцшильда. Сигнал «ДОСТАТОЧНО» удаляется от него со скоростью света. Но этот сигнал подобен ребенку, бегущему вверх по эскалатору, идущему вниз – без всякого толку. На радиусе Шварцшильда вторая космическая скорость равна скорости света; радиосигнал, летящий со скоростью света, навечно остается на этом радиусе и дальше улететь не может. Сигнал «ИДУТ» продолжает путь прочь от черной дыры.

Пока аспирант продолжает падать все дальше в глубь радиуса Шварцшильда, начинает происходить что-то странное. Он падает ногами

вперед. То есть ноги ближе к центру черной дыры, чем голова. Поскольку гравитация – это сила, пропорциональная $1/r^2$, ноги испытывают более сильное тяготение, нежели голова, а на поясе аспиранта тяготение примерно среднее. Голова и ноги тянутся в разные стороны из-за этого приливного взаимодействия. Аспиранта как будто вздергивают на дыбе. Кроме того, его плечи все плотнее сжимает с боков по мере того, как сближаются линии, идущие от них к центру черной дыры. Аспиранта расплющивает, словно в «железной деве». Аспирант успевает отправить последнее слово: «ПЛОХО». Получается «ДЕЛА ИДУТ ДОСТАТОЧНО ПЛОХО».

Он приближается к центру, и силы все возрастают. Аспиранта так растягивает от головы до пят и сдавливает с боков, что он словно превращается в макаронину. Это явление называется «*спагеттификация*». Да, это самый настоящий научный термин, которым астрономы именуют такой процесс! В конце концов аспиранта раздавит и разорвет, и его останки упокоятся в центре черной дыры. Теперь эта центральная масса весит как 3 миллиарда Солнц и еще чуточку! Радиус Шварцшильда немного расширяется. Сигнал «ИДУТ» все еще пробивается к профессору. Сигнал «ДОСТАТОЧНО» никуда не двигается с радиуса Шварцшильда. Сигнал «ПЛОХО» летит наружу со скоростью света, но он похож на ребенка, бегущего вверх по нисходящему эскалатору: как ни старается ребенок, его все равно тянет вниз. Сигнал, конечно, стремится к краю дыры, но его затягивает к центру, где сигнал расплющивается и также оказывается в сингулярности.

Наконец, спустя значительное время, профессор наконец-то получает сигнал «ИДУТ». Он принял информацию «ДЕЛА И-Д-У-Т». Он никогда не получит остаток сообщения «ДОСТАТОЧНО ПЛОХО». Слово «ДОСТАТОЧНО» застряло на радиусе Шварцшильда, а слово «ПЛОХО» черная дыра затянула в точечную центральную сингулярность, и аспиранта туда же. «ПЛОХО» – это описание события, которое произошло в пределах радиуса Шварцшильда. Сигнал так и не добирается до профессора, и профессор никогда не узнает, что происходит внутри этого радиуса. Профессор не в состоянии увидеть ни одного события, происходящего за радиусом Шварцшильда, поэтому сфера с таким радиусом называется «*горизонт событий*». Это граница той части пространства, где происходят события, заметные профессору. Горизонт событий для профессора попросту непроницаем. Аналогично, на Земле мы не можем заглянуть за линию горизонта: эта линия – предел поля видимости. Любой наблюдатель, находящийся за пределами горизонта событий черной дыры, никогда не

увидит событий, происходящих внутри этого горизонта.

Если профессор заинтересуется, что произошло с бедным аспирантом, он может заглушить двигатели ракеты, державшие его на кромке черной дыры, и самостоятельно отправиться в свободное падение. Достигнув горизонта событий, он получит застрявший там сигнал «СОВСЕМ». Скатываясь вниз по эскалатору, он заметит, как сигнал «СОВСЕМ» минует его со скоростью света. Свет всегда будет лететь мимо профессора со скоростью 300 000 км/с. Но затем профессор упадет в центр черной дыры и также погибнет.

Если аспирант попадет в черную дыру, которая в 3 миллиарда раз тяжелее Солнца, то, пока он будет падать до центра, где и погибнет, у него на часах пройдет 5,5 часа. К счастью, процесс спагеттификации, с того момента, как приливные силы станут болезненными и в итоге разорвут его на части, займет 0,09 секунды в самом конце пути. По крайней мере, его ждет быстрая смерть.

Возможно, нас также заинтересует, какова искривленная геометрия внешней границы черной дыры. Однажды меня пригласили на передачу «Час новостей с Мак-Нилом и Лерером», так как астрономы, работающие с телескопом «Хаббл», как раз открыли, что в галактике M87 существует черная дыра. Поэтому ведущие хотели, чтобы мы с Кипом Торном объяснили зрителям этот феномен. Я привел небольшой наглядный пример. Если построить плоскость, проходящую через центр черной дыры, то логично предположить, что эта плоскость должна быть ровной и двумерной как баскетбольная площадка, а радиус Шварцшильда должен ограничивать круг, напоминающий линию штрафного броска. Сингулярность – точка в центре такого круга. Но на самом деле все не так. Плоский сегмент, проходящий через центр черной дыры, на самом деле искривлен. Он похож на раструб, направленный вверх (рис. 20.1). Третье измерение здесь добавлено лишь для того, чтобы вы могли оценить кривизну двумерной воронкообразной поверхности. Третье измерение в данном случае иллюзорно. Забудьте о пространстве над воронкой и под ней, в данном случае реален лишь сам профиль воронки. На больших расстояниях раструб уплощается, поэтому в самом деле начинает походить на ровную баскетбольную площадку. Вдали от дыры кривизна невелика. Чем ближе вы к дыре, тем круче внутренняя поверхность раструба срывается в воронку. На радиусе Шварцшильда склон становится отвесным. Радиус Шварцшильда соответствует самой узкой окружности на поверхности раструба. Вот почему феномен называется «черная *дыра*» – это и есть дыра. На самом деле, в системе координат, изобретенный Карлом

Шварцшильдом, радиальная координата r называется *окружным радиусом* и определяется не как расстояние до центра, а по длине соответствующей окружности, которая должна быть равна $2\pi r$. Окружности принадлежат поверхности воронки. А саму воронку можно рассматривать как последовательность сужающихся окружностей, наименьшая из которых расположено на дне воронки (ее длина равна 2π радиуса Шварцшильда). Радиус Шварцшильда – это радиус окружности, ограничивающей отверстие на дне воронки (не обращайте внимания на круглую основу с рис. 20.1 – она просто поддерживает воронку).

На телетрансляции я воспользовался в качестве наглядного пособия воронкой, напоминающей раструб. Я поставил ее так, чтобы «юбка» оказалась сверху, а узкий конец – снизу (см. рис. 20.1). Астрономы обнаружили, что вокруг черной дыры в галактике M87 с огромной скоростью вращается газ. Чтобы показать, как это происходит, я сбоку бросал бусинки в воронку, чтобы они по спирали медленно скатывались в отверстие, а потом исчезали там. Газ аналогичным образом вращается вокруг дыры, причем чем ближе к дыре молекулы газа, тем быстрее они вращаются. Между молекулами газа возникает трение. Из-за трения газ нагревается и начинает светиться. Это излучение можно наблюдать, поскольку оно возникает вне горизонта событий. При сиянии выделяется энергия, и газ, теряя энергию, соскальзывает в дыру. Именно таков источник сияния квазаров: там светится газ, по спирали сливающийся в массивную черную дыру. Мы видим горячий газ, когда он по спирали несется к горизонту событий, но он исчезает из виду, как только пересекает этот горизонт. Я тренировался все это показывать и уже счел, что демонстрация получилась наглядной (и уже можно снимать новостной сюжет). Затем я все показал дочке, которой тогда было семь, и она предложила: «Почему бы не сбросить туда астронавта»?

Рис. 20.1. Воронка черной дыры. Пространство вокруг черной дыры не плоское, как баскетбольная площадка, а искривлено подобно воронке. На радиусе Шварцшильда воронка становится отвесной. Это место обозначено красной полоской, имеющей длину 2π радиуса Шварцшильда. Астронавт может падать прямо в черную дыру. Когда он достигает радиуса Шварцшильда (красная полоска) – это точка невозврата. Не обращайте внимания на круглую основу, на которой стоит воронка. Также не обращайте внимания на то, что у нашей воронки есть внешняя и внутренняя поверхность; в данном случае реален лишь профиль воронки. Снимок предоставлен Дж. Ричардом Готтом

Она сходила к себе в комнату и вернулась с милым астронавтом «Аполлона» – он был в скафандре, держал в руке американский флаг и был

3 сантиметра длиной. Я и не знал, что у нее есть такая игрушка. Если вы по спирали скатываетесь в черную дыру, как те бусинки, то будете медленно спускаться в нее либо можете упасть прямо в дыру, как наш аспирант. Я положил игрушечного астронавта на край воронки и просто дал ему соскользнуть вниз – и он исчез в дыре. Отлично. Черная дыра – как тот отель, в который можно заселиться, но покинуть его уже невозможно[33]. Астронавт, падающий прямо в черную дыру, летит по искривленной радиальной линии, устремляющейся в воронку (это геодезическая линия). Когда я отпускаю астронавта, он падает в воронку именно по такой линии – моя модель получается очень точной. Когда к тебе заявляется съемочная группа, съемка растягивается на несколько часов, делается множество дублей, но на государственном телеканале все это сокращается до небольшого сюжета. Телевизионщики засняли все тщательно продемонстрированные примеры с катящимися бусинами, но, как вы думаете, – что попало в эфир? Естественно, игрушечный астронавт, падающий в воронку. Итак, теперь вы знаете, как черная дыра выглядит снаружи: она напоминает воронку с отверстием в углублении.

Решение, найденное Карлом Шварцшильдом в 1916 году, показало, какова форма этой воронки. Но изобретенная Шварцшильдом хитроумная система координат отказывала на радиусе Шварцшильда. Решение демонстрировало, что происходит извне дыры, но не показывало, что же происходит внутри. Ситуация была такова, как будто у нас есть только карта Северного полушария, а ничего к югу от экватора не видно. Считалось, что у черной дыры есть только внешняя сторона. Наконец, в середине 1960-х годов мой коллега Мартин Крускал с факультета прикладной математики Принстонского университета и Дьёрдь Секереш из Университета Нового Южного Уэльса независимо нашли способ расширить эту координатную систему таким образом, чтобы решение описывало и внутреннюю часть черной дыры. Пространственно-временная схема такого решения ныне называется «*диаграмма Крускала*» (рис. 20.2).

На этой пространственно-временной схеме по горизонтали показано одно пространственное измерение, а по вертикали – время. Будущее находится в верхней части диаграммы. Диаграмма такова, что свет на ней летит по прямым, расположенным под углом 45°. Скорость света постоянна, именно поэтому уклон 45° не изменяется. Давайте проиллюстрируем смысл этих координат, вернувшись к примеру с профессором и его несчастным аспирантом. Для начала проведем черную мировую линию профессора (см. рисунок). Она не прямая, поскольку профессор движется с ускорением: двигатели ракеты постоянно работают,

чтобы корабль удерживался на расстоянии 1,25 радиуса Шварцшильда от черной дыры.

Рис. 20.2. Диаграмма Крускала. Это пространственно-временная схема, демонстрирующая геометрию (невращающейся) черной дыры как в пределах радиуса Шварцшильда, так и вне его. Будущее показано сверху. На схеме изображено искривленное пустое пространство вокруг точечной массы, существовавшей вечно. Наша Вселенная справа. Показаны мировые линии профессора и аспиранта. Профессор остается на безопасном расстоянии от черной дыры (1,25 r_S). Аспирант падает в черную дыру и достигает сингулярности в точке $r = 0$. Горизонт событий (ГС) проходит вдоль линии, где радиус r равен радиусу Шварцшильда ($r = r_S$). Рисунок предоставлен Дж. Ричардом Готтом

Профессор остается за пределами черной дыры. В точке на полпути от верхнего к нижнего краю рисунка мировая линия вертикальна, затем изгибается вправо. В плоском пространстве-времени такая мировая линия могла бы описывать частицу, которая находилась в покое, будучи в центре рисунка, а потом стала двигаться вправо, набирая скорость. Полная мировая линия профессора – это гипербола. Она изгибается, так что в далеком будущем пойдет вверх под углом около 45°, по мере того, как будет стремиться к скорости света. Вспомните принцип эквивалентности: наблюдатель, движущийся с ускорением в плоском пространстве-времени, наблюдает его таким же, каким видит это пространство-время неподвижный наблюдатель (профессор), находящийся в гравитационном поле. Мировая линия профессора на диаграмме Крускала – это гипербола.

Горизонтальная линия, идущая вправо от центральной точки на оси *X*, где две линии пересекаются под углом 45°, – это мгновенный снимок радиального луча, который поднимается из отверстия на дне воронки прямо вверх в конкретный момент времени (другое измерение воронки, окружное, на диаграмме не показано).

Мировая линия аспиранта (обозначенная ЛА) – зеленая. На первых порах, в нижней части диаграммы, аспирант летит вместе с профессором, и их мировые линии также продолжаются бок о бок, пока аспирант не покидает профессора в центральной (по вертикали) точке мировой линии профессора. Аспирант находится в свободном падении: его мировая линия устремляется в черную дыру, а мировая линия профессора продолжается вправо. Горизонт событий (обозначенный «ГС», там же $r = r_S$ – это радиус, равный радиусу Шварцшильда) – это линия, идущая под углом 45°, которая в далеком будущем располагается асимптотически к мировой линии профессора. Она никогда не соприкоснется с мировой линией профессора. Уклон в 45° возникает потому, что луч света (в данном случае – радиоволна) с сигналом «СОВСЕМ» может идти вдоль такой линии. Мировая линия аспиранта пересекает диагональную линию горизонта событий именно в тот момент, когда аспирант посылает сигнал «СОВСЕМ». Профессор так и не получит этот сигнал. Мировая линия профессора на диаграмме соответствует множеству точек, для каждой из которых r = 1,25 радиуса Шварцшильда. Световые (радио) сигналы «ДЕЛА» и «ИДУТ» – это две линии, идущие под углом 45° каждая; сигналы были отправлены еще до того, как аспирант пересек горизонт событий. Два этих сигнала пересекаются с мировой линией профессора. Он

получит эти сигналы. Из диаграммы понятно, почему сигнал «ИДУТ» будет лететь до профессора так долго.

Где точки, расположенные на уровне 0,75 радиуса Шварцшильда? Они выстраиваются вдоль гиперболы, напоминающей улыбку, над диагональной линией горизонта событий. Далеко справа она сверху стремится к линии горизонта событий ГС, но так и не соприкасается с ней. *Сингулярность* в точке $r = 0$ – еще одна гипербола, напоминающая улыбку, лежащая над линией 0,75 радиуса Шварцшильда. Мировая линия аспиранта стыкуется с этой горизонтальной улыбкой. Мы нарисовали на ней зубы, так что получился оскал челюстей, готовых сожрать аспиранта. Пространство-время настолько искривлено, что сингулярность, которая, как могло бы показаться, должна обозначаться вертикальной линией слева, искривлена, пока не уходит в будущее. На самом деле, стоит аспиранту пересечь горизонт событий – и эта линия оказывается у него в будущем. Теперь она для него так же неизбежна, как наступление следующей среды. Как бы ни пытался он разогнать ракету быстрее скорости света, это невозможно, и аспирант вынужден двигаться вверх под углом 45°. После того как аспирант минует горизонт событий, гипербола, соответствующая сингулярности, нависнет над ним и будет простираться более чем на ±45°, так что его мировая линия неизбежно в нее упрется. Он обречен. Аналогично, сигнал «ПЛОХО», отправленный аспирантом вправо под углом 45° уже после пересечения горизонта событий, также попадет в челюсти сингулярности в точке $r = 0$.

Можно завершить диаграмму Крускала, чтобы получилось полное решение для точечной массы. Это массивная точка, возникшая в далеком прошлом, которая будет существовать и в бесконечно отдаленном будущем, когда Вселенная совершенно опустеет. Диагональная линия горизонта событий ГС встречается с другой диагональной линией, идущей во встречном направлении. Посреди диаграммы получается огромная фигура *X*. Этот *X* делит пространство-время на четыре области. Область, где остался профессор – вне черной дыры, – находится справа от *X*. Это наша Вселенная. Над *X* находится внутренняя часть черной дыры, где в будущем (сверху) зияет сингулярность. Под *X* расположена исходная сингулярность, обозначенная $r = 0$, кажется, что прошлое внизу нахмурилось. Слева находится другая Вселенная, похожая на нашу. Между ней и нашей Вселенной – *«кротовая нора»*, расположенная в середине. Если сделать горизонтальный срез через это пространство-время в самой середине, то получится срез конкретного момента во времени. Геометрически кротовая нора напоминает две воронки, перетекающие друг в друга в самой узкой

точке. В дальней правой части воронки видим широкую окружность – это большой радиус, вдали от черной дыры. Влево воронка постепенно сужается, пока не превращается в окружность длиной $2\pi r_S$ на горизонте событий в центре *X*. Затем дыра вновь распахивается и достигает большого радиуса, на левой оконечности *X*. Две воронки стыкуются, образуя кротовую нору. Вдали от дыры воронки постепенно уплощаются и становятся такими же ровными, как баскетбольные площадки, причем они продолжаются до бесконечности. Вообразите себе здание, на втором этаже которого устроена баскетбольная площадка, а в центре площадки просверлена искривленная воронка, ведущая вниз (напоминает лунку на поле для гольфа). Воронка постепенно раскрывается и распахивается так, что на первом этаже (под баскетбольной площадкой) превращается в совершенно ровный потолок. В данном случае баскетбольная площадка – это наша большая Вселенная, а первый этаж – вторая большая Вселенная, сопряженная с нашей через узкую дыру и подобная потолку на первом этаже. Две большие Вселенные соединены кротовой норой в мгновение, обозначенное горизонтальной линией, проведенной через диаграмму. Но через эту кротовую нору невозможно проникнуть из одной Вселенной в другую. Дело в том, что перекладины *X* расположены ровно под углом 45°. Чтобы перейти из области справа от *X* (из нашей Вселенной) в область слева от *X* (в другую Вселенную), нужна мировая линия, отклоненная от вертикали на угол более 45°. То есть нужно двигаться со сверхсветовой скоростью, а это невозможно. Но, в принципе, можно повстречать пришельцев из другой Вселенной внутри черной дыры, в ее верхней четверти (в будущем). Вы могли бы даже пожать друг другу руки. Сказать: «Дружище, мы в беде» – прежде, чем оба погибнете, врезавшись в улыбающуюся сингулярность в будущем. Вы достигнете сингулярности за конечный период времени.

Исходная сингулярность внизу (в прошлом) весьма напоминает сингулярность Большого взрыва, с которой началась наша Вселенная. Эта часть решения называется «*белая дыра*». Она напоминает черную дыру с обратным ходом времени – как если бы события в черной дыре перематывались назад. Частица может возникнуть в сингулярности белой дыры в нижней части диаграммы, и мировая линия этой частицы попадет в нашу Вселенную. Если частица попадет в черную дыру, то может выйти обратно из белой дыры.

Такие черные дыры, которые мы можем обнаружить, существовали не всегда. Есть реалистичная модель, согласно которой черная дыра может образоваться при коллапсе звезды. Предположим, что на пространственно-

временной диаграмме Крускала поверхность коллапсирующей звезды находится прямо под ногами у аспиранта: и когда он еще вместе с профессором, и когда он падает в дыру. Речь о ситуации, когда звезда долгое время сохраняет радиус величиной 1,25 радиуса Шварцшильда, а затем начинает схлопываться в тот самый момент, когда в дыру начинает падать аспирант, – то есть поверхность звезды несется к центру, а вслед за ней падает аспирант. В таком случае мировая линия звезды будет параллельна мировой линии аспиранта и пойдет слева от нее. Под ногами у падающего аспиранта откроются недра звезды, где плотность материи ненулевая и вакуумное решение диаграммы Крускала *неприменимо*. Просто не обращаем внимания на ту часть диаграммы, что оказалась слева от мировой линии аспиранта, – никакой кротовой норы, никакой другой вселенной, никакой сингулярности внизу, которая напоминала бы белую дыру. Они не образуются, когда черная дыра возникает при коллапсе звезды. Но та часть диаграммы, что лежит справа от мировой линии аспиранта, находится в вакууме, и в этой части все происходящее изображено точно. Аспиранта расплющивает, и его мировая линия утыкается в сингулярность в точке $r = 0$.

Если бы вы жили внутри звезды (в комнатке с кондиционером), то и вас бы расплющило, когда звезда схлопнулась бы в нулевой объем и приобрела при этом бесконечную плотность. В будущем ваша мировая линия также неизбежно упрется в сингулярность кривизны: вы уткнетесь в $r = 0$, когда звезда схлопнется до нулевого размера.

Мой вам совет: просто не приближайтесь к радиусу Шварцшильда – и все будет нормально. Можно без проблем вращаться по орбите вокруг горизонта событий черной дыры. Если Солнце сколлапсирует и превратится в черную дыру, то Земля останется вне дыры, на нынешней орбите. Вы увидите черную дыру, которая будет выглядеть как черный диск в небе. Вокруг нее будут искаженные гравитационной линзой звезды, расположенные за дырой (рис. 20.3).

В 1963 году Рой Керр открыл точное решение эйнштейновских уравнений поля для вращающейся черной дыры (такой, что обладает моментом импульса). Такая черная дыра имеет за горизонтом событий более сложную геометрию, которую мы обсудим в главе 21. Но ее горизонт событий – это точка невозврата, точно как и у шварцшильдовской черной дыры. Решение Керра блестяще подтвердилось 14 сентября 2015 года, когда астрономы из лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) зафиксировали образование вращающейся керровской черной дыры в 62 солнечные массы при столкновении двух

черных дыр: одной в 29 солнечных масс, а другой – в 36 солнечных масс. Две эти дыры образовали прочную связку и по спирали устремились друг к другу, теряя энергию в форме гравитационного излучения.

Рис. 20.3. Так могла бы выглядеть шварцшильдовская черная дыра. Она напоминает черный диск в небе, вокруг нее – звезды, контуры которых кажутся искаженными из-за действия гравитационной линзы. Вы видите два изображения Млечного Пути, поскольку свет, попадающий в поле зрения, обходит черную дыру с разных сторон. Иллюстрация предоставлена Andrew Hamilton. Фоновое изображение Млечного Пути обработано на основе иллюстрации Axel Mellinger

Исследуя эту гравитационную рябь в пространстве-времени, астрономы смогли вычислить массы черных дыр, участвовавших в столкновении. Поскольку у двух черных дыр, вращающихся одна вокруг другой, был орбитальный момент импульса, неудивительно, что в центре образовалась вращающаяся черная дыра. Кольцевые колебания этой конечной черной дыры, которая сначала образовалась в движении, а затем успокоилась, в точности соответствовали тем, которые должны возникать при ослабевании пертурбаций керровской черной дыры. Астрономы даже смогли определить, что момент импульса керровской вращающейся черной дыры составил приблизительно 67 % от максимума, возможного для черной дыры с такой массой. Все столкновение, включая образование гравитационных волн, можно смоделировать на суперкомпьютере, решающем эйнштейновские уравнения для вычисления геометрии пространства-времени. Согласованность компьютерной модели и наблюдаемых гравитационных волн показывает, что эйнштейновские уравнения продолжают работать даже в исключительно сильно искривленном пространстве-времени – это очень важный результат.

В 1974 году Стивен Хокинг совершил удивительное открытие, прославившее его: оказывается, черная дыра испускает тепловое излучение. Энергия может вырваться из черной дыры, и действительно вырывается. Как было сделано это открытие? Принстонский аспирант Яаков Бекенштейн беседовал со своим научным руководителем Джоном Арчибальдом Уилером. Уилер был одним из авторов термина «черная дыра». Удачное название! Черные дыры – это дыры, причем черные, ведь они не излучают свет. Как рассказывал Нил, астрономы предпочитают не мудрствовать, именуя объекты: «Оно черное и напоминает дыру – давайте назовем это просто “черная дыра”». Уилер был зачинателем всех исследований, связанных с черными дырами, именно он помог оживить интерес к общей теории относительности в 1960-е годы. Он нашел единомышленников, заинтересованных в работе над этой проблемой, и вместе с Чарльзом Мизнером и Кипом Торном написал классическую книгу, первые редакции которой я штудировал в аспирантуре. Когда Крускал получил свою диаграмму, он отправил ее Уилеру, поинтересовавшись мнением ученого, а сам ушел в отпуск. Уилер прочел статью и нашел ее настолько важной, что подготовил рукопись сам и направил ее в журнал *Physical Review*, указав, что автор работы – Крускал. Вернувшись из отпуска, Крускал узнал, что статья уже ушла в редакцию.

Уилер пригласил своего аспиранта Бекенштейна поговорить. Взяв чашку горячего чая, Уилер налил в нее немного холодной воды и сказал: «Я

только что совершил преступление: повысил энтропию (беспорядок) во Вселенной. И ничего не исправишь: я же не могу вымешать воду обратно из чая». Бекенштейн знал, что энтропия во Вселенной со временем только возрастает. Нечасто увидишь, как осколки самособираются в вазу. На самом деле, когда видишь подобное в кино (эффект достигается обратной перемоткой), становится смешно, поскольку каждый знает, насколько это невероятно. Существует ненулевой шанс, что такое произойдет, но он очень мал. Статистически ожидается, что степень неупорядоченности во Вселенной должна возрастать – этот принцип называется «*второй закон термодинамики*». Мы любим порядок: стыдно раскокать красивую вазу на черепки. Следуя этой логике, предосудительно любое увеличение энтропии, например подмешивание воды в чай. «Но, – продолжал Уилер, – теперь я могу скрыть улики этого преступления, если брошу остывшую смесь чая и воды в черную дыру. Масса черной дыры при этом увеличивается на массу попавших туда чая и воды. Но она увеличилась бы ровно на столько же, если бы я налил в черную дыру воду и чай отдельно. Итак, восстановлен статус-кво, который существовал бы без смешивания воды и чая, – и, по-видимому, второй закон термодинамики в данном случае нарушается. Подумайте об этом!»

Бекенштейн всерьез воспринял идею Уилера и действительно стал ее обдумывать. Статья, которая получилась у него в результате, кажется мне исключительно важной. Бекенштейн отметил, что Хокинг доказал теорему, согласно которой общая площадь всех горизонтов событий во Вселенной со временем возрастает, если плотность массы повсюду остается неотрицательной, – и это казалось логичным. Когда в черную дыру поступает новая масса, масса черной дыры увеличивается, равно как и ее радиус Шварцшильда. Поверхностная площадь горизонта событий, равная $4\pi r_S^2$, также возрастает. При столкновении двух черных дыр (как в случае, зафиксированном LIGO) возникает новая черная дыра с горизонтом событий, общая площадь которого больше, чем сумма площадей горизонтов событий двух исходных черных дыр. Так, согласно расчетам, проведенным в случае LIGO, площадь горизонта событий получившейся при столкновении вращающейся черной дыры (в 62 солнечные массы) как минимум в 1,5 раза больше, чем сумма площадей горизонтов событий двух исходных черных дыр (в 29 и 36 солнечных масс). С точки зрения Бекенштейна, такой феномен постоянного возрастания площадей горизонтов событий со временем напоминал проявление энтропии, которая, как известно, со временем также лишь возрастает.

Бекенштейн сформулировал мысленный эксперимент: как можно осторожнее (практически чтобы можно было отдернуть) опускаем частицу на струнке в шварцшильдовскую черную дыру и считаем, насколько при этом возросла площадь дыры. Бекенштейн вычислил, что такой акт соответствует потере одного бита информации, а именно информации о том, существовала эта частица или нет. Поскольку потеря информации в контексте данного мысленного эксперимента соответствует минимальному увеличению площади – порядка $(1{,}6 \times 10^{-33}\ \text{см})^2 = hG/2\pi c^3$ (все члены формулы нам до боли знакомы: вот постоянная Планка h, вот постоянная Ньютона G, а вот скорость света c). О расстоянии порядка $1{,}6 \times 10^{-33}$ см, именуемом *планковской длиной*, мы вновь поговорим в главе 24. При таких масштабах геометрия пространства-времени становится нечеткой в силу квантово-механического принципа неопределенности Гейзенберга. Когда Уилер бросал в черную дыру свою чашку с остывшим чаем, он повысил площадь горизонта и энтропию этой дыры. Общая энтропия Вселенной при этом все равно возросла, поскольку увеличилась энтропия черной дыры, как только в нее упала чашка. Бекенштейн заключил, что черные дыры обладают очень большой, но конечной энтропией.

Интересно, что работа Бекенштейна демонстрирует, каков предельный объем информации, которую можно сохранить на 6-дюймовом жестком диске. Это 10^{68} бит = $1{,}16 \times 10^{58}$ гигабайт. Если вы попытаетесь записать на жесткий диск такого размера еще больше информации, он станет настолько массивным, что схлопнется в черную дыру (этот случай будет подробно рассмотрен в приложении 2). Кроме того, аргументация Бекенштейна ограничивает и количество информации, которую можно вместить в наблюдаемой части Вселенной и, следовательно, сколько может существовать различных вселенных с такими размерами и такой энергией, как у нашей. Речь о числе 10^(10^124) – Нил упоминал его в главе 1. Итак, статья Бекенштейна нашла разнообразное применение.

Но Хокинг (в отличие от меня) считал, что Бекенштейн ошибается. Если в черную дыру умещается конечный объем энергии и при этом ее энтропия увеличивается на конечную величину, та же самая термодинамическая аргументация предполагает, что у черной дыры должна быть конечная температура. Хокинг был убежден, что здесь кроется ошибка. Черные дыры не светятся, как светился бы объект с конечной температурой. Черные дыры черные – их температура нулевая.

Роджер Пенроуз показал, что в случае вращающейся черной дыры частица может распасться на две другие частицы в области пространства

непосредственно снаружи от горизонта событий и одна из частиц может упасть в черную дыру, вращаясь в противоположном направлении относительно вращения черной дыры, и общий момент импульса дыры в таком случае снижался бы, тогда как вторая частица улетела бы от черной дыры с большей энергией, чем была у исходной частицы. Часть массы вращающейся черной дыры приходится на энергию вращения, и постепенно черная дыра вращается все медленнее, так что ее масса становится меньше, чем ранее. Снижение вращательной энергии черной дыры позволяет высвободить ту энергию, которая необходима второй частице, образовавшейся при распаде, чтобы улететь от черной дыры. При этом площадь горизонта событий вращающейся черной дыры немного увеличивается. Димитриос Христодулу, еще один ученик Уилера, исследовал эти вопросы, проверяя, какова предельная энергия, которую можно извлечь из вращающейся черной дыры. Яков Зельдович в СССР применил эту идею при исследовании электромагнитных волн. Он сформулировал эвристический аргумент: электромагнитную волну, пролетающую мимо вращающейся черной дыры, можно усилить, придав ей дополнительную энергию, – как пенроузовской ускользающей частице. Процесс напоминал вынужденное излучение – эффект лазера, открытый Эйнштейном. Если следовать такой логике, то из вращающейся черной дыры также должно литься некое спонтанное излучение: дыра постепенно теряет энергию вращения и испускает электромагнитные волны. Алексей Старобинский рассчитал такие эффекты для волн, расходящихся от вращающейся керровской черной дыры.

По воспоминаниям Дона Пейджа[34], ученика Хокинга, Хокинг хотел подобрать для этих идей более солидное обоснование. Хокинг взялся применить квантовую механику к искривленному пространству-времени, чтобы рассчитать рождение и аннигиляцию частиц в искривленном шварцшильдовском пространстве-времени и проверить, на самом ли деле невращающаяся черная дыра испускает какое-либо излучение. Сам немало удивившись, Хокинг обнаружил, что эти частицы действительно рождаются – от черной дыры исходит тепловое излучение. Оказывается, черная дыра обладает конечной температурой! Хокинг опирался на следующий факт: в вакууме все время рождаются пары частиц, которые сразу же сталкиваются друг с другом и аннигилируют. Это называется «*виртуальные пары*». Такие частицы всегда возникают и сразу же исчезают. Согласно квантово-механическому принципу неопределенности Гейзенберга, энергия системы характеризуется значительной неопределенностью в течение достаточно кратких промежутков времени.

Следовательно, энергию, необходимую для рождения электрона и позитрона (нам понадобятся обе частицы; ведь общий электрический заряд обязательно должен сохраняться), можно ненадолго «позаимствовать» прямо из вакуума. Таким образом, парные частицы электрон и позитрон могут родиться рядом друг с другом из вакуума, затем столкнуться и аннигилировать спустя краткий период (порядка 3×10^{-22} секунд). Но в случае с черной дырой электрон может родиться чуть-чуть под горизонтом событий, а позитрон – слегка за пределами горизонта событий. Электрон, рожденный в пределах горизонта событий, не может вырваться оттуда и аннигилировать с позитроном, оставшимся снаружи. Электрон падает в черную дыру, а позитрон улетает. Электрон, родившийся за горизонтом событий, обладает гравитационной потенциальной энергией, которая отрицательна по знаку и больше по величине, чем энергия массы покоя электрона, рассчитываемая по формуле $E = mc2$. То есть суммарная энергия меньше нуля, и когда такой электрон падает в черную дыру, он крадет у нее часть ее энергии и, следовательно, массы. Это количество идет на образование массы и энергии излученного позитрона. Вокруг черной дыры со слегка отрицательной плотностью энергии существует квантовое состояние вакуума (ныне именуемое *вакуум Хартла – Хокинга*), нарушающее посылку о положительности энергии, лежащую в основе хокинговской теоремы об увеличении площади. В данном случае, когда позитрон улетает от черной дыры, площадь горизонта событий немного уменьшается. В альтернативном случае в черной дыре может сгинуть позитрон, а электрон при этом улетит. Такой же эффект возможен с парными фотонами, когда один фотон, родившийся под самым горизонтом событий, падает в черную дыру, а другой, родившийся вне его, – улетает. Хокинг обнаружил, что черные дыры испускают тепловое излучение (которое теперь называется *излучение Хокинга*). В ходе такого процесса черные дыры скукоживаются и в конце концов испаряются. Такое тепловое излучение обладает характерной длиной волны ($\lambda_{макс}$) примерно вдвое больше шварцшильдовского радиуса черной дыры. Таким образом, черная дыра в 10 солнечных масс испускает 75-километровые радиоволны – слишком слабые, чтобы их можно было зафиксировать. Температура этого теплового излучения очень низкая – 6×10^{-9} К (к нему в минимальном количестве подмешаны электроны и позитроны). Вот почему Стивен Хокинг до сих пор не получил Нобелевскую премию. Если бы это излучение оказалось достаточно сильным, чтобы его можно было зафиксировать уже сегодня, то он наверняка отправился бы в Стокгольм.

Думаю, никто не сомневается в существовании этого излучения; но, по прогнозам, оно должно быть чрезвычайно слабым. На самом деле, черные дыры (сравнимые по массе со звездами или более крупные) поглощают больше реликтового излучения (РИ), чем испускают собственного. Лишь в далеком будущем реликтовое излучение достаточно остынет и сместится в красную сторону спектра настолько, чтобы процесс испарения черных дыр набрал ход.

На испарение черной дыры требуется много времени. Черная дыра в 3×10^9 солнечных масс, подобная той, что находится в центре галактики M87, в настоящее время испускает тепловое излучение с температурой около 2×10^{-17} K – в основном в виде фотонов и гравитонов. По расчетам Дона Пейджа, черная дыра в 3 × 109 солнечных масс должна испариться за 3×10^{95} лет. Сегодня она активнее впитывает реликтовое излучение, чем сама испускает хокинговское. В сущности, черная дыра не начнет терять массу до тех пор, пока температура реликтового излучения не упадет до 2×10^{-17} K. Это должно произойти примерно через 700 миллиардов лет. Наконец, в результате долгого испарения черная дыра уменьшится до размера 10^{-33} см и исчезнет в виде всплеска исключительно высокоэнергетических гамма-лучей. Считается, что информация, которая теряется при формировании черной дыры, рано или поздно вытекает из черной дыры в виде хокинговского излучения, но в скремблированной (неупорядоченной) форме.

Подробности того, как именно такое испарение сказывается на недрах черной дыры, по-прежнему активно обсуждаются. Некоторые физики считают, что античастицы (или частицы), рождающиеся прямо под горизонтом событий и парные хокинговским частицам (или античастицам), излучаемым с внешней стороны горизонта, могут образовывать *файервол* – стену из горячих фотонов, расположенную непосредственно перед горизонтом событий, – в ней и сгорит падающий астронавт. Возможно, этот эффект становится существенным лишь после того, как в черной дыре испарится примерно половина массы, – а это произойдет только в отдаленном будущем. Детали зависят от свойств квантового состояния вакуума, возникающего вокруг черной дыры.

Джеймс Хартл и Хокинг обнаружили квантовое состояние, которое не приводило к вспышке на горизонте событий и «пропускало» падающего астронавта в глубины черной дыры. Когда из вакуума рождаются частица и античастица (например, электрон и позитрон), их квантовые состояния запутанны. Две эти частицы обладают взаимно противоположным спином

и моментом импульса. Если измерить спин одной из них в конкретном направлении, то сразу же известно, что спин второй в этом же направлении будет противоположен. Эта закономерность сохраняется, даже если частицы находятся очень далеко друг от друга. Данный эффект озадачивал Эйнштейна, он называл его «жутким дальнодействием». Для него это был один из проблемных аспектов квантовой механики. В недавно опубликованной работе Хуан Малдасена и Леонард Сасскинд – двое ведущих современных специалистов в этой сфере – отстаивают мнение, что, благодаря квантовой запутанности между излучаемыми частицами и их партнерами, остающимися за горизонтом событий, астронавт может падать в черную дыру, ничуть не разогреваясь, точно как и предполагали Хартл и Хокинг. Малдасена и Сасскинд считают, что частица и античастица в данном случае соединены крошечной микроскопичской кротовой норой. В принципе, они соприкасаются через кротовину, хотя расстояние в обычном пространстве между ними велико. Кротовая нора напоминает отверстие в столешнице, через которое муравей может переползти с верхней стороны столешницы на нижнюю. Если двигаться по плоскости стола, расстояние между двумя «устьями» норы действительно велико. Муравью пришлось бы ползти и ползти от верхнего до нижнего устья кротовой норы. Сначала ему пришлось бы доползти по столешнице до края стола, затем повернуть и ползти по нижней стороне столешницы, пока, наконец, он не добрался бы до второго устья. Муравей, который бы двигался таким образом, счел бы, что от одного устья до другого долгий путь, а другой муравей, который бы проскочил прямо через кротовину, подумал бы, что два устья расположены довольно близко. Таким образом решается эйнштейновская проблема «жуткого дальнодействия». Частица и античастица всегда близки друг к другу, так как сообщаются через кротовую нору. Интересно, что Уилер уже отмечал: линии электрического поля, сходящиеся у устья кротовой норы, могут выглядеть как электрон (на нижней части столешницы), но, появляясь из верхнего устья, такая частица выглядит уже как позитрон. Следовательно, считал он, частицы и античастицы могут сообщаться через кротовины, например, как в черной дыре, которую мы видели на диаграмме Крускала; эта черная дыра соединяет две Вселенные (и в данном случае называется «*мост Эйнштейна – Розена*»). Эйнштейн написал статью о жутком дальнодействии в соавторстве с Натаном Розеном и Борисом Подольским. Следовательно, считают Малдасена и Сасскинд, парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена о «жутком дальнодействии» разрешим при помощи микроскопического моста Эйнштейна – Розена! Удивительно, что

Эйнштейн и Розен (а также кто бы то ни было еще) упустили эту связь! Если эта картина верна, то аспирант, по-видимому, уцелеет при пересечении горизонта событий, как изначально и предполагал Хокинг. Вот пример, демонстрирующий, какие глубокие взаимосвязи вскрыла работа Хокинга.

Помню, как я был воодушевлен, когда Хокинг прибыл к нам в Калтех, чтобы рассказать об открытии: черные дыры могут испаряться. Хокинга представил нам Кип Торн, один из крупнейших в мире специалистов по черным дырам. В аудитории присутствовал нобелевский лауреат Мюррей Гелл-Манн. Торн заверил нас, что по значимости это исследование тянет на революционное. Согласен – это один из важнейших результатов общей теории относительности со времен Эйнштейна. Все вы слышали о Стивене Хокинге, и именно это исследование принесло ему мировую славу. Некоторые из этих захватывающих событий показаны в фильме «Теория всего» (2014 год). Эдди Редмейн получил «Оскар» за то, как убедительно и точно сыграл в этом фильме Хокинга.

Глава 21
Космические струны, кротовые норы и путешествия во времени

Автор: Дж. Ричард Готт

С тех пор как я исследую проблему путешествий во времени в рамках общей теории относительности, соседские дети думают, что у меня в гараже стоит машина времени. Однажды я побывал в Калифорнии на конференции по космологии и явился туда в бирюзовой спортивной куртке. Мой коллега Роберт Киршнер, в ту пору возглавлявший астрономический факультет в Гарварде, подошел и сказал: «Рич, ты, должно быть, купил эту куртку в будущем и привез сюда, ведь такого цвета еще не изобрели!» С тех пор я называю ее «куртка из будущего» и всегда прихожу в ней читать лекции о путешествиях во времени.

Обычно я вхожу на такую лекцию в этой бирюзовой куртке и несу коричневый брифкейс. Кладу брифкейс в шкафчик и поспешно выхожу. Затем возвращаюсь в футболке. Объясняю собравшимся, что у меня назначена другая встреча, и я договорился, чтобы эту лекцию прочитал вместо меня приглашенный оратор, затем выхожу снова. Снова возвращаюсь, уже в бирюзовой куртке, и говорю всем, что это «куртка из будущего». Объясняю, что не мог прочесть лекцию, потому что спешил на другую встречу, которая была назначена на то же время, что и лекция; но поскольку у меня есть машина времени, после встречи я смог просто отправиться в будущее, купить там куртку и вернуться сюда – прочесть лекцию, но уже успев немного постареть.

Тут я замечаю, что забыл принести конспект лекции о путешествиях во времени. Что же делать? Поскольку у меня есть машина времени, соображаю я, можно взять конспект уже на следующий день (после лекции) и вернуться сюда, заранее оставить где-нибудь в аудитории брифкейс с конспектом. Осматриваюсь, но нигде их не вижу. Итак, возможно, я их спрятал. Где? Да хоть в этом шкафчике. Открываю шкафчик, нахожу в нем брифкейс, открываю его – ура! Там лежит конспект лекции о путешествиях во времени.

Рассмотрим эти события, проследив их мировые линии на пространственно-временном графике. По оси абсцисс откладывается

пространство, по оси ординат – время, причем будущее находится вверху. Аудитория, в которой я читаю лекцию, – это вертикальная полоса в центре. Вот как выглядит моя мировая линия (рис. 21.1).

Рис. 21.1. Пространственно-временная схема хронопутешествия профессора Готта. Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

На пространственно-временном графике я выхожу из аудитории, при этом на мне белая футболка. Ненадолго возвращаюсь в аудиторию, говорю, что не смогу прочитать лекцию, потому что спешу на встречу. Удаляюсь, успеваю на встречу, а затем лечу в будущее, где покупаю куртку. С этого момента моя мировая линия становится светло-серой. Возвращаюсь, вновь захожу в аудиторию и там читаю лекцию. Когда лекция закончена, мне нужно вернуться в прошлое незадолго до начала лекции, просто чтобы успеть занести брифкейс с конспектом этой лекции. Я войду в аудиторию, а затем быстро выйду, после чего в нее войду я же (чуть младше), в футболке. Далее я продолжу жить строго в направлении будущего. У меня получилась сложная мировая линия.

А что насчет мировой линии брифкейса? Он оказывается у меня в руках, как только я нахожу его в шкафчике. Если я буду просто держать его, то он отправится в хронопутешествие вместе со мной, и я принесу его в аудиторию еще до того, как найду в шкафчике. Мировая линия брифкейса получится кольцевой. Мировая линия брифкейса странная – у нее ни начала, ни конца. У моей мировой линии есть начало (я родился) и конец (я умер), но мировая линия брифкейса – замкнутая петля. Брифкейс в данном случае можно сравнить с частицей-*джинном*. Действительно, она, как и джинн, возникает из ниоткуда.

Брифкейс все время у меня на виду. Он не попадает на фабрику брифкейсов. Физики, исследующие путешествия в прошлое, вынуждены учитывать частицы-джинны, когда рассуждают о квантовых эффектах. Что, если на моем брифкейсе появится небольшая потертость, когда я заберу его с собой с лекции? Игорь Новиков считает, что такой износ, который претерпевает джинн-частица, должен в какой-то момент «исправляться», чтобы она вернулась в исходное состояние, – и мой брифкейс не исключение. При этом не нарушаются законы энтропии, так как брифкейс – это не изолированная система; энергия, необходимая на его починку, поступает извне.

Информация также может выступать в качестве джинна. Допустим, я прилетаю в 1915 год и даю Эйнштейну верные уравнения поля для общей теории относительности. Он может их записать и опубликовать. Откуда взялась эта информация? Я усвоил ее из статьи Эйнштейна, а Эйнштейн узнал ее от меня. Получается кольцевая мировая линия.

Законы физики допускают существование джинн-частиц – просто их возникновение маловероятно, – причем чем массивнее и сложнее такие частицы, тем менее вероятно их возникновение. Аналогичная история

могла бы произойти, если бы я нашел на полу в поточной аудитории клочок бумаги и взял с собой не брифкейс, а этот клочок. В таком случае бумажка стала бы джинном, а носить ее с собой проще, чем брифкейс. Еще проще – я мог бы банально взять электрон и унести его с собой, а затем вернуть в прошлое, в лекционную аудиторию. Просто не столь вероятно найти для этой цели такой массивный объект, как брифкейс, да еще с конспектами к лекции о путешествиях во времени. Думаю, возможны и такие сложные джинны, но возникать они будут исключительно редко.

Путешествие в прошлое происходит при наличии мировой линии, которая закольцовывается в прошлое. Обычная ситуация отражена на рис. 18.1: мировые линии Земли и других планет идут по спирали вдоль мировой линии Солнца. Ничто не может двигаться со сверхсветовой скоростью, и все мировые линии устремлены в будущее. На рис. 21.2 показана ситуация, когда мы путешествуем в прошлое. Мировая линия путешественника замыкается сама на себя, и он становится свидетелем каких-то событий из собственного прошлого. Путешественник начинает путь внизу (в прошлом) и поднимается вверх до тех пор, пока не встречает повзрослевшего себя, который ему говорит: «Привет! Я – это ты в будущем! Прилетел в прошлое поздороваться с тобой». Он отвечает: «Правда?» и отправляется по петле обратно в прошлое. Затем он встречает себя же в юности и говорит: «Привет! Я – это ты в будущем! Прилетел в прошлое поздороваться с тобой». Молодой «двойник» отвечает: «Правда?» Путешественник во времени участвует в этой встрече дважды: как молодой и как более взрослый человек, но сама ситуация складывается лишь однократно. Можно сравнить ее с четырехмерной скульптурой, на которую нанесены мировые линии. Она никогда не меняется: именно так и выглядит вся картина. Если вам интересно, как ощущалась бы подобная ситуация, – просто проведите пальцем по мировой линии и посмотрите, какие еще мировые линии с ней пересекутся.

Здесь открывается один из варантов решения знаменитого *парадокса бабушки*: что бы случилось, если бы я отправился в прошлое и случайно убил собственную бабушку еще до того, как она родит мою мать? В таком случае она не родит мою мать, а мать – меня, и тогда меня не будет, я не смогу отправиться в будущее и убить мою будущую бабушку. Это, в свою очередь, означает, что она без проблем родит мою мать, а мать – меня. Парадокс. Традиционное решение парадокса бабушки таково: путешественники во времени не могут изменить прошлое. Они всегда – часть прошлого. Да, вы могли отправиться в прошлое и выпить в компании бабушки чаю с печеньем, когда она была еще юной девушкой, но не могли

убить ее, поскольку она должна родить вашу мать, которая родит вас. Решение должно быть самосогласованным. Кип Торн, Игорь Новиков и их коллеги сформулировали ряд мысленных экспериментов из области путешествий во времени, сталкивая бильярдные шары; они пытались показать, что всегда можно найти самосогласованные решения, не содержащие парадоксов.

Рис. 21.2. Пространственно-временная схема мировой линии путешественника в прошлое. Иллюстрация адаптирована из J. Richard Gott, Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Не беспокойтесь по поводу изменения истории: как бы вы ни старались, ничего у вас не выйдет. Если вернуться на «Титаник» и предупредить капитана об айсберге, то капитан проигнорирует ваши слова, точно как он не придал значения всем остальным сообщениям об

айсбергах, – ведь мы знаем, что корабль затонет. Вы убедитесь, что изменить ход событий невозможно. Хронопутешествия в фильме «Невероятные приключения Билла и Теда» построены по тому же принципу самосогласованности.

Альтернативный вариант решения парадокса бабушки – это эвереттовская *многомировая теория*квантовой механики. Мнения физиков по поводу этой теории разнятся, но давайте для начала разберемся, как она устроена. В многомировой теории считается, что множество параллельных миров могут сосуществовать, как железнодорожные пути в маневровом парке. Мы видим одну историю, словно наш поезд идет по конкретному пути. События, которые мы наблюдаем, подобны станциям, сменяющим друг друга. Вот Вторая мировая война… вот люди высаживаются на Луне и так далее. Но существует множество параллельных миров. Есть мир, где Вторая мировая война не произошла. Такая теория основана на подходе к квантовой механике как к сумме множества историй, предложенном Ричардом Фейнманом. Фейнман понял, что для расчета вероятности любого исхода того или иного будущего эксперимента нужно учесть все возможные истории, которые могли бы к нему привести. Кому-то кажется, что это просто очередное странное правило расчетов в квантовой механике, но сторонники многомировой модели считают, что все эти истории реальны и взаимодействуют друг с другом. Дэвид Дойч считает, что путешественник во времени может отправиться в прошлое и убить там свою бабушку, когда она была еще юной девушкой. В таком случае возникнет новое ответвление истории: в этом варианте истории будут и живой хронопутешественник, и его мертвая бабушка. Тот путь, где хронопутешественник все-таки родился и его бабушка осталась жива, также продолжает существовать. Путешественник по-прежнему помнит часть своей биографии, свершившейся до поворота на новый путь. Оба пути существуют.

Теперь у нас есть два адекватных решения парадокса бабушки. Первое – консервативное, где пространство-время представлено в виде единой самосогласованной четырехмерной скульптуры, неизменной по сути. Второе – более радикальная многомировая интерпретация квантовой механики. Оба решения работают.

Далее, если вернуться к мировой линии путешественника во времени, которая закольцовывается сама на себя в прошлом, то можно заметить в ней один изъян. Свет на этой схеме летит под углом 45°. Когда хронопутешественник переваливает через вершину, чтобы начать возвращение в прошлое, в какой-то точке уклон его мировой линии

относительно оси времени должен быть больше 45°. Это означает, что в какой-то момент он должен превысить скорость света. На самом деле, переваливая через вершину схемы, он движется с бесконечной скоростью. Феномен взаимосвязи полетов со сверхсветовыми скоростями и путешествий во времени схвачен в следующем лимерике А.Г. Р. Баллера:

Очень шустрая мисс из Дакоты
Говорила: «Эйнштейн – это что-то!
Раз летала я где-то
Выше скорости света
И вернулась за день до отлета!»[35]

Проблема в том, что (как продемонстрировал Эйнштейн в своей специальной теории относительности) невозможно сконструировать ракету, которая развивала бы сверхсветовую скорость. Если ваша скорость не превышает скорости, света, то ваша мировая линия никогда не расположится под углом более 45° относительно оси времени, и вернуться в прошлое не получится. Однако в общей теории относительности Эйнштейна, где пространство-время считается искривленным, можно обогнать луч света, срезав путь, если двинуться либо через кротовую нору, либо (что будет рассмотрено ниже) по космической струне. Если обогнать луч света, то, подобно нашей шустрой мисс, можно улететь в прошлое.

Допустим, у нас есть лист бумаги, на котором одно пространственное измерение откладывается по горизонтали, а время – по вертикали (рис. 21.3). В таком случае ваша мировая линия – это зеленая полоска на данном рисунке. Вы ленивы и просто сидите дома, поэтому ваша мировая линия идет ровно от нижнего до верхнего края листа. Однако в искривленном пространстве-времени действуют иные правила. Давайте свернем лист в цилиндр по горизонтали, склеив сверху лист скотчем. Теперь ваша мировая линия – это круг, уходящий в прошлое.

Вы все время движетесь вперед в будущее, но на самом деле заворачиваете в прошлое. То же самое произошло с экспедицией Магеллана: моряки все время плыли на запад, обогнули всю Землю и вернулись обратно в Европу. Этого бы ни в коем случае не произошло, если бы поверхность Земли была плоской. Аналогично, хронопутешественник все время движется в будущее, но, если пространство достаточно искривлено, он может вернуться к событиям, свершившимся у него в прошлом.

Рис. 21.3. В искривленном пространстве-времени мировая линия может свернуться в кольцо и уйти в прошлое. Иллюстрация адаптирована из J. Richard Gott, Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Такие ситуации допускаются в различных решениях общей теории относительности. Прежде чем перейти к их обсуждению, позвольте рассказать о *космических струнах*. В 1985 году я нашел точное решение эйнштейновских уравнений поля для геометрии, обернутой вокруг космической струны. Александр Виленкин из университета Тафтса нашел

приблизительное решение, а я – точное. Уильям Хискок из университета штата Монтана независимо нашел точно такое же точное решение, так что мы с ним разделили честь этого открытия. Решение позволяет судить, какова геометрия пространства вокруг космической струны.

Но что такое космическая струна? Это тонкая (тоньше атомного ядра) натянутая нить концентрированной квантовой энергии вакуума; такая нить могла сохраниться со времен Большого взрыва. Многие теории из физики частиц прогнозируют существование таких струн. Мы еще не нашли подобных струн, но упорно ищем.

Физики узнали, что вакуум (пустое пространство, где нет ни частиц, ни фотонов) может пропитываться энергией поля, пронизывающего пространство. Такая концепция, например, применима к недавно открытому полю Хиггса и к связанной с ним частице – бозону Хиггса. После того как бозон Хиггса удалось обнаружить на Большом адронном коллайдере, Франсуа Энглер и Питер Хиггс в 2013 году получили Нобелевскую премию по физике за свои теоретические исследования, предвосхитившие эту находку. В главе 23 мы поговорим о том, что, как считается сегодня, в новорожденной Вселенной энергия вакуума была очень велика. После того как из этой энергии вакуума родились обычные частицы, оставшаяся энергия вакуума могла остаться заключена в тонких нитях – космических струнах, отличающихся высокой концентрацией энергии. Представьте себе, как будто целое поле было покрыто снегом, снег растаял, и на поле кое-где остались стоять снеговики. Аналогично, космические струны состоят из энергии вакуума, сохранившейся со времен зарождения Вселенной.

У космических струн нет кончиков; либо они бесконечны, если сама Вселенная не имеет краев, либо они свернуты в замкнутые петли. Представьте себе (бесконечно длинные) макаронины и макаронные колечки. Считается, что в природе могут существовать как бесконечно длинные струны, так и струнные петли. Большая часть массы в сети космических струн приходится на бесконечно длинные струны.

Рассуждая о геометрии пространства вокруг космической струны, следует задать вопрос: как должно выглядеть поперечное сечение через плоскость, перпендикулярную струне? Можно предположить, что оно будет похоже на лист бумаги с точкой посередине – там, где струна проходит через плоскость. Но считается, что космическая струна должна быть очень массивной – примерно миллион миллиардов тонн (10^{15}) на сантиметр; следовательно, она существенно искривляет пространство вокруг себя. Вся структура напоминает не лист бумаги с точкой посреди него, а пиццу, в

которой вырезан один ломтик (рис. 21.4).

Рис. 21.4. Геометрия вокруг космической струны. Иллюстрация адаптирована из J. Richard Gott, Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Берем пиццу и просто убираем из нее один ломтик. Съедаем его. Съели. Все, его нет. Берем остаток пиццы и аккуратно притягиваем друг к другу краешки выреза, так, чтобы они закрыли то пространство, где находился съеденный кусок. Стягиваем их так, чтобы пицца приобрела форму конуса. Именно такова геометрия у поперечного сечения пространства вокруг струны. Пространство напоминает конус. Сама струна проходит через центр пиццы. Коническая геометрия демонстрирует, что

длина окружности не равна 2π радиуса пиццы. Все потому, что в пицце не хватает ломтика, – окружность оказалась бы больше, не будь пицца щербатой. Как видите, она не подчиняется законам евклидовой планиметрии.

Угловая ширина недостающего ломтика пропорциональна массе на единицу длины струны, и для космических струн, которые в самом деле могли образовываться в ранней Вселенной (согласно теориям великого объединения в физике частиц, струны могли возникать в эпоху, когда начало распадаться единство слабого, сильного и электромагнитного взаимодействий), этот угол был довольно мал – может быть, полсекунды дуги или даже меньше. Это очень малая, но тем не менее обнаружимая величина.

На рис. 21.4 струна изображена в центре, и заметно, где был сделан вырез, то есть где склеены два его края. Допустим, я нахожусь на Земле и рассматриваю квазар, расположенный за струной. Свет может долететь до меня по любой из двух этих прямолинейных траекторий (траектория 1 и траектория 2), проходящих по обе стороны от струны. Если склеить края пиццы на месте разреза так, чтобы лист бумаги сложился в конус, то две траектории световых лучей обогнут струну с разных сторон. Световые траектории искривятся под действием гравитационного линзирования. Именно такой эффект возникает, когда луч света пролетает мимо Солнца, мы обсуждали его в главе 19. Но траектории лучей света максимально прямолинейны. Я провел их по линейке. Если склеить «бумажную пиццу» наподобие конуса, то можно было бы провезти игрушечный грузовичок либо по траектории 1, либо по траектории 2 от квазара до Земли, никуда не сворачивая. Обе траектории являются геодезическими. Поскольку два луча света могут лететь по прямолинейным траекториям от квазара до Земли, мы видим две копии квазара по противоположные стороны от космической струны. Можно искать космические струны, высматривая в небе пары квазаров, так, чтобы два квазара располагались один напротив другого, словно пуговицы на мундире. Мы пока не нашли квазаров, линзированных под действием космической струны, но продолжаем искать.

Одно из замечательных свойств этой картины заключается в том, что длина двух световых траекторий может отличаться. Так, на рис. 21.4 траектория 2 немного короче траектории 1. То есть если я полечу на ракете от квазара к Земле на скорости 99,9999999999 % от скорости света, то смогу обогнать луч света, летящий по траектории 1, так как ему придется преодолеть большее расстояние. Я срежу путь и приду первым!

Хотя мы еще не видели космических струн, нам уже доводилось

наблюдать подобное гравитационное линзирование в случае с галактикой, расположенной между нами и квазаром. Мы видим одинаковые копии далекого квазара QSO 0957+561 по обе стороны от линзирующей его галактики. Из-за искривления пространства-времени под действием этой галактики свет изгибается точно таким же образом, как и в случае космической струны. В таком случае яркость далекого квазара варьируется. Группе астрономов под руководством Эда Тёрнера, в состав которой также входили Томислав Кундич, Уэс Колли и я, удалось измерить в обеих «копиях» квазара один и тот же выброс, который был зафиксирован в одной копии с запаздыванием на 417 дней по сравнению с другой. Это малая толика того периода, за который свет этого квазара долетает до нас, – 8,9 миллиарда лет! Но если вам интересно, можно ли путешествовать быстрее света, то в данном случае ответ утвердительный: можно! Один луч света приходит на 417 дней раньше другого. Оба луча летели в вакууме с одинаковой скоростью, просто один из них срезал путь.

Итак, изучение квазаров-«близнецов» – один из способов поиска космических струн. До сих пор все известные случаи такого рода объясняются галактическим линзированием, но мы и ожидаем, что квазары, линзированные космическими струнами, должны встречаться реже, так что здесь нет ничего удивительного. Поиски продолжаются.

Космические струны натянуты и обычно вибрируют со скоростями примерно вдвое меньше скорости света. Точно как два луча света изгибаются навстречу друг другу, проходя по разные стороны от космической струны, так и два космических корабля, находящихся в состоянии покоя, можно подтянуть друг к другу, когда между ними стремительно движется космическая струна. Когда струна проходит между ними, они, набирая скорость, несутся друг к другу. Теперь допустим, что один из этих кораблей – Земля, а другой – реликтовое излучение (РИ). Двигающаяся струна дает небольшое доплеровское смещение в спектре расположенного за ней РИ. Если струна движется между РИ и нами слева направо, то РИ кажется чуть теплее слева от струны, чем справа. Мы ищем подобные эффекты. Колеблющиеся замкнутые струны, похожие на вибрирующие резиновые жгуты, могут давать гравитационные волны, и в будущем мы их также планируем искать при помощи аппаратов типа LIGO. Следовательно, есть ряд перспективных способов поиска космических струн.

Как можно было бы воспользоваться таким эффектом «срезания пути», который обеспечивает космическая струна? В 1991 году я нашел точное решение уравнений поля Эйнштейна в рамках общей теории

относительности для двух движущихся космических струн. В этом решении две параллельные космические струны движутся одна мимо другой, как мачты двух шхун, плывущих ночью встречными курсами. Вертикальная струна 1 движется слева направо, а вертикальная струна 2 движется справа налево. Как должна выглядеть геометрия пространства вокруг двух этих струн?

Неудивительно, что на этот раз в пицце не хватает двух ломтиков. Поперечное сечение, перпендикулярное двум космическим струнам, напоминает лист бумаги с двумя вырезами, и из него можно сложить бумажный кораблик (рис. 21.5). Когда бумага разложена на столе, мы видим, где недостает двух кусков. Один начинается на струне 1 и продолжается вверх по странице, а второй начинается на струне 2 и продолжается вниз по странице. (Две струны вытянуты по направлению к вам, перпендикулярно странице.) Теперь можно срезать путь двумя способами. Если стартовать с планеты А на этом рисунке, то можно попасть на планету В по прямолинейной траектории, пролегающей между космическими струнами, она обозначена «Путь 2». Но есть и более короткий путь, который позволит вам добраться на планету В быстрее, это путь вокруг космической струны 1. Аналогично, другой сокращенный путь – путь 3 – позволяет вернуться с планеты В на планету А быстрее, чем по пути 2. Если стартовать с планеты А и отправиться на планету В на скорости 99,9999999 % от скорости света, то можно обогнать тот луч света, что летит непосредственно к планете В по пути 2. Путь 1 короче пути 2, поскольку не хватает одного «ломтика пиццы». Таким образом, можно отчалить от планеты А уже после того, как с нее по пути 2 улетит луч света, и прибыть на планету В раньше этого луча. Отправление с планеты А и прибытие на планету В – это два события, которые пространственноподобно разделены по пути 2; между ними в пространстве насчитывается больше световых лет, чем во времени – календарных лет. Вы обгоняете луч света и поэтому фактически движетесь со сверхсветовой скоростью, поскольку срезаете путь. Таким образом, некоторый наблюдатель, стремительно летящий влево, – назовем его Космо – сочтет два этих события одновременными. Поскольку его скорость меньше скорости света, он шинкует пространство-время под наклоном, как будто режет французский хлеб, и считает, что вы стартуете с планеты А и прибываете на планету В одновременно.

Теперь предположим, что в верхней части решения у нас будет стремительное движение вправо, которое захватывает и космическую струну 1, и Космо заодно с ней. Теперь струна 1 не стационарна, а быстро

движется, и поскольку движение относительно, Космо больше не летит влево, а неподвижно застыл в центре. Космо смотрит на свои часы и видит, как вы в 12:00 улетаете с планеты А и в 12:00 прибываете на планету В. Если такой трюк вышел у нас однажды – выйдет и повторно.

Рис. 21.5. Геометрия пространства вокруг двух космических струн.

Иллюстрация адаптирована из J. Richard Gott, Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Быстро промотайте нижнюю часть решения влево, чтобы ровно с такой высокой (субсветовой) скоростью у нас двигалась струна 2. Можно улететь с планеты B и срезать путь по траектории 3, обогнав таким образом луч света, летящий к планете A по пути 2. Между вашим отбытием с планеты A и прибытием на планету B будет больше световых лет в пространстве, чем календарных лет во времени. Если нижняя часть решения движется достаточно быстро (но все-таки медленнее света), то, с точки зрения Космо, струна 2 движется практически со скоростью света и, с точки зрения Космо, вы одновременно улетите с планеты B и прибудете на планету A. Итак, если (по его часам) вы улетите с планеты B в 12:00, то и ваше возвращение на планету A он зафиксирует в 12:00. Но вы улетели с планеты A в 12:00 по времени Космо. Вы улетаете с планеты A и возвращаетесь на нее, оставаясь в одном и том же месте в одно и то же время. Вы можете вернуться во времени и пожать руку себе же, более молодому! Вы слетали к одному из событий в вашем прошлом. Да, это настоящее путешествие в прошлое.

Вот как эта ситуация выглядит для вас. Вы прибываете в космопорт на планете A. Там вас встречает ваш двойник, старше вас, и говорит: «Привет! А я уже однажды летал вокруг струн!» Вы отвечаете: «Серьезно?». Затем вы на вашем корабле отправляетесь вокруг струны 1 и прибываете на планету B по пути 1. После этого вы сразу же улетаете с планеты B, летите вокруг струны 2 и прибываете обратно на планету A в то самое время, когда вам предстоит встретить себя же, более молодого. Говорите: «Привет! А я уже однажды летал вокруг струн!» И он вам отвечает: «Серьезно?»

Нарушает ли каким-то образом такая встреча с молодым «собой» закон сохранения энергии? Все-таки сначала вы существовали в одном экземпляре, а при этой встрече вас очевидно двое. Нет, поскольку общая теория относительности требует лишь локального сохранения энергии. Таким образом, масса-энергия в комнате может возрасти, лишь если в эту комнату извне поступит новая масса-энергия. Но вы, путешествуя во времени, входите в комнату как кто угодно другой. Масса-энергия возрастает, поскольку вы входите. Итак, локальное сохранение энергии в этих решениях соблюдается.

Важно, что две струны, проходя одна мимо другой, движутся в противоположных направлениях. В таком случае вам просто нужен космический корабль, который сможет полететь вокруг двух этих струн, – и

вы сможете вернуться туда, откуда отправились. Майкл Лемоник написал для журнала *Time*статью о моей машине времени; в ней он поместил картинку, на которой я держу две струны и модельку космического корабля.

Курт Катлер из Калтеха открыл очень интересное свойство моего решения для двух струн. Была эпоха, до наступления которой никаких путешествий в прошлое не происходило. Когда в далеком прошлом две струны находились очень далеко друг от друга, на их облет уходило очень много времени, и после старта вы всегда возвращались домой на планету А. Но когда струны достаточно сближаются, просто проходят одна мимо другой, вы можете облететь эти струны и вернуться в собственное прошлое. Такое событие происходит в области хронопутешествия. На рис. 21.6 смоделирована его трехмерная пространственно-временная схема.

Рис. 21.6. Пространственно-временная схема машины времени, использующей свойства двух космических струн. Иллюстрация адаптирована из J. Richard Gott, Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Время показано по вертикали, а два пространственных измерения изображены по горизонтали, в перспективе. Поскольку струна 1 движется вправо, ее мировая линия – это прямая, отклоненная вправо. Струна 2

движется влево, и ее мировая линия – прямая, отклоненная влево. Также показана мировая линия хронопутешественника. Он движется медленно, поэтому его прямая линия почти вертикальна – до тех самых пор, пока он не прибудет на планету А. Затем вы видите, как он улетает в полдень, огибает две струны и прибывает обратно в полдень. Приветствует себя же, более молодого. Затем проживает остаток жизни, и его мировая линия вновь почти вертикальна. Катлер обнаружил, что область путешествий во времени ограничена поверхностью, именуемой *горизонт Коши*; она выглядит как два абажура, один из которых поставлен на другой вверх ногами. Обратите внимание: хронопутешественник, приближающийся к планете А, начал путь в далеком прошлом, там, где путешествия во времени были невозможны. Затем он пересекает горизонт Коши, где начинается путешествие во времени. После этого он может видеть других хронопутешественников, прибывающих из будущего. На протяжении какого-то времени хронопутешествия возможны, но затем он пересекает второй горизонт Коши, после которого такая возможность исчезает. После этого он уже не в состоянии встретить хронопутешественников из будущего. К этому моменту две космические струны будут настолько удалены друг от друга, что хронопутешественник не сможет более их огибать и возвращаться к тому моменту, с которого начал путь.

Вот и ответ на знаменитый вопрос Стивена Хокинга: «Где же все путешественники во времени?» Если путешествия во времени возможны, то почему при знаменитых исторических событиях не толпятся «туристы-хронолетчики» из будущего? Почему мы не наблюдаем на пленке, где запечатлено убийство Кеннеди, пришельцев из далекого будущего с видеокамерами, в серебристых скафандрах? Дело в том, что, создавая машину времени, которая способна переносить пилота в будущее, искривляя пространство-время, мы создаем горизонт Коши, и только преодолев этот горизонт, можно увидеть пришельцев из будущего. Но эти путешественники не могут вернуться назад в те времена, когда машины времени еще не существовало. Если сконструировать машину времени в 3000 году, то ею можно будет пользоваться и, в принципе, на ней можно будет слетать из 3002-го в 3001 год, но забраться в прошлое до 3000 года она не позволит, поскольку именно в 3000 году была сконструирована первая машина времени. Мы до сих пор не видели таких хронопутешественников, поскольку пока еще не создали таких машин времени! Это справедливо и для машин времени, при работе которых используются кротовые норы, а также для варп-двигателей, о которых мы вскоре поговорим. Но это означает, что даже если мы прочешем прошлое и

не найдем там пришельцев из будущего, мы все равно можем когда-нибудь пересечь горизонт Коши и обнаружить, что вокруг вдруг начинают появляться такие хронопутешественники.

Предполагается, что космические струны могут быть как бесконечными (о которых мы сейчас рассуждаем), так и замкнутыми в петли. Причем, поскольку космические струны натянуты, следует ожидать, что они должны колебаться со скоростями примерно в половину скорости света. Но на практике нам вряд ли повезет найти две бесконечные космические струны, проходящие одна мимо другой как раз с такой скоростью, при которой они сгодятся для создания машины времени. Космические струны, предусматриваемые теориями великого объединения, должны двигаться со скоростями не менее 99,99999999996 % от скорости света (это субсветовая, очень высокая скорость) – только в таком случае из них может получиться машина времени. Однако всегда можно найти струну, замкнутую в петлю, и гравитационно управлять ею (при помощи массивных космических кораблей) так, чтобы она сильно сжималась под действием собственного натяжения. Струнная петля напоминает резиновый жгут. Прогоняя мимо нее массивные космические корабли, можно оперировать ею так, чтобы два очень длинных и прямолинейных отрезка этой струны, колеблясь, проходили один мимо другого с достаточной скоростью, нужной для создания машины времени. Мне удалось продемонстрировать (в статье о машине времени на базе космических струн, опубликованной в журнале *Physical Review Letters* в 1991 году), что струнная петля в таком случае оказывается как раз на грани схлопывания в черную дыру, которая будет образовываться вокруг нее. Это нехорошо!

Я показал, что область, допускающая путешествия во времени, вполне может быть заключена внутри черной дыры. Впоследствии мы с Ли Синь Ли обнаружили, что дополнительная масса ракеты, огибающей струны в машине времени, также может спровоцировать образование черной дыры вокруг вас.

У струнной петли должно быть два длинных прямолинейных сегмента, проходящих один мимо другого на высокой скорости в противоположных направлениях. Следовательно, петля будет обладать некоторым моментом импульса и, следовательно, при этом будет образовываться именно вращающаяся черная дыра.

Итак, давайте поговорим о вращающихся черных дырах. Как упоминалось в главе 20, точное решение эйнштейновских уравнений поля для вращающейся черной дыры (обладающей моментом импульса) открыл в 1963 году Рой Керр. О том, что происходит в недрах вращающейся

черной дыры, соответствующей такому решению (в пределах горизонта событий), удалось узнать благодаря работе Брэндона Картера. Керровское решение предусматривает два критических радиуса: r_+, соответствующий горизонту событий, и меньший радиус r_-, соответствующий внутреннему *горизонту Коши*.

В центре керровской черной дыры находится не точечная, а *кольцевая сингулярность*. Бесконечная кривизна достигается лишь на этом кольце (на самом деле, это почти бесконечная кривизна, она будет немного «размазываться» под действием квантовых эффектов). Если вы врежетесь в это кольцо, то вас убьют *приливные силы* (описанный в главе 20 эффект, одновременно напоминающий пытку на дыбе и в «железной деве»). Но интересно, что аспирант, упавший во вращающуюся черную дыру, сможет миновать кольцевую сингулярность. Она не блокирует пути в будущее. Аспирант пересекает сперва r_+(горизонт событий), а затем r_- (горизонт Коши). Кольцевая сингулярность находится внутри горизонта Коши, и аспирант может ее увидеть как раз в тот момент, когда будет пересекать горизонт Коши. Если аспирант проскочит через это кольцо как через обруч, то он войдет в совершенно новую большую новую вселенную (Вселенная 1). Картер показал, что если аспирант попадет через кольцо во Вселенную 1 и особым образом обогнет окружность, будучи по ту сторону, то сможет запрыгнуть через это кольцо обратно на нашу сторону к моменту, который предшествовал входу в кольцо. Аспирант сможет совершить небольшой вояж в прошлое и поздороваться со своим чуть более юным «я» – таким, каким он был до первого проникновения через кольцо. Разумеется, никто, находящийся за пределами черной дыры, не увидит ничего из происходящего в черной дыре, поскольку все эти вещи совершаются за горизонтом событий. Когда аспирант входит в пределы горизонта Коши, он попадает в область, где возможны путешествия в прошлое (см. рис. 21.6). Горизонт Коши отмечает начало эпохи, в которой возможны путешествия во времени, и эта эпоха целиком заключена в пределах горизонта событий черной дыры. Аспирант никогда не сможет вернуться в нашу Вселенную и похвастаться перед друзьями своими путешествиями во времени. Далее он сможет отправиться в будущее. На *пространственно-временном графике* таких событий кольцевая сингулярность, с одной стороны, не мешает аспиранту попасть в будущее. Он покидает область, допускающую путешествия во времени, пересекая второй горизонт Коши (опять же, см. рис. 21.6), после которого может вынырнуть еще в одной большой Вселенной, такой как наша (Вселенная 2). Он выходит из так называемой

вращающейся белой дыры во Вселенную 2. Он может там и прожить всю оставшуюся жизнь либо вернуться в черную дыру и отправиться странствовать в новые вселенные, всякий раз оказываясь в будущем. Все это напоминает путь по многоэтажному зданию. Представьте себе, что заходите в лифт на первом этаже – это наша Вселенная. Двери закрываются, и вы отправляетесь вверх – во Вселенную с первого этажа вы больше никогда не вернетесь. Она осталась у вас в прошлом. Двери вновь распахиваются, и вы видите новую вселенную (Вселенная 1). Можете в ней остаться и прожить здесь всю жизнь либо запрыгнуть обратно в лифт и вновь пройти через кольцо. В таком случае вы вновь подниметесь вверх, и двери лифта откроются в следующей Вселенной (Вселенная 2). Можете здесь выйти и прожить всю оставшуюся жизнь либо остаться в лифте и продолжить путь в будущее, вечно глядя, как двери лифта открываются и закрываются на входе в новые Вселенные. Но вам никогда не вернуться на первый этаж, в нашу Вселенную. Керровское решение показывает, что все это действительно происходит во вращающейся черной дыре, которая действительно сформировалась в нашей Вселенной в какой-то момент в прошлом.

Но здесь нужно учесть и некоторые подводные камни.

В главе 20 мы говорили о том, что профессор остается за пределами черной дыры, на безопасном расстоянии от нее. Фотоны, отправленные профессором и падающие в черную дыру, могут быть приняты аспирантом даже после того, как аспирант пересечет горизонт событий. Профессор сможет отправлять аспиранту сообщения вроде «классно сработано» или «продолжай в том же духе – у тебя получится отличная диссертация». Аспирант получит все эти весточки. Между пересечением горизонта событий и горизонта Коши – для аспиранта это два отдельных события, между которыми проходит конечное время, порядка нескольких часов в случае черной дыры, чья масса в несколько миллиардов раз превышает солнечную, – аспирант сможет наблюдать всю бесконечную грядущую историю нашей Вселенной, разворачивающуюся за пределами черной дыры. Новостные заголовки будут долетать до аспиранта все быстрее и быстрее. До пересечения горизонта Коши аспирант, в принципе, получит бесконечное количество новостных сообщений за конечное время – именно так все должно быть в соответствии с керровским решением.

Историкам это понравится. Если аспирант интересовался будущим нашей Вселенной, то он сможет увидеть всю эту бесконечную историю за конечное время. Но это опасно! Такие ускоренные новости будут прилетать в бешеном темпе как поток фотонов с сильным голубым смещением.

Фотоны приобретают голубое смещение, поскольку падают в черную дыру и получают при этом энергию. Все фотоны получают голубое смещение с таким же коэффициентом, с каким ускоряется поток новостей. Высокоэнергетические фотоны такого рода относятся к спектральному диапазону гамма-лучей, и они могут погубить аспиранта. Фотоны приобретут случайно распределенные (стремящиеся к бесконечности) величины синего смещения по мере приближения аспиранта к горизонту Коши, а затем образуют искривленную сингулярность вокруг горизонта Коши, заблокировав путь область, допускающую путешествия во времени, фактически закрыв дорогу в другие вселенные и в будущее.

Но такая сингулярность, расположенная вдоль горизонта Коши, может быть слабой. Согласно расчетам Амоса Ори, приливные силы, вполне возможно, и не разорвут вас. Приливные силы могут возрастать до бесконечности, однако просуществовать лишь в течение исчезающе краткого периода. Аспирант может обнаружить, что тело его не растянулось до бесконечности (не спагеттифицировалось), а лишь удлинилось на дюйм, как после визита к мануальному терапевту. Еще одна неизвестность сопряжена с тем, что горизонт Коши может оказаться нестабильным: флуктуации на нем могут возрастать, выбрасывая часть решения за пределы этого горизонта в новых непредсказуемых направлениях. Один из факторов в пользу аспиранта заключается в том, что мы не знаем законов квантовой гравитации, то есть не знаем, как гравитация действует на микромасштабах. Керровское решение эйнштейновских уравнений общей теории относительности не учитывает квантовых эффектов. Считается, что на микромасштабах квантовые эффекты должны быть важны и под их действием сингулярности должны размазываться. Именно благодаря этим эффектам аспиранту, возможно, удастся проскочить. Но поскольку мы не знаем законов квантовой гравитации, мы не можем знать наверняка, что именно произойдет. Когда у нас будет теория Великого Объединения для физики частиц, нам, возможно, удастся ответить на этот вопрос. Тем временем вращающаяся черная дыра еще скрывает кое-какие секреты. Один из способов их разгадать – прыгнуть прямо в эту дыру!

Теперь вернемся к струнной петле, которая упала в черную дыру и таким образом превратилась в машину времени. Горизонт Коши для путешествий во времени вокруг струн, найденный Катлером, будет совпадать с горизонтом Коши образующейся при этом вращающейся керровской черной дыры. Стоит вам пересечь горизонт Коши – и вот вы уже в области, где возможны хронопутешествия. У нас нет точных

решений для случая со схлопывающейся струнной петлей, которыми можно было бы руководствоваться, но интересно, что в 1999 году Сёрен Хольст и Ханс-Юрген Мачулл нашли точное решение для аналогичного случая с меньшим количеством измерений (плоского), где две частицы (с конической внешней геометрией – точно как у космических струн) на высокой скорости проходят одна мимо другой в искривленном пространстве-времени и порождают машину времени, запертую во вращающейся черной дыре!

Говоря о случае со струнными петлями, нужно рассмотреть несколько потенциальных возможностей. Может быть, удастся обойти по кругу космическую струнную петлю и вернуться назад, обменявшись рукопожатиями со своим более молодым двойником, но при этом вы окажетесь в черной дыре и, следовательно, никогда не сможете вернуться назад и рассказать о своих приключениях. Затем вы можете погибнуть, врезавшись в сингулярность. Если вам по-настоящему повезет, то вы можете вынырнуть в новой Вселенной, однако вернуться к друзьям вы все равно не сможете. Хуже того, вы можете погибнуть от контакта с сингулярностью еще до того, как откроется возможность путешествий во времени. Неизвестно, какой из этих сценариев произойдет в реальности.

Стивен Хокинг доказал, что если горизонт Коши для путешествий во времени возникает в конечной области, а плотность материи никогда не становится отрицательной, то где-то на горизонте Коши должна образоваться сингулярность. В принципе, это теорема, согласно которой сложно сконструировать машину времени из обычной материи у себя в гараже, если лишь слегка искривить пространство-время (не допуская возникновения сингулярности). В случае, когда две бесконечные струны проходят одна мимо другой, плотность энергии в любой точке всегда остается неотрицательной, но поскольку струны бесконечны, горизонт Коши также простирается до бесконечности, и теорема Хокинга оказывается неприменимой. Однако в случае с решением, описывающим замкнутые конечные струнные петли, где действительно допускается возможность создания машины времени, можно считать, что внутри черной дыры на горизонте Коши должна образоваться сингулярность. Она не обязательно должна преградить вам путь, но вы хотя бы увидите ее вдалеке, как только пересечете горизонт Коши. Однако если горизонт Коши заключен внутри черной дыры (подозреваю, что так и есть), а черная дыра испарится под действием хокинговского излучения (что неизбежно), то квантовое вакуумное состояние вне черной дыры приобретет слегка отрицательную плотность энергии (и из-за этого горизонт событий начнет

сужаться), что, опять же, означает неприменимость теоремы Хокинга. Таким образом, не потребуется нарушать никакие теоремы, чтобы создать машину времени, заключенную во вращающейся черной дыре, где вы не погибаете от столкновения с сингулярностью, до того как пересечете горизонт Коши.

Поскольку черная дыра успевает испариться за конечный период времени, это означает, что вы, приближаясь к горизонту Коши, не увидите всей истории Вселенной, пока не пересечете его (но именно это произойдет перед тем, как горизонт событий черной дыры в результате ее испарения сожмется до нулевого размера). Следовательно, пока вы будете падать в черную дыру, вас не будут беспорядочно бомбардировать фотоны, сильно смещенные в синюю часть спектра. Это тоже неплохо.

Горизонт Коши нестабилен; однако ведь у нас есть истребители, которые также нестабильны в воздухе, но под управлением летчика приобретают удивительную маневренность. Аналогичный пример – фокус с длинным карандашом, который ставишь носиком себе на подушечку пальца и быстро двигаешь пальцем, не давая карандашу упасть. Жонглеры постоянно проделывают такие трюки с першами. В принципе, сверхцивилизация может научиться стабилизировать горизонт Коши, активно возмущая его нужным образом.

Если вы решите слетать в прошлое на год назад, единожды обогнув схлопывающуюся струнную петлю (внутри черной дыры), то для этого потребуется найти струнную петлю, масса которой всего раза в два меньше, чем у нашей Галактики. Лишь сверхцивилизации могут хотя бы попытаться воплотить такой проект.

Погибнете ли вы перед перемещением во времени? Выживете ли и сможете ли слетать к событию из собственного прошлого, и все это – в пределах вращающейся черной дыры? Чтобы ответить на эти вопросы, нам потребуется окончательно разобраться в законах *квантовой гравитации* – понять, каким образом гравитация проявляется на микромасштабах. Вот еще одна причина, по которой эта проблема столь интересна.

Движение космических струн не единственное решение эйнштейновских уравнений общей теории относительности, допускающее путешествия во времени. Первое решение было связано с нерасширяющейся, но вращающейся Вселенной. Его предложил в 1949 году знаменитый математик Курт Гёдель. Хотя на самом деле наша Вселенная расширяется, а не вращается, решение Гёделя показало, что общая теория относительности в принципе допускает путешествия в прошлое. Если существует одно такое решение, значит, могли

обнаружиться и другие. В 1974 году Франк Типлер продемонстрировал, что путешествие в прошлое можно организовать при помощи бесконечно высокого вращающегося цилиндра. В 1988 году Кип Торн и его коллеги Майк Моррис и Ульви Уртсевер предложили модель машины времени на базе проходимой кротовой норы. В общей теории относительности кротовой норой называется короткий туннель, соединяющий две далекие точки в искривленном пространстве-времени. *Проходимой* называется такая кротовая нора, которая остается распахнутой достаточно долго, чтобы через нее можно было проскочить (в отличие от кротовой норы с диаграммы Крускала, с которой мы познакомились в главе 20). Насколько мы понимаем общую теорию относительности, такие туннели могут существовать, хотя ни один подобный объект пока не открыт. Один выход из туннеля может располагаться возле Земли, а другой – у альфы Центавра, в четырех световых годах отсюда. Однако длина самого туннеля может не превышать трех метров (рис. 21.7).

Если отправить луч света от Земли к альфе Центавра, то свет будет лететь туда четыре года. Но можно проскочить через кротовую нору – и оказаться у альфы Центавра через считаные секунды. Таким образом, можно обогнать луч света, летящий к альфе Центавра, срезав путь через кротовую нору. Как может выглядеть вход в кротовую нору, иными словами, ее устье? На схеме оно напоминает круг, но ведь эта схема учитывает всего два измерения. На самом деле устье кротовой норы имеет форму шара. Оно выглядит примерно как те блестящие зеркальные шары, которые иногда доводится видеть в саду. Это явление верно изображено в фильме «Интерстеллар», на съемках которого Кип Торн работал научным консультантом по физике. Но не думайте, что в кротовой норе отразится ваш земной сад. Вместо этого вы увидите сад с планеты, вращающейся в системе альфы Центавра. Прыгайте в этот шар на Земле и выныривайте из него где-нибудь у альфы Центавра.

Рис. 21.7. Кротовые норы и варп-двигатели. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, адаптирована из Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Вот как можно превратить кротовую нору в машину времени. Предположим, мы нашли такую кротовую нору 1 января 3000 года. Если взглянуть через нее, то увидишь систему альфы Центавра, но в какое время? Если два устья (выхода из туннеля) синхронизированы, то часы в системе альфы Центавра также будут установлены на 1 января 3000 года. Никакого путешествия во времени не происходит. Но теперь предположим, что мы подводим к кротовой норе массивный космический корабль и гравитационно оттягиваем устье кротовой норы, расположенное поблизости от Земли, на 2,5 световых года вперед и обратно, причем устье движется со скоростью 99,5 % от скорости света. Землянам покажется, что такой путь туда и обратно займет всего 5 лет, и устье кротовой норы вновь окажется около Земли 10 января 3005 года.

Допустим, в центре туннеля кротовой норы сидел астронавт. Он будет стариться вдесятеро медленнее вас, поскольку двигался со скоростью 99,5 % от скорости света. За время путешествия он состарится всего лишь на

десятую часть от 5 лет, то есть на полгода. Когда он вернется, у него на часах будет 1 июля 3000 года. Но длина туннеля кротовой норы составляет всего 3 метра. За время путешествия длина туннеля не изменяется, поскольку его геометрия зависит от вещества, расположенного в туннеле кротовой норы, а это вещество не изменилось. Более того, астронавт находится в состоянии покоя относительно устья, обращенного к альфе Центавра, а само это устье стационарно относительно альфы Центавра, поскольку с той стороны никакого движения не происходит. Часы астронавта должны оставаться синхронизированными со временем альфы Центавра. Если вы заглянете в кротовую нору по возвращении астронавта и увидите, что у него на часах сейчас 1 июля 3000 года, то расположенные у него за спиной часы из системы альфа Центавра также должны показывать 1 июля 3000 года. Следовательно, когда устье кротовой норы возвращается к Земле 10 января 3005 года, вы можете заглянуть в нее и увидеть часы из системы альфы Центавра, которые в этот момент будут показывать 1 июля 3000 года. Уже понимаете, какая возможность перед вами открывается. Прыгаете через кротовую нору и оказываетесь в системе альфы Центавра 1 июля 3000 года. Садитесь на космический корабль и возвращаетесь к Земле на скорости 99,5 % от скорости света. Ваш путь через обычное пространство займет чуть более 4 лет, вы вернетесь на Землю 8 июля 3004 года. Но вы отправились в путь 10 января 3005 года, то есть вы вернулись домой раньше, чем улетели. Поэтому вы можете поучаствовать в событиях собственного прошлого. Пожать руку себе же 8 июля 3004 года, еще до начала пути. Обратите внимание: через кротовую нору можно попасть в прошлое, но не раньше того момента, в который была создана машина времени, то есть той даты, когда от Земли стали оттягивать расположенное близ нее устье кротовой норы. Так, нельзя уйти в прошлое к дате ранее 3000 года, поскольку в это время еще не были рассинхронизированы два устья кротовой норы.

Направление этим исследованиям было задано Карлом Саганом. Он написал научно-фантастический роман «Контакт», в главе 10 Нил рассказывал вам о фильме по этому роману. По замыслу Сагана, героиня романа, которую в кино играет Джоди Фостер, должна была прыгнуть в кротовую нору и оказаться рядом с Вегой – звездой, удаленной от нас на 25 световых лет. Карл хотел, чтобы эпизод получился корректным с точки зрения физики, и позвонил своему другу Кипу Торну. Торн с коллегами исследовали физику кротовин и пришли к выводу, что кротовые норы должны быть начинены веществом, обладающим отрицательной энергией, то есть таким веществом, энергия которого меньше нуля, и которому

присуща отталкивающая гравитация. Свет сходится к кротовой норе, проникает сквозь ее туннель и рассеивается с другой стороны. Это характерное проявление гравитационного отталкивания, свойственного объектам, обладающим отрицательной энергией. Как вы помните, на диаграмме Крускала кротовая нора сопутствовала черной дыре, но перебраться через нее на другую сторону дыры было нельзя. Вы не могли проникнуть в другую вселенную, минуя сингулярность, а при столкновении с сингулярностью вас разрывало на куски. Но если у вас будет материя, обладающая отрицательной энергией, то открытую кротовую нору удастся стабилизировать и перейти через нее на ту сторону. Но где же взять материю, обладающую отрицательной энергией?

Любопытно, что известен квантовый эффект, так называемый «*эффект Казимира*», при котором наблюдается материя с отрицательной энергией. Если поместить почти вплотную друг к другу две металлические проводящие пластины, то квантовое состояние вакуума между этими пластинами будет обладать отрицательной плотностью энергии. Давление, связанное с эффектом Казимира, было зафиксировано в лабораторных экспериментах, поставленных в лаборатории М.Й. Спарнаэем и С.К. Ламоро. Квантовое состояние вакуума Хартле – Хокинга, возникающее вокруг черной дыры, также обладает слегка отрицательной плотностью энергии, что позволяет черной дыре со временем испариться. При таком испарении площадь горизонта событий уменьшается. Два этих примера демонстрируют, что получить материю с отрицательной энергией возможно. Торн с коллегами выяснили, что если установить в туннеле кротовой норы две сферические пластины выпуклыми сторонами друг к другу, так, чтобы они перекрывали туннель и расстояние между ними не превышало 10^{-10} см, то возникающий между ними эффект Казимира должен удержать кротовую нору от схлопывания. Вам останется открыть люки в пластинах – и пройти. (Поскольку все эти варианты сопряжены с такой материей, которая обладает отрицательной энергией, «кротовонорные» решения позволяют создать машину времени в конечной области без возникновения сингулярности, так как теорема Хокинга в данном случае не работает – о чем мы уже упоминали ранее.)

В такой машине времени, которую предложили Торн с коллегами, каждое устье кротовой норы должно весить 100 миллионов солнечных масс и иметь радиус в 1 а.е. Создание такой кротовой норы – масштабный проект, за который могла бы взяться лишь сверхцивилизация. Единственный способ реализовать подобное – найти два микроскопических устья квантовой кротовой норы, удаленные друг от

друга на $1{,}6 \times 10^{-33}$ см, диаметром также $1{,}6 \times 10^{-33}$ см, входящие в состав пространственно-временной квантовой пены, которая, как считается, заполняет микромир. Затем два этих устья потребовалось бы медленно отвести в разные стороны и постепенно нарастить, пока каждое не стало бы весить 100 миллионов солнечных масс. Такие проекты в гараже не делаются! Но недавние работы Малдасены и Сасскинда показывают, что на свете могут существовать микроскопические квантовые кротовые норы, соединяющие частицы, находящиеся в состоянии запутанности, – значит, у нас есть хотя бы отправная точка.

Другая знаменитая модель машины времени – это варп-двигатель, описанный в сериале «Звездный путь». Такой двигатель создает U-образное искажение пространства, которое также позволяет мгновенно преодолевать большие расстояния – например, до альфы Центавра. Это не дыра, а всего лишь U-образное искажение (см. рис. 21.7). Физик Мигель Алькубьерре рассмотрел этот феномен с точки зрения общей теории относительности и обнаружил, что для работы варп-двигателя требуется как вещество с положительной, так и вещество с отрицательной энергией, но теоретически он реализуем.

Недавно Амос Ори предложил модель тороидальной машины времени (напоминающей по форме бублик). Ученые до сих пор открывают новые творческие решения общей теории относительности, связанные с путешествиями во времени.

Стивен Хокинг полагает, что некоторые еще не открытые квантовые эффекты могут «запретить» путешествия во времени, пусть даже такие путешествия допускаются в общей теории относительности. Он выдвинул «гипотезу о защите хронологии», согласно которой законы физики должны каким-то образом исключать путешествия в прошлое. Он обосновал эту гипотезу некоторыми свидетельствами о том, что квантовое состояние вакуума может стать бесконечным при приближении к горизонту Коши и той области, в которой возможны хронопутешествия. Мы с Ли-Синь Ли нашли контрпример, в котором складывалось иное квантовое состояние вакуума, не достигавшее бесконечности на горизонте Коши. Ученик Хокинга Майкл Дж. Кэссиди пришел к аналогичному выводу, но путем иных умозаключений. Итак, представляется, что в некоторых ситуациях путешествия во времени возможны. Опять же, чтобы судить об этом наверняка, нужно определить законы квантовой гравитации.

В 1895 году, когда Уэллс опубликовал роман «Машина времени», известные на тот момент законы (ньютоновской) физики предполагали, что везде одинаково течет общепринятое время, и путешествия в прошлое или

будущее не допускались. Но спустя всего 10 лет, в 1905 году, Эйнштейну предстояло доказать, что путешествия в будущее возможны. Космонавт Геннадий Падалка уже улетел в будущее на 1/44 секунды (см. главу 18). В 1915 году Эйнштейн сформулировал теорию гравитации, действующую в искривленном пространстве-времени и описывающую, как можно обогнать луч света; следовательно, такая теория открывала путь к путешествиям в прошлое. Сегодня уже известны несколько решений эйнштейновских уравнений, в принципе допускающих путешествия в прошлое. В настоящее время мы находимся в совершенно противоположной ситуации, чем Уэллс в период написания своего знаменитого романа. Общая теория относительности Эйнштейна, до сих пор выдерживавшая все испытания, которым ее подвергали, – это лучшая имеющаяся у нас теория тяготения, и у нее есть решения, в принципе, допускающие путешествия во времени, пусть даже ресурсами для таких путешествий может располагать лишь сверхцивилизация. Известно, как действует гравитация в макроскопических масштабах, а также известно, что на микромасштабах становится важен вклад квантовых эффектов, так что по-прежнему необходимо разрабатывать теорию квантовой гравитации. Мы должны успешно поженить общую теорию относительности и квантовую механику, сложив из них работоспособную теорию, и понять, возможно ли сконструировать машину времени, позволяющую слетать в прошлое. Насколько мы можем судить сегодня, законы физики, в принципе, допускают путешествия в прошлое, но пока открыт другой вопрос: не запрещены ли такие путешествия какими-то другими законами физики, которые еще только предстоит открыть.

В своей книге «Путешествия во времени в эйнштейновской Вселенной» (*Time Travel in Einstein's Universe*, 2001) я исследовал идеи специальной и общей теории относительности применительно к возможности путешествий во времени. Действительно, общая теория относительности изучает путешествия в прошлое, но не с целью сконструировать машину времени в настоящем, а для того, чтобы понять устройство Вселенной. Решения, допускающие путешествия во времени, – это проверка законов физики в экстремальных условиях. В главе 23 я вернусь к теме путешествий во времени, когда мы станем обсуждать условия, сложившиеся в новорожденной Вселенной.

Глава 22
Контуры Вселенной и Большой взрыв

Автор: Дж. Ричард Готт

Прежде чем обсудить, какова форма Вселенной, для начала вспомним о том, сколько в ней измерений. Как уже упоминалось выше, мы живем в четырехмерной Вселенной. Чтобы локализовать любое событие, нужно указать четыре его координаты: в трех пространственных измерениях и во времени. В своей специальной теории относительности Эйнштейн продемонстрировал, что интервалы между событиями (как минимум в плоском пространстве-времени) можно измерить по формуле $ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$. Знак «минус» перед членом dt^2 отличает время от любого из пространственных измерений и гарантирует, что скорость света для любых наблюдателей будет оставаться постоянной.

Можно представить себе Вселенную с иным количеством пространственных и временных измерений. Интервалы между событиями во Вселенной с двумя пространственными и одним временным измерением будут вычисляться по формуле $ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2$. Люди, живущие в такой Вселенной, даже подозревать не будут о существовании координаты z – они не будут понимать разницы между верхом и низом. Это будут жители Флатландии. На рис. 22.1 изображен ее житель, флатландец, у себя дома.

В доме есть дверь, и флатландец даже может искупаться в бассейне на заднем дворе. Но если ему вздумается попасть в бассейн, он должен будет выйти через переднюю дверь, перелезть через крышу и прямо с крыши нырнуть в бассейн. У него есть глаз: в передней части головы расположен хрусталик, а в задней – сетчатка. Вы уже заметили, что мы видим флатландца в разрезе. Мы можем полностью рассмотреть его внутренности. Можем поставить ему очень точный диагноз по поводу любого недомогания – ведь мы видим все его внутренние органы. У него есть рот, пищевод, желудок, но нет пищеварительного тракта, который проходил бы через все тело! Если бы такой тракт имелся, то флатландец бы попросту развалился пополам! Ему приходится переваривать пищу в желудке и отрыгивать продукты обмена. Флатландец держит газету. Наши газеты двумерные, они представляют собой листы бумаги; но его газета одномерная и напоминает по форме линию. Газетный текст записан азбукой

Морзе, он состоит из точек и тире. Если флатландец захочет отправиться спать, то ему придется сделать обратное сальто в постель. Как должен работать его мозг? Во Флатландии невозможно представить себе перекрещивающиеся нейроны (или провода). Но электромагнитные сигналы во Флатландии могут пересекаться, так что вместо нейронов, передающих сигналы от клетки к клетке, здесь будут использоваться просто электромагнитные сигналы[36]. В принципе, у флатландца может быть мозг, но устроен этот мозг будет гораздо сложнее нашего.

В 1880 году Эдвин Эбботт написал чудесную книгу «Флатландия» о существах, обитающих в таком плоском мире. Повествование в этой книге велось от лица Квадрата[37].

Как бы выглядел мир, в котором существовало бы лишь одно пространственное измерение и время? Такой мир назывался бы Лайнландией (он также показан на рис. 22.1). Все объекты там выстроены в одну линию. Мир описывался бы формулой $ds^2 = -dt^2 + dx^2$. Все люди походили бы на отрезки. Там могли бы жить Король, Королева, Принц и Принцесса, но, живя в Лайнландии, вы могли бы увидеть лишь тех, кто живет бок о бок с вами – справа и слева. Люди выглядели бы как точки. Вам потребовалось бы ладить с соседями – ведь больше вам не суждено было бы ни с кем встретиться. Представляется, что во Флатландии разумная жизнь могла бы возникнуть с большими затруднениями, а в Лайнландии она решительно невозможна.

Рис. 22.1. Флатландия и Лайнландия. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, адаптирована из Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Кроме того, можно вообразить такие варианты пространства-времени, где больше измерений, чем в нашем. Допустим, мы добавим одно пространственное измерение. Получится $ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 + dw^2$. В этом континууме четыре пространственных измерения и время. Появилось дополнительное пространственное измерение (w). В 1919 году Теодор Калуца предположил, что такое дополнительное измерение существует. Почему? Просто он обнаружил занятную вещь. Если счесть верными эйнштейновские уравнения общей теории относительности и применить их в таком пятимерном пространстве, причем в измерении w это решение будет однородным, то получится результат, эквивалентный уравнениям общей теории относительности Эйнштейна в четырех измерениях (обычная гравитация) плюс уравнения Максвелла (с поправками, учитывающими эйнштейновскую специальную теорию относительности)! Чудо! Электромагнетизм эквивалентен действию гравитации в дополнительном измерении. Такая теория объединяет

гравитацию и электромагнетизм. Кажется невероятным совпадением, что при наличии всего одного дополнительного измерения эйнштейновская общая теория относительности воспроизводит максвелловские уравнения.

При всей привлекательности эта теория представляла очевидную большую проблему: она казалась абсолютно бессмысленной. Почему мы не видим этого дополнительного измерения? В 1926 году Оскар Клейн нашел ответ. Он предположил, что дополнительное измерение может быть свернуто, как соломинка для газировки. Соломинка для газировки – это цилиндр, у которого двумерная поверхность. В конце концов, ее делают из плоского листа бумаги. Если бы какие-то существа жили на поверхности такой соломинки, они были бы плоскими, иными словами – это были бы флатландцы. Чтобы сориентироваться на поверхности соломинки для газировки, нужны всего две координаты: вертикальная, указывающая, как высоко на соломинке вы находитесь, и угловая, характеризующая, в какой точке окружности соломинки вы оказались. Но окружность соломинки крошечная, и если посмотреть на соломинку издалека, она покажется одномерной, как Лайнландия. Мы замечаем лишь макроскопическое измерение соломинки, то есть длину. Если бы окружность соломинки была еще миниатюрнее, меньше диаметра атома, то она казалась бы совершенно неразличимой.

Таким образом теория Калуцы – Клейна объясняет электромагнетизм. Положительно заряженные частицы облетают окружность соломинки против часовой стрелки, а отрицательно заряженные – по часовой. Нейтральные частицы, например нейтрон, не кружатся. Если согнуть соломинку для газировки в дугу, то в макроскопических направлениях геодезические линии могут искривляться по-разному в зависимости от того, как именно они ориентированы: по часовой стрелке или против часовой стрелки. Все потому, что в маленьком дополнительном измерении их скорости отличаются. Таким образом объясняется, почему положительно и отрицательно заряженные частицы в электрическом поле ускоряются в противоположных макроскопических направлениях. Поскольку их скорости в небольшом окружном направлении будут отличаться, эти частицы полетят по разным геодезическим линиям. Это также объясняет, почему заряд квантуется. Поскольку частицы имеют волновую природу, количество отдельных волн, огибающих соломинку, всегда выражается целым числом (1, 2, 3…). Это означает, что импульс частиц в направлении *w* (зависящий от длин волн этих частиц и равный их заряду) должен быть целочисленным кратным заряда протона или электрона. Зная наблюдаемые значения протона и электрона, можно

вычислить, какова окружность нашей соломинки: она равна 8×10^{-31} см. Эта величина меньше атомного ядра – вот почему мы не видим дополнительного измерения.

Сформулировав общую теорию относительности, Эйнштейн мечтал найти физическую теорию Великого Объединения, которая позволила бы унифицировать все силы природы. Следует отметить, что Калуца и Клейн добились некоторых успехов на пути к этой цели: им удалось объединить электромагнетизм и гравитацию. Оказывается, электромагнетизм – это просто гравитация, действующая в дополнительном свернутом измерении. Но в теории Калуцы – Клейна было еще кое-что: длина окружности нашей соломинки может варьировать в зависимости от места и времени. Ситуация такова, как будто существует скалярное поле, значения которого могут изменяться в пространстве-времени в зависимости от координат. *Скалярное поле* обладает величиной, но не имеет конкретного направления. Температура – это скалярное поле. Скорость ветра – это *векторное поле*, как раз потому, что оно обладает скоростью и направлением (например, «на север»). В нашем случае скалярное поле – это величина окружности дополнительного измерения в конкретной точке и, следовательно, величина заряда электрона в этой точке. Если бы мы имели дело лишь с общей теорией относительности и уравнениями Максвелла, то величина этой окружности должна была бы оставаться неизменнной (фиксированной), поскольку мы все время наблюдаем у всех электронов одинаковый заряд, где бы мы их ни находили. Если бы длина окружности на самом деле варьировалась, то изменялся бы и заряд электрона, а этого не наблюдается. Было непонятно, почему окружность соломинки несмотря ни на что остается фиксированной. Если она действительно фиксированна, как могло показаться, то теория Калуцы и Клейна не давала никаких новых прогнозов: ее прогнозы совпадали с общими предсказаниями стандартной общей теории относительности плюс стандартных уравнений Максвелла. Эйнштейну повезло: прогнозы его теории не сводились к тем же фактам, что и прогнозы ньютоновской теории тяготения (прецессия орбиты Меркурия и отклонение луча света), поэтому ее можно было проверить. Но Калуца и Клейн не сделали никаких новых прогнозов, поэтому проверить их теорию было невозможно и Нобелевскую премию они не получили.

Сегодня известны четыре фундаментальные силы: сильное и слабое ядерные взаимодействия, электромагнетизм и гравитация. Сильное ядерное взаимодействие обеспечивает целостность атомных ядер, а слабое ядерное взаимодействие лежит в основе некоторых видов радиоактивного распада. Стивен Вайнберг, Абдус Салам и Шелдон Глэшоу в 1979 году получили

Нобелевскую премию по физике за вклад в объединенную теорию слабых и электромагнитных взаимодействий. Согласно их теории, должны были существовать подобные протону тяжелые частицы W+, W— и Z0, являющиеся носителями слабого взаимодействия, точно как протон является носителем электромагнитного. Эти частицы были открыты в ускорителе ЦЕРН (близ Женевы). В 1984 году Карло Руббиа и Симон ван дер Мер совместно получили за эту работу Нобелевскую премию по физике. Сильное и слабое ядерные взаимодействия, а также электромагнетизм описываются в рамках *Стандартной модели физики частиц*. Не так давно исследователи, работающие на Большом адронном коллайдере, открыли бозон Хиггса, существование которого также предсказано в этой теории. Бозон Хиггса – это частица, ассоциированная с полем Хиггса: скалярным полем, пронизывающим пространство и сообщающим массу частицам W^+, W^- и Z^0. Стандартная модель физики частиц оказалась очень успешной, но сегодня она не в состоянии объяснить природу темной материи либо тот факт, что нейтрино обладают ненулевой массой. Кроме того, сильное взаимодействие, слабое взаимодействие и электромагнетизм до сих пор не удается объединить с гравитацией.

Сегодня наиболее многообещающим кандидатом на роль теории Великого Объединения, способной унифицировать все четыре взаимодействия, представляется *теория суперструн*. В основе ее лежит идея о том, что элементарные частицы – это не точечные, а вытянутые объекты длиной порядка 10^{-33} см. Они напоминают космические струны, о которых мы уже говорили, – тем, что обладают положительной массой и натяжением по всей длине. Однако толщина у суперструн не микроскопическая, а нулевая. Вибрации струны могут отличаться, и в зависимости от вибраций она приобретает свойства той или иной элементарной частицы – кварка, электрона и т. п. Эд Виттен продемонстрировал, что пять различных вариантов теории суперструн плюс еще одна теория, именуемая теорией супергравитации, на самом деле являются частными случаями еще более масштабной системы, которую он назвал «*М-теория*». В М-теории пространство-время является 11-мерным, состоит из 10 пространственных измерений и времени. В нем присутствуют три знакомых нам пространственных измерения плюс еще семь миниатюрных свернутых пространственных измерений. Если бы я попытался объяснить лайнландцу, как выглядит соломинка для газировки, то я бы сказал, что она похожа на линию, только каждая точка на этой линии – на самом деле не точка, а крошечный кружочек. Если бы у нас

имелись два дополнительных пространственных измерения, то это была бы крошечная двумерная поверхность, напоминающая не круг, а скорее бублик. В М-теории семь свернутых измерений подобны по форме миниатюрному кренделю, и этот крендель призван объяснить природу слабого, сильного и электромагнитного взаимодействий. Возможны разнообразные формы. Цель – найти верную, такую, которая объясняла бы наблюдаемую нами физику частиц.

Примерно с такой головоломкой столкнулись Уотсон и Крик, пытавшиеся смоделировать структуру молекулы ДНК. Многие варианты казались возможными, но какой из них был верным? Когда они наконец решили эту задачу, получившаяся у них форма позволяла объяснить, каким образом хромосомы могут делиться, образуя самостоятельные, но при этом идентичные копии. Секрет был в том, что геометрически ДНК напоминает двойную спираль, которая может расплетаться на нити, а эти нити затем вновь сочетаются с комплементарными парами оснований – и получаются две одинаковые спирали. Точно так и в физике мы надеемся выявить микроскопическую геометрию дополнительных пространственных измерений, которая бы объясняла наблюдаемую физику. Сегодня над этой проблемой работает множество людей, следующих по пути, проторенному Калуцей и Клейном. Лиза Рэндалл и ее коллега Раман Сундрум исследовали, каким образом сильно искривленные дополнительные измерения могут объяснить крайнюю слабость гравитации по сравнению с остальными взаимодействиями. Если кому-то удастся найти такую версию М-теории, которая дает проверяемые прогнозы, согласующиеся с наблюдениями, то этот человек воплотит мечту Эйнштейна о теории Великого Объединения физики частиц и сравнится по авторитету с Ньютоном и Эйнштейном. Захватывающая перспектива.

Исследовав микроскопическую Вселенную, давайте теперь поговорим о макроскопической. Хотелось бы построить единую карту, на которой уместилась бы вся Вселенная; такая карта продемонстрировала бы нам интересные явления, заснятые космическим телескопом «Хаббл» с низкой околоземной орбиты, свойства Солнца и планет, звезд и галактик, далеких квазаров и космического микроволнового фона (реликтового излучения) – самых дальних горизонтов, которые мы способны увидеть. Проблема в том, что наша Галактика крошечная по сравнению с наблюдаемой частью Вселенной, а Солнечная система – микроскопическая точка в нашей Галактике. Следовательно, это непростая задача – уложить всю Вселенную на одной карте так, чтобы эта карта демонстрировала все, что нас интересует.

На рис. 22.2 показана карта (поперечное сечение) видимой части Вселенной, какой она представляется при взгляде с земного экватора. Земля находится в центре карты. Мы расположились в центре видимой части Вселенной, но не потому, что наша планета занимает какое-то особое положение, а потому (и это неудивительно), что мы находимся в центре той области, которая доступна нам для наблюдений. Аналогично, если подняться на крышу Эмпайр-Стейт-Билдинг, то перед вами будет расстилаться область, ограниченная горизонтом, и в центре этой области окажется здание Эмпайр-Стейт-Билдинг. С верхней обзорной площадки Эйфелевой башни вы увидите круглую область, в центре которой будет находиться Эйфелева башня. На приведенной здесь карте видимой части Вселенной самый далекий феномен, доступный для наблюдения, – это реликтовое излучение, рассредоточенное по окружности видимой части Вселенной (наблюдавшееся спутником WMAP). В пределах этого круга в виде точек показаны 126 594 объекта – это галактики и квазары из Слоановского цифрового обзора неба. Две веероподобные области, усеянные точками, – это поперечные сечения зон, охваченных обзором. Пустые «лопасти» – это зоны, не охваченные обзором. На картинке заметна Великая Стена Слоана, о которой шла речь в главе 15. Квазары удалены от нас сильнее, чем галактики. Наш Млечный Путь – лишь точка в центре картинки, а расположение ближайших звезд и планет на этом изображении просто не просматривается, настолько они микроскопические.

Та карта, которую мы действительно хотим начертить, может напоминать знаменитую обложку журнала *New Yorker*, выполненную Солом Стейнбергом, которая называется «Взгляд на мир с 9-й авеню». Здесь показана картина мироздания с точки зрения нью-йоркца. На переднем плане возвышаются манхэттенские здания. Река Гудзон маленькая, а «Джерси» – просто полоска с противоположной стороны картинки.

Рис. 22.2. Экваториальное поперечное сечение видимой части Вселенной. Мы находимся в центре той области, которую можем наблюдать. Все точки соответствуют галактикам (зеленые) или квазарам (оранжевые), при этом их красное смещение измерено при помощи телескопа «Слоановский цифровой обзор неба». Центральная часть этой схемы уже встречалась нам ранее, она показана на рис. 15.4. По периметру наблюдаемой части Вселенной находится космический микроволновый фон. Иллюстрация сделана по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Средний Восток ужат так, что по ширине он сравним с рекой Гудзон, а

Тихий океан – еще одна узкая полоса, где-то вдали ограниченная Азией. Вещи, важные для нью-йоркца, показаны крупным планом, а более отдаленные регионы нарисованы крошечными. Именно в таком ракурсе мы хотели бы построить карту всей видимой части Вселенной. Требуется, чтобы важные для нас тела из Солнечной системы выглядели сравнительно крупными, а более отдаленные объекты – уменьшенными.

В 1970-е годы, когда я учился в аспирантуре, я разработал картографическую проекцию именно для этой цели. Я годами вычерчивал ее в разных вариантах, в 1990-е годы сделал карманную версию.

Получилась конформная карта нашей Вселенной. *Конформная* означает, что в локальном масштабе очертания элементов на такой карте сохраняются, как и на карте Земли в проекции Меркатора. Исландия на карте Меркатора изображена не менее точно, чем Куба. Локальные регионы показаны с сохранением истинной формы, не растянуты, не ужаты ни в одном направлении. Вот почему проекция Меркатора используется на картах Google Maps. Если увеличить небольшой регион для детального рассмотрения, то все контуры на этом участке останутся верными. Но размеры искажаются: Гренландия в проекции Меркатора кажется почти такой же большой, как Южная Америка, но в реальности Южная Америка примерно в 8 раз крупнее Гренландии. Моя карта построена по схожему принципу – чем дальше объект расположен от Земли, тем меньше его масштаб, но все контуры верные.

Мы с Марио Юричем составили в 2003 году большую профессиональную версию этой карты, и она попала на страницы *New Scientist* и *The New York Times*, разошлась тиражом 1,5 миллиона экземпляров. В 2005 году ее напечатали в *Astrophysical Journal*. Газета *Los Angeles Times* сравнила ее с проекцией Меркатора и вавилонскими картами и охарактеризовала как «пожалуй, самую умопомрачительную карту современности». Мы с Бобом Вандербеем сделали полноцветную крупномасштабную версию карты (в этой книге ее пришлось разделить по вертикали на три части и разместить на трех страницах). Поверните книгу на 90° – и тогда верхняя, нижняя, правая и левая стороны карты расположатся правильно.

Слева направо на 360° разворачивается панорама, открывающаяся с экватора Земли. По горизонтали откладывается долгота небесной сферы. По вертикали – расстояние от Земли, и каждое большое деление означает, что в этой точке расстояние от Земли увеличивается вдесятеро. Объекты, отнесенные в 10 раз дальше, показаны в масштабе 1/10, и так далее. Чем дальше объект – тем меньше он на этой карте. Поверхность Земли на

экваторе выглядит как прямая линия. Мы видим Луну, Солнце и планеты. Гораздо дальше расположены звезды, первой идет Проксима Центавра, далее альфа Центавра и Сириус. Еще дальше расстилается основная часть галактики Млечный Путь. За ней показаны галактики M31 и M81. Далее видим галактику M87. Великая Стена, открытая Маргарет Дж. Геллер и Джоном Хакрой, – это большая галактическая нить (цепь галактик). Еще дальше, по верхнему краю карты, проходит линия, соответствующая реликтовому излучению (РИ), – это излучение окружает нас со всех сторон, на 360°.

Эта карта – мгновенный снимок видимой части Вселенной в 4:48 по Гринвичскому времени 12 августа 2003 года. Показан сегмент с угловым размером 4° с центром в экваториальной плоскости Земли (хотя мы показываем и некоторые знаменитые объекты, расположенные за пределами этой области). Спутники и планеты показаны на тех позициях, которые занимали на этот момент, а галактики – в удалении от нас, на том расстоянии, куда они должны были успеть разлететься. То есть для галактик в данном случае показаны сопутствующие расстояния. Мы показали на карте все известные к тому моменту объекты из пояса Койпера. Показали все известные астероиды, попавшие в 2° экваториальной плоскости. Под поверхностью Земли вы видите кору и мантию. Атмосфера показана как тонкая голубая линия над поверхностью Земли, простирающаяся до самой ионосферы. Мы изобразили все 8420 искусственных спутников, вращающихся вокруг Земли. На карте заметна Международная космическая станция (МКС) и космический телескоп «Хаббл». Луна на этой карте полная, она отстоит на 180° от Солнца. Марс показан на своей орбите в точке максимального сближения с Землей. Также изображены планеты Меркурий, Венера, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Показана Церера, крупнейший астероид (945 км). Показан Кваоар, объект из пояса Койпера, был открыт значительно позже Плутона, есть здесь и сам Плутон. На карте изображены некоторые звезды, у которых есть планеты, например HD 209458, – по ближней орбите вокруг этой звезды вращается планета, похожая на Юпитер. Также на карте есть черная дыра Лебедь X-1, чья масса составляет 7 солнечных[38], и галактика M87, в ядре которой скрывается черная дыра примерно в 3 миллиарда солнечных масс. Двойной пульсар Халса и Тейлора, о котором мы упоминали в главе 11, – это система из двух нейтронных звезд, заключенных на тесной взаимной орбите; они медленно по спирали сближаются друг к другу, поскольку система испускает гравитационные волны, – точно как прогнозировал Эйнштейн. В 1993 году Халс и Тейлор получили за свое открытие

Нобелевскую премию по физике. Ближе к верхней части карты показаны галактики и квазары из Слоановского цифрового обзора неба общим числом 126 594. Они выглядят как две вертикальные полосы, между которыми лежат пустые зоны, не охваченные обзором. Это те самые «лопасти», которые мы видели на рис. 22.2, просто иначе показанные на новой карте.

На этой карте есть Великая Слоановская стена галактик; когда мы с Марко Юричем измерили ее в 2003 году, оказалось, что длина ее составляет 1,37 миллиарда световых лет. На тот момент она считалась крупнейшей известной структурой во Вселенной. Она примерно вдвое длиннее Великой стены Геллер и Хукры. Но поскольку Великая стена Слоана втрое дальше, на карте она показана во втрое меньшем масштабе. Поэтому на карте Великая стена Слоана простирается примерно на две трети длины Великой стены Геллер и Хукры, тогда как на самом деле первая стена вдвое крупнее второй. В «Книге рекордов Гиннесса» за 2006 год Великая стена Слоана названа крупнейшей структурой во Вселенной. Я и не помышлял, что когда-нибудь найду собственное имя в «Книге рекордов Гиннесса», но мне даже не пришлось для этого съесть 68 хотдогов за 10 минут или скрутить самый большой клубок из бечевки! Рекорд продержался до 2015 года, когда при более глубоком обзоре удалось обнаружить еще более крупную стену.

На карте показан 3C 273 – первый квазар, расстояние до которого удалось измерить, об этом мы рассказывали в главе 16. Мы изобразили Субару – самую далекую галактику, известную на тот момент, а также GRB 090423 – источник гамма-всплесков, самый отдаленный объект, обнаруженный на тот момент (скорее всего, это сверхновая). В самом верху карты изображено реликтовое излучение, наиболее далекий феномен, который мы можем видеть. Я заинтересовался астрономией, когда мне было восемь. На тот момент не было известно ни одного тела из пояса Койпера (кроме Плутона), никаких экзопланет, пульсаров, черных дыр, гамма-всплесков, еще не было никаких наблюдений РИ. Эта карта демонстрирует, каких успехов достигла астрономия при жизни всего одного поколения.

Теперь давайте поговорим о крупномасштабной геометрии Вселенной. Когда Эйнштейн окончательно доработал уравнения общей теории относительности, он попытался применить их в космологии. Его уравнения описывают, как пространство-время искривляется под влиянием плотности энергии и давления. Одно из решений его уравнений – это плоское пустое пространство-время, но он хотел найти космологическое решение (такое, которое было бы применимо ко Вселенной в целом).

Рис. 22.3. Карта Вселенной. Иллюстрация сделана по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Рис. 22.3 (продолжение)

Рис. 22.3 (продолжение)

Существовала проблема: его уравнения не давали статического решения. Ньютон рассматривал стационарную Вселенную, где звезды заполняют бесконечное пространство более или менее однородно. Каждая

звезда испытывает притяжение со стороны других звезд, но поскольку все эти силы одинаковы во всех направлениях, они компенсируются, и каждая звезда остается на своем месте. Получалась статическая модель, которую считали верным описанием Вселенной. Во времена Ньютона о галактиках ничего не было известно. Такая идея о разнонаправленных силах, которые действуют так, что гасят друг друга, могла работать в контексте абсолютного пространства, каким и представлял его Ньютон. Но если попытаться построить исходно статическую модель в теории Эйнштейна, взаимное притяжение всех галактик должно привести к коллапсу Вселенной. Но Эйнштейн также считал Вселенную статичной (как вы помните, Эйнштейн разработал общую теорию относительности в 1915 году, а работы Хаббла о природе галактик и расширении Вселенной появились лишь в следующем десятилетии). Эйнштейн знал лишь о звездах (из галактики Млечный Путь), а их скорости относительно скорости Солнца невелики по сравнению со скоростью света – и в первом приближении он считал их неподвижными. Чтобы решить эту проблему, Эйнштейн сделал крайне необычный шаг: добавил в свои уравнения дополнительный член! Он назвал его *космологической постоянной*, эта постоянная не дает Вселенной естественным образом схлопнуться под действием гравитации.

Сегодня физики бы сказали: Эйнштейн в данном случае предположил, что пустое пространство (вакуум) на самом деле обладает небольшой положительной энергией (впервые такое замечание сделал Жорж Леметр в 1934 году). Что это значит? Если убрать из вашей комнаты всю материю, которая там есть – людей, стулья, атомы воздуха, – а также избавиться от всех фотонов и других частиц, то в ней останется лишь пустое пространство, вакуум. Логично предположить, что плотность энергии вакуума должна быть нулевой. Но допустим, что пустое пространство обладает положительной плотностью энергии. В таком случае, если два астронавта, летящих на космических кораблях с разной скоростью, измерят плотность энергии и найдут, что она одинакова – ведь никакой привилегированной покоящейся системы отсчета существовать не должно, – то вакуум в таком случае также должен обладать отрицательным давлением, одинаково действующим по вес направлениям в пространстве. Такое давление вакуума должно иметь отрицательный знак (в противоположность плотности энергии). Напомню, что в уравнении $ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$ член, соответствующий времени ($-dt^2$), противоположен по знаку тем трем членам, которые обозначают три измерения

пространства. Это уравнение для ds^2 имеет такой же вид и для движущегося астронавта. Для него нет предпочтительной систем отсчета, соответствующей покою. Аналогично, нет ее и в вакууме, обладающем положительной плотностью энергии (которая в теории Эйнштейна связана с временным измерением) и равновеликим отрицательным давлением, действующим в направлениях x, y и z. Теперь, если бы удалось поместить немного такого вакуума в коробку, то его отрицательное давление тянуло бы стенки коробки друг к другу и она бы стремилась схлопнуться. Но при его однородном распределении этот эффект был бы незаметен. Метеорологи знают, что разница давлений создает тягу: поднимается ветер, опрокидывающий предметы. Но если давление однородно, это незаметно. Атмосферное давление у вас в комнате составляет примерно 760 мм рт. ст., но вы его не замечаете. Поскольку давление однородно, вас не носит по комнате. Аналогично, поскольку давление вакуума однородно во всем пространстве, оно не дает никаких гидродинамических сил, однако оказывает гравитационное воздействие.

Плотность энергии дает притяжение. Она притягивает предметы друг к другу. В уравнениях Эйнштейна гравитация порождается не только плотностью энергии, но и давлением. Ньютон бы такого не предположил, но в уравнениях Эйнштейна присутствует тензор энергии-импульса $T\mu$, вызывающий искривление пространства-времени, а среди членов этого тензора присутствует как давление, так и плотность энергии. Следовательно, в теории Эйнштейна давление гравитирует. Положительное давление притягивает, а отрицательное – отталкивает. Поскольку давление вакуума действует в трех направлениях, эффекты гравитационного отталкивания, связанные с отрицательным давлением, перевешивают гравитационное притяжение, обусловленное положительной плотностью энергии вакуума с коэффициентом 3: 1, и общий гравитационный эффект вакуума дает отталкивание. Сегодня этот феномен ненулевой плотности энергии вакуума (и сопутствующее ему отрицательное давление) именуется *темной энергией*. Темная – потому что мы ее не видим, а энергия – потому что речь идет об энергии вакуума. Как уже подчеркивал Нил, астрономы предпочитают простые термины.

Рис. 22.4. Статическая Вселенная Эйнштейна. Это пространственно-временная схема. Время откладывается по вертикали, причем будущее расположено сверху. Здесь показано лишь одно пространственное измерение (окружность цилиндра) и время (направление по вертикали). Мировые линии звезд (или галактик) в этой модели обозначены прямыми (геодезическими), вертикально идущими по цилиндру. Окружность цилиндра со временем не изменяется, модель статична. На этой картинке реален лишь сам цилиндр – окружающее его пространство и внутреннюю часть можно игнорировать. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, адаптирована из Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

На этой схеме показано лишь одно пространственное измерение плюс время. Пока мы абстрагируемся от двух остальных пространственных измерений, чтобы картинка поддавалась визуализации. Время

откладывается по вертикали, поэтому и сам цилиндр вертикальный. В любой момент времени у него есть круглое поперечное сечение. Круг соответствует одному пространственному измерению. Это Трубландия. Лайнландец может жить не на бесконечной линии, а на окружности, опоясывающей цилиндр, который напоминает трубу. Как лайнландец узнает, что живет в Трубландии? Если он пройдет на $2\pi r$ в одном направлении, то, будучи в Трубландии, вернется к началу пути. Это закрытая космологическая модель, где Вселенная замыкается сама на себя, образуя круг. Мировые линии звезд (или галактик) – это линии, идущие по цилиндру в вертикальном направлении. Они являются геодезическими, то есть максимально прямолинейными. Можно прокатить грузовичок вверх по цилиндру, не поворачивая руля. Мировые линии галактик параллельны. Со временем галактики ни сближаются, ни отдаляются друг от друга. Окружность Вселенной со временем не изменяется. Это Трубландия, где радиус «трубы» со временем также не изменяется. Все эти свойства свидетельствуют, что перед нами статическая модель. Гравитационное притяжение галактик полностью нивелируется общим эффектом гравитационного отталкивания, обусловленым космологической постоянной (сегодня этот эффект именуется «темная энергия»).

Теперь давайте обсудим два дополнительных пространственных измерения, которые остались неучтенными на этой картинке. В принципе, геометрически эта Вселенная является не кругом и не сферой, а так называемой *3-сферой*. Что такое 3-сфера? Круг – это множество точек, расположенных в евклидовой плоскости на расстоянии r от центральной точки. Сфера – это множество точек, расположенных на расстоянии r от центральной точки в трехмерном евклидовом пространстве. Сама сфера представляет собой двумерную поверхность. Флатландец может жить на поверхности сферы. Он обнаружит, что живет на сфере, если отправится в путь и, пройдя на расстояние $2\pi r$, вернется в отправную точку. Кроме того, он может понять, что обитает в Сферландии, если начертит треугольник с тремя прямыми углами, расположенными соответственно на Северном полюсе и в двух точках на экваторе, отстоящих друг от друга на 90° (как показано на рис. 19.1). Такой геометрии в евклидовой плоскости не бывает. Любое поперечное сечение сферы – это окружность. (Интересно, что нам с Марком Олпертом удалось доказать следующее: если бы Эйнштейн жил во Флатландии, где точечные массы не притягиваются друг к другу, то он мог бы смоделировать статическую сферландскую вселенную, не вводя космологическую постоянную. Но Эйнштейн жил не во Флатландии – ему пришлось иметь дело со сферой, содержавшей на одно измерение больше!)

Знакомые каждому из нас окружность и сферу можно назвать соответственно 1-сфера и 2-сфера. 3-сфера подобна им, просто в ней на одно измерение больше: она охватывает множество точек, расположенных на расстоянии r от центральной точки в четырехмерном евклидовом пространстве. Расстояния между точками в четырехмерном евклидовом пространстве измеряются по формуле $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz_2 + dw^2$ (время здесь не учитывается). Мы добавили в уравнение член для w, то есть для дополнительного пространственноподобного измерения. 3-сфера представляет собой множество точек, где $r^2 = x^2 + y^2 + z^2 + w^2$.

Точно как окружность является искривленной одномерной замкнутой линией, а сфера – искривленной двумерной замкнутой поверхностью, 3-сфера представляет собой искривленный трехмерный объем. У окружности есть конечная длина ($2\pi r$), у сферы – конечная площадь поверхности ($4\pi r^2$), а у 3-сферы – конечный объем ($2\pi^2 r^3$). Если вы живете во Вселенной, представляющей собой 3-сферу, и отправляетесь на север, строго следуя этому курсу, то вернетесь в отправную точку, когда пройдете расстояние $2\pi r$. Обогнув Вселенную, вы вернетесь домой с юга. Если вы отправились на восток и летели, никуда не сворачивая, то вернетесь на родную планету с запада, преодолев расстояние $2\pi r$ и обогнув Вселенную. Но даже если вы улетели с родной планеты вверх, то, не отклоняясь от курса, вы вернетесь домой снизу, после того как преодолеете расстояние $2\pi r$. Это трехмерная Вселенная, в которой, как и в нашей, есть три пары направлений: север-юг, восток-запад и верх-низ. Но, в какую бы сторону вы ни отправились, вы все равно вернетесь в исходную точку. Отважный путешественник, пересекающий эйнштейновскую Вселенную, которая представляет собой 3-сферу, может исследовать далекие галактики и гарантированно вернуться домой, если будет двигаться строго по геодезической линии в любом направлении. Он в любом случае прилетит обратно домой, как бумеранг. Пространство ограничено, но у него нет ни краев, ни пределов, которые могли бы преградить ему путь.

Вселенная, представляющая собой 3-сферу, имеет конечный объем, а значит, в ней может уместиться конечное количество галактик. Например, если среднее расстояние между галактиками составляет 24 миллиона световых лет, то средний объем, приходящийся на одну галактику, составит 24 миллиона световых лет в кубе – (24 млн св. лет)3. Если радиус кривизны статической Вселенной, заключенной в 3-сферу, составляет 2400 миллионов световых лет, то объем такой статической Вселенной составит $2\pi^2$(2400 млн св. лет)3. Если разделить (2400 млн св. лет)^3 на (24 млн св.

лет)^3, получится 1003, или один миллион. Таким образом, во Вселенной должно содержаться $2\pi^2$ миллиона галактик, то есть около 20 миллионов галактик. Если бы вы жили в статической вселенной Эйнштейна, то обнаружили бы, что галактики не движутся друг от друга и количество их конечно. Астрономы, живущие в такой Вселенной, могли бы сосчитать все галактики.

Во Вселенной, заключенной в 3-сферу, нет ни одного «привилегированного» наблюдателя; положения всех галактик подобны друг другу, а на поверхности сферы нет никаких особых точек. Любой наблюдатель на Земле может считать, что находится в начале координат (то есть сидит на верхушке шара). Любому землянину кажется, что он прямо сейчас стоит на вершине. Я ведь стою вертикально – значит, все, кто вокруг меня, должны немного наклоняться в стороны. А австралийцы вообще висят вверх тормашками. Но таким образом поставить себя в центр может кто угодно. В Пекине есть круглая платформа, которая должна изображать центр мира. Через Англию провели 0° долготы – нулевой меридиан, который проходит прямо через Гринвич (пригород Лондона, в котором расположена обсерватория). Каждый из нас может считать, что находится в центре, поскольку все точки эквивалентны. Важно, что если бы вы взялись подсчитывать галактики во Вселенной, расположенной в 3-сфере, то во всех направлениях количество галактик оказалось бы одинаковым. Такой подсчет получился бы *изотропным*, то есть не зависел бы от направления – в точности по закону Хаббла.

В 1917 году Эйнштейн опубликовал описание своей статической космологии. Космологическая постоянная – дополнительный член, вписанный им в уравнения, – придавала пустому пространству дополнительную кривизну, но величина этой постоянной была так мала, что не сказывалась на экспериментах по проверке общей теории относительности в масштабах Солнечной системы. Более того, при добавлении этого члена в уравнениях продолжало соблюдаться локальное сохранение энергии! Вероятно, Эйнштейн был единственным представителем своего времени, кто вообще догадался «построить» статическую Вселенную при помощи такой поправочной величины.

Между тем, в России в 1922 году Александр Фридман нашел космологическое решение исходных эйнштейновских уравнений поля (без космологической постоянной). В решении Фридмана учитывались лишь обычные звезды (или галактики). Это было динамическое (а не статическое) решение, и, соответственно, его было сложнее найти. В

модели Фридмана Вселенная имела форму 3-сферы, точно как предполагал Эйнштейн, но эта модель допускала, что радиус сферы со временем может меняться. Фридман нашел решение (рис. 22.5), пространственно-временная схема которого напоминала поставленный вертикально мяч для американского футбола (он так ставится перед подачей).

Рис. 22.5. Фридмановская Вселенная Большого взрыва. На этой пространственно-временной схеме также показано всего одно пространственное измерение (окружность мяча) и время (по вертикали). Мировые линии галактик – это вертикальные швы на мяче. Это геодезические, то есть максимально прямые, линии, которые можно начертить на поверхности мяча. Под действием масс галактик пространство искривляется, и мировые линии соответствуют геодезическим в искривленном пространстве. Эта Вселенная динамическая, она начинается с Большого взрыва. На первом этапе галактики разлетаются друг от друга, при этом окружность Вселенной увеличивается. Это расширяющаяся Вселенная. Но в конечном итоге

Вселенная начинает сжиматься из-за гравитационного притяжения галактик, и этот процесс завершается Большим схлопыванием. Единственным реальным элементом на этой картинке является сама поверхность мяча – все, что находится внутри и снаружи нее, можно игнорировать. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, адаптирована из Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

На этой схеме время откладывается по вертикали, причем будущее располагается сверху. Здесь показано время и одно пространственное измерение. Пространственное измерение изображено как круглое поперечное сечение (Трубландия), радиус которого изменяется в зависимости от времени. Вселенная в форме 3-сферы исходно имеет нулевой радиус в момент, соответствующий Большому взрыву (внизу). Затем она постепенно расширяется, пока величина окружности не достигает максимума (в середине мяча), а после этого начинает сжиматься, в итоге коллапсируя до нулевого радиуса в момент, именуемый «Большое схлопывание». Мировые линии галактик – это геодезические линии, идущие вдоль швов мяча, начинающиеся в момент Большого взрыва и заканчивающиеся в момент Большого схлопывания. Эти мировые линии максимально прямые. По такой линии можно провезти грузовичок от начала до конца, не прикасаясь к рулю. Здесь эйнштейновские уравнения предстают во всей красе. Пространство искривляется под действием масс галактик, и из-за кривизны пространства изгибаются сами швы на мяче – то есть мировые линии этих галактик. Чем выше мы поднимаемся от нижнего кончика мяча, тем сильнее расходятся швы, но из-за общей кривизны поверхности мяча эти линии вновь сходятся воедино к моменту Большого схлопывания. При Большом взрыве все галактики разлетаются в стороны друг от друга. Но из-за гравитационного притяжения (кривизны) это расширение останавливается на мгновение в самой середине описываемого процесса (это экватор мяча) и, наконец, в верхней части мяча галактики устремляются друг к другу. Расстояние между галактиками постепенно уменьшается, вместе с этим начинает сужаться и окружность Вселенной. Все галактики сталкиваются вместе в момент Большого схлопывания. Не хотелось бы в тот момент оказаться в их толчее! Когда кривизна становится бесконечной, мы врезаемся в сингулярность Большого краха, подобную сингулярности черной дыры.

Должен подчеркнуть, что в данном случае реальна лишь сама поверхность мяча. Не существует ни внутренней полости этого мяча, ни пространства вокруг него. Мы просто вычерчиваем такой мяч в

пространстве высших измерений, чтобы его можно было визуализировать.

Время начинается с Большого взрыва – это сингулярность с бесконечной кривизной. Мы начали разговор о Большом взрыве в главе 14. Что было до Большого взрыва? Этот вопрос не имеет смысла в рамках общей теории относительности, поскольку и время, и пространство возникли в момент Большого взрыва. Не больше смысла в вопросе «А что находится к югу от Южного полюса?» Если идти все время на юг и на юг, то в конечном итоге окажешься на Южном полюсе. Но дальше забраться не сможешь. Аналогично, если углубляться все дальше и дальше в прошлое, то так можно добраться до Большого взрыва. В этот момент родились время и пространство, поэтому Большой взрыв – самое первое мгновение в истории. Аристотель считал Вселенную бесконечно древней, так как не приходится спрашивать, с чего она началась; если у нее было начало, первопричина, то придется объяснять: а что вызвало эту первопричину? Этот момент беспокоил Аристотеля. Эйнштейну и Ньютону также нравились бесконечно древние Вселенные. Но Вселенная Фридмана началась с Большого взрыва в какой-то конкретный момент в прошлом, когда возникли и время, и пространство.

Хотя Фридман опубликовал эти решения в 1922 году, они остались практически незамеченными. Эйнштейн считал, что у Фридмана получилось интересное математическое решение его уравнений поля, но реальная Вселенная соответствует именно статической модели. Затем, как мы рассказывали в главе 14, в 1929 году Хаббл открыл расширение Вселенной. Согласно модели Фридмана, Вселенная должна была либо расширяться, либо сжиматься. Теперь Хаббл выяснил, что мировые линии галактик действительно удаляются друг от друга. В каком положении мы тогда оказываемся согласно фридмановской модели? Мы должны быть в нижней части вертикально расположенного мяча, на этапе взаимного удаления галактик, пока их мировые линии расходятся. Собрав к 1931 году новые данные, Хаббл и Хьюмасон обнаружили, что далекие галактики разлетаются от нас со скоростью до 20 000 км/с – факт расширения Вселенной получил железобетонное подтверждение.

Эйнштейн, узнав в 1931 году о результатах работы Хаббла, сказал Георгию Гамову, что «введение космологической постоянной было его величайшей ошибкой». Почему? Никто не обратил на статью Фридмана никакого внимания. Но, предположим, что Эйнштейн не придумал бы космологическую постоянную; в таком случае ему пришлось бы отвергнуть статическую модель и, возможно, он открыл бы фридмановскую модель сам. Если бы Эйнштейн опубликовал такие же выкладки, что и Фридман,

то к нему бы прислушался весь мир. Эйнштейн мог оказаться тем единственным, кому было бы под силу предугадать: Вселенная не должна быть статической, напротив, она должна либо расширяться, либо сжиматься. Затем, когда Хаббл открыл расширение Вселенной, этот факт дополнительно подкрепил бы эйнштейновскую общую теорию относительности. Это был бы величайший триумф Эйнштейна. Не забывайте, никто ранее не рассуждал о расширяющейся Вселенной. Возник бы вопрос: *куда* она расширяется? Но в теории Эйнштейна само искривленное пространство может быть расширяющимся. Оно не расширяется ни во что (не существует ни полости внутри мяча, ни окружающего его пространства), а просто растягивается. Пространство соединяет все галактики, и само пространство увеличивается. Занятно. Учитывая все это, Эйнштейн назвал космологическую постоянную своей величайшей ошибкой. Позже, в главе 23, я расскажу, почему Эйнштейн, живи он в наши дни, мог бы пересмотреть эту оценку.

Фридмановская модель не единственная потенциально вообразимая конструкция, в которой присутствует лишь обычная материя (и отсутствует темная). Какова наиболее общая модель такого типа, которую можно было бы построить? Вселенная кажется нам изотропной (одинаковой во всех направлениях). Хаббл видел во всех направлениях одинаковое количество галактик и наблюдал, что они разбегаются от нас во все стороны. Теперь, следуя логике Майкла, изложенной в главе 14, можно предположить, что мы находились в самом центре великого взрыва. Если бы мы располагались чуть в стороне, то заметили бы в направлении центра галактик больше, чем в с противоположной стороны. Но будь мы в самом центре, следовало бы ожидать, что во все стороны от нас должны разлетаться примерно равные количества галактик. Правда, после Коперника в подобное уже не верится. Нет, мы не могли оказаться в той единственной галактике, которая расположена в самом центре и от которой разлетаются все остальные галактики. Из принципа Коперника, согласно которому мы не можем занимать во Вселенной какое-либо привилегированное положение, следует, что Вселенная должна выглядеть изотропной для любого наблюдателя, в какой бы галактике он ни находился (иначе наше место оказалось бы особенным). Из очень далекой галактики Вселенная также должна выглядеть изотропной. Когда всем наблюдателям Вселенная представляется одинаковой во всех направлениях, это и означает, что Вселенная является однородной.

Если бы плотность галактик в одной области была выше, чем в другой, то наблюдатель, находящийся близ этой области, видел бы больше галактик

в направлении нарастания плотности, нежели в противоположном направлении, и открывающаяся ему картина не была бы изотропной. Естественно, в сравнительно небольших масштабах заметны скопления галактик, но в крупномасштабной структуре Вселенной число галактик в разных направлениях одинаково. Следовательно, именно в самых крупных масштабах Вселенная должна быть изотропной и однородной. Единственный класс однородных и изотропных моделей в общей теории относительности, – это модели с *однородной кривизной*. Если бы в одной области кривизна была выше, чем в другом, то картина не выглядела бы одинаковой для любого наблюдателя во всех направлениях. В изотропной модели нет выделенных направлений, и кривизна должна по всем направлениям иметь одно и то же значение. Одно из таких решений – фридмановская Вселенная, вписанная в 3-сферу; у нее однородная положительная кривизна. Ее кривизна такая же, как у сферы (2-сферы), и в 3-сферической Вселенной, вероятно, не должно быть никаких особых точек или приоритетных направлений.

Карл Фридрих Гаусс определил кривизну двумерной поверхности как $1/r_1r_2$, где r_1 и r_2 – главные радиусы кривизны. Сфера обладает гауссовой кривизной $1/r_0^2$, где r_0 – радиус сферы. У обоих радиусов кривизны одинаковый знак, поскольку если вы, к примеру, сидите на вершине сферы, то все геодезические – идущие как влево и вправо, так и вперед и назад – искривляются вниз. Минус на минус (загибание книзу) дает плюс, поэтому произведение r_1r_2 положительно, и величина $1/r_1r_2$ также положительна. Следовательно, сферическая поверхность всегда обладает положительной кривизной.

Но остается еще два варианта: нулевая или отрицательная кривизна. Во-первых, в некоторую эпоху Вселенная могла иметь геометрию с нулевой кривизной, то есть быть плоской как бесконечная плоскость (называя такую Вселенную «плоской», мы имеем в виду, что она «неискривленная», а не двумерная, как Флатландия. Это бесконечная трехмерная Вселенная, подчиняющаяся законам евклидовой стереометрии). Такая Вселенная является бесконечно протяженной и содержит бесконечное количество галактик (и не имеет центра, см. главу 14).

В третьем случае мы имеем дело с *отрицательной* кривизной. В некоторую эпоху Вселенная могла обладать отрицательной кривизной и имела бы при этом седловидную форму. В поперечном направлении седло загибается книзу, чтобы на нем было удобно сидеть, но в продольном направлении загибается кверху, чтобы оно плотнее прилегало к спине и

шее лошади. Следовательно, кривизна седла в двух этих направлениях противоположна, а поскольку минус на плюс дает минус, величина $1/r_1r_2$ в данном случае отрицательна. Если нарисовать на седле круг, то длина окружности будет больше $2\pi r$, тогда как в случае со сферой, рассмотренном выше, окружность была бы меньше $2\pi r$. Если бы вы продвинулись по седлу на расстояние r от исходной точки, то, обходя окружность, вы поднимались бы или опускались. Таким образом, окружность в данном случае длиннее $2\pi r$, а на плоскости равна $2\pi r$.

Поверхность с отрицательной кривизной также дает бесконечную Вселенную, в которой содержится бесконечное множество галактик. В случае с отрицательной кривизной перед нами *гиперболическая Вселенная*, изображенная на рис. 22.6. Это чашевидная поверхность, лежащая в обычном плоском пространстве-времени из специальной теории относительности. На этом рисунке время откладывается по вертикали, будущее расположено сверху. Также мы показываем два пространственных измерения, обозначенных двумя горизонтальными стрелками.

Рис. 22.6. Гиперболическая поверхность с отрицательной кривизной (голубая) в обычном пространстве-времени. Время откладывается по вертикали, будущее расположено сверху. Также здесь показаны два пространственноподобных измерения – это горизонтальные оси. Иллюстрация адаптирована из Lars H. Rohwedder

Если отправиться в путь из центральной точки на дне чаши и измерить

ее рулеткой вплоть до окружности верхнего края, то окажется, что длина радиуса, проведенного по этой поверхности, неожиданно мала по сравнению с длиной окружности. Дело в том, что ваша рулетка не только разворачивается в пространстве, но и движется во времени, захватывая поверхность чаши. Измеренное расстояние оказывается короче из-за отрицательного члена – dt^2, вычитаемого из расстояния ds^2, которое покрывает рулетка. Если провести радиус по внутренней поверхности чаши, то он получится коротким относительно окружности или, наоборот, окружность окажется длинной по сравнению с радиусом – такова характерная черта отрицательной кривизны. (Седло – это модель, хорошо иллюстрирующая увеличенное соотношение длины и радиуса окружности, но на седле есть конкретные направления – продольное и поперечное, которых нет в гиперболической Вселенной. Она одинакова во всех направлениях.) Такая гиперболическая поверхность продолжается до бесконечности, имеет бесконечный объем, и в такой Вселенной содержится бесконечное количество галактик. Фридман исследовал модель такого типа в 1924 году и обнаружил, что она начинается с Большого взрыва, а затем вечно расширяется. Позже Говард Робертсон исследовал плоскую Вселенную (случай с нулевой кривизной) и обнаружил, что такая модель также начинается с Большого взрыва и вечно расширяется.

Подытожим (табл. 22.1). Во Вселенной с положительной кривизной сумма углов треугольника, вычерченного в конкретную эпоху, превышает 180°. Во Вселенной с отрицательной кривизной сумма углов треугольника, вычерченного в конкретную эпоху, будет меньше 180°. Фридмановская Вселенная с положительной кривизной конечна в пространстве и во времени. Она замыкается в пространстве сама на себя, образуя цельную поверхность, а также заканчивается во времени – в финале ее ждет Большое схлопывание. Плоская и отрицательно искривленная фридмановские Вселенные бесконечны в пространстве, содержат бесконечные количества галактик и при этом также бесконечны во времени – они вечно расширяются в будущее.

Таблица 22.1. Свойства фридмановских моделей Большого взрыва

Модель	3-сфера	Плоская	Гиперболическая
Кривизна	Положительная	Нулевая	Отрицательная
Длина окружности	$< 2\pi r$	$= 2\pi r$	$> 2\pi r$
Сумма углов треугольника	$> 180°$	$= 180°$	$< 180°$
Количество галактик	Конечное	Бесконечное	Бесконечное
История расширения	Сначала расширяется, потом сжимается, и все заканчивается Большим схлопыванием	Расширяется вечно	Расширяется вечно

После того как Пензиас и Уилсон открыли в 1965 году реликтовое излучение, ученые принялись выяснять, какая из этих моделей наиболее точно описывает именно нашу Вселенную. Актуальные данные, полученные от спутников «Планк» и WMAP, свидетельствуют в пользу модели с нулевой кривизной с точностью выше 1 %. Но выяснилось, что динамика Вселенной сложнее, чем предполагал Фридман. После того как наблюдения Хаббла подтвердили расширение Вселенной, спрогнозированное в моделях Фридмана, осталось несколько загадок. На самом ли деле до Большого взрыва не было ничего? Что спровоцировало Большой взрыв? Как космический микроволновый фон получился настолько однородным, насколько свидетельствуют наблюдения? Поиск ответом на эти вопросы заставляет нас пересмотреть самую раннюю историю Вселенной.

Глава 23
Инфляция и новейшие космологические исследования

Автор: Дж. Ричард Готт

В этой главе речь пойдет о самой ранней истории Вселенной – на этапе Большого взрыва и даже раньше. Как я уже рассказывал, в 1948 году Георгий Гамов размышлял, как должна была выглядеть Вселенная в первые секунды существования. Гамов рассудил, что примерно на момент Большого взрыва Вселенная должна была быть сильно сжатой, при этом очень жаркой и наполненной тепловым излучением. По мере расширения Вселенной это излучение остывает.

Эту картину можно объяснить на примере фридмановской модели Вселенной как 3-сферы. В любую эпоху ее окружность конечна, и по мере того как эта Вселенная в 3-сфере расширяется, длина ее окружности увеличивается. Предположим, фотоны облетают этот контур по кругу подобно гоночным машинам, идущим по кольцевому треку. Окружность трека со временем увеличивается, и в то же время машины постоянно гонятся друг за другом по треку. Допустим, 12 фотонов рассредоточены по кольцевому треку с равными промежутками, как 12 чисел на циферблате. Трек расширяется, но машины летят по нему с прежней скоростью – скоростью света. Если на старте они рассредоточены по треку с равными промежутками, когда от любой машины до другой, идущей перед ней, будет 1/12 окружности циферблата, то и при расширении трека они останутся равноудалены друг от друга. Все машины одинаково мощны, поэтому ни одна не будет догонять ту, что идет перед ней, не будет и отставать, сближаясь с машиной, идущей сзади. Если при увеличении окружности трека машины остаются равноудалены друг от друга, то расстояние между ними будет возрастать. Если длина трека удвоится, то удвоятся и расстояния между машинами. Теперь представьте себе электромагнитную волну, обегающую окружность по часовой стрелке. Каждый из 12 фотонов можно разместить на одном из гребней волны. И фотоны, и гребни волны будут двигаться со скоростью света, поэтому при движении волны фотоны так и будут оставаться на гребнях. Следовательно, по мере увеличения окружности трека расстояние между гребнями волны

возрастает с таким же коэффициентом. При удвоении размера Вселенной удваивается и длина волны (расстояние между двумя соседними гребнями).

Вот почему при расширении Вселенной свет претерпевает красное смещение: само пространство растягивается. Такое красное смещение означает, что жаркое тепловое излучение юной Вселенной будет остывать (длина волны станет увеличиваться) по мере расширения Вселенной. Ученики Гамова Роберт Херман и Ральф Альфер рассчитали, каковы были ядерные реакции, протекавшие в первые три минуты, и сопоставили их с содержанием дейтерия в современной Вселенной. Таким образом они смогли вычислить, какую температуру первичное излучение должно иметь сегодня, если Вселенная равномерно расширялась с самого зарождения. У них получилась величина 5 К. В главе 15 мы рассказали, как Роберт Дикке из Принстона пришел к такой же аргументации, сделал схожие выводы и решил поискать такое излучение. Но группу Дикке опередили Пензиас и Уилсон.

Когда в 1989 году был запущен спутник COBE (Исследователь космического фонового излучения), при помощи которого планировалось подробно измерить реликтовое излучение (РИ), аппарат показал, что спектр этого излучения практически неотличим от спектра абсолютно черного тела (как и прогнозировал Гамов), а температура самого излучения составляет 2,725 К. В 2006 году Джордж Смут и Джон Мазер были удостоены Нобелевской премии по физике за свои исследования, выполненные при помощи COBE.

Прогноз Гамова и Альфера о существовании РИ, а также сделанная Альфером и Херманом оценка, по которой температура этого излучения должна была составлять 5 К, – это одно из наиболее замечательных предсказаний в истории науки, которое впоследствии подтвердилось. Все равно как если бы мы сказали: «На лужайке перед Белым домом приземлится пятнадцатиметровая летающая тарелка», а там раз – и садится девятиметровая! Так было получено важное подтверждение коперниковского принципа заурядности, согласно которому наше местоположение должно быть ничем не примечательно. Учитывая хаббловские наблюдения изотропии, коперниковский принцип прямо подводит нас к однородным, изотропным фридмановским решениям эйнштейновских уравнений поля, предполагающим, что Вселенная началась с Большого взрыва. Именно на основе таких решений Гамов с коллегами и предположили о существовании реликтового излучения.

Получившаяся в результате фридмановская модель, начинавшаяся с Большого взрыва, оказалась исключительно успешной, но так и не давала

ответов на некоторые вопросы. Наша Вселенная началась с Большого взрыва, но что было до Большого взрыва? Дежурный ответ (который мы дали в главе 22) таков: и время, и пространство возникли при Большом взрыве, поэтому никакого времени до Большого взрыва не было. Кроме того, возникал вопрос: почему Большой взрыв получился столь однородным? Рассматривая космический микроволновый фон в разных направлениях, обнаруживаем, что РИ везде одинаково с точностью 1: 100 000. Откуда все эти различные области «догадались», какая температура у них должна быть? Та картина, которую мы наблюдаем, отдалена от нас в пространстве на 13,8 миллиарда световых лет. При этом рассматриваемая эпоха наступила всего через 380 тысяч лет. Согласно стандартной модели Большого взрыва, на эту область могла влиять лишь материя, которая удалена от нее не более чем на 380 тысяч лет. Но если взглянуть на 13,8 миллиарда световых лет в противоположном направлении, на 180° от первого, то увидим совсем другую область, имеющую практически такую же температуру, что и первая. В стандартной модели Большого взрыва эти две области, расположенные в противоположных уголках неба, на рассматриваемый момент (то есть через 380 тысяч лет после Большого взрыва) отстояли друг от друга на 86 миллионов световых лет и не могли обменяться никакой информацией за те ничтожные 380 тысяч лет, что успели просуществовать. Обычно, если вы видите две области с одинаковой температурой, это означает, что они сообщаются друг с другом и в результате достигают термодинамического равновесия. Но в стандартной модели Большого взрыва сильно удаленные области космического микроволнового фона просто не успели бы сконтачиться друг с другом. Согласно фридмановской модели, в различных регионах Вселенной должно было чудесным образом начаться однородное расширение, причем всюду при одинаковой температуре. Как могла возникнуть такая однородность?

Однако COBE также обнаружил небольшие флуктуации микроволнового фона, в соотношении примерно 1: 100 000. Если бы Вселенная была совершенно однородной, в ней не возникло бы никаких сгустков, из которых впоследствии могли бы сформироваться галактики и их скопления. Мы обязаны своим существованием именно тому, что в новорожденной Вселенной сразу были небольшие флуктуации, которые под действием гравитации разрослись в наблюдаемые сегодня галактики. Вселенная должна была оказаться почти идеально однородной, но все же лишь почти. Это казалось тайной. Мне она напоминает старую присказку времен Великой депрессии: «Эх, был бы у нас бекон – мы тогда могли бы

позавтракать яичницей с беконом, конечно, если бы у нас были яйца!» Сначала требуется объяснить общую однородность, а затем – небольшие флуктуации.

В 1981 году Алан Гут предложил решение данной проблемы. Он построил модель, в которой развитие Вселенной началось с краткого периода ускоренного расширения; этот период он назвал *инфляцией*. На пространственно-временной диаграмме инфляция напоминает маленькую воронку, направленную вверх подобно подставке для подачи в гольфе, и на этой подставке стоит мяч фридмановского пространства-времени. Конструкция начинается с конечного размера окружности у основания, а затем резко расширяется и переходит в чашевидный раструб. Там, где мы раньше рисовали нижний кончик фридмановского мяча, теперь будет раструб и внизу – окружность конечного размера. Возможно, ее величина всего 3×10^{-27} см (рис. 23.1). Период, соответствующий этому раструбу, продолжается чуть за пределы самого Большого взрыва, но за это дополнительное время различные области, которые мы сегодня наблюдаем, успевают провзаимодействовать друг с другом. На первом этапе окружность настолько мала, что между различными областями устанавливается причинно-следственная связь, а затем, в период, соответствующий раструбу, они ускоренно разлетаются; и это только кажется, будто времени на взаимодействие у них было недостаточно.

Рис. 23.1. Инфляционное зарождение (раструб) фридмановской Вселенной Большого взрыва (мячик). Снимок предоставлен Дж. Ричардом Готтом

На основании чего Гут предложил такую модель? Он думал, что в ранней Вселенной могло существовать состояние вакуума с высокой плотностью энергии – и, следовательно, с высоким отрицательным давлением, которое напоминало бы по свойствам то пустое пространство, в котором, по мысли Эйнштейна, действовала космологическая постоянная. Мы привыкли думать, что плотность вакуума должна быть нулевой. Да, она и будет нулевой, если убрать из пространства все частицы и все излучение. Но вакуум может обладать плотностью энергии, обусловленной присутствием полей, например поля Хиггса, которое пронизывает Вселенную. Реально количество энергии вакуума зависит от законов физики. Гут считал, что в юной Вселенной сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия были слиты в одну суперсилу и энергия вакуума в те времена (при других законах физики) могла быть гораздо выше нынешней. Следовательно, на практике космологическая постоянная не была константой (как предполагал Эйнштейн), а могла меняться со временем. На самом раннем этапе существования Вселенной плотность энергии вакуума могла быть весьма высокой. Вдобавок к этой высокой

плотности энергии действовало сильное отрицательное давление, обеспечивая, чтобы в соответствии со специальной теории относительности, энергия вакуума казалась одинаковой разным наблюдателям, движущимся через пространство с разными скоростями. Как уже говорилось, энергия вакуума порождает притяжение, но отрицательное давление, действующее в трех измерениях, дает в 3 раза более сильное гравитационное отталкивание. Именно оно, согласно уравнениям Эйнштейна, должно было запустить ускоренное расширение Вселенной, которое пытался объяснить Гут. Именно гравитационное отталкивание послужило причиной первичного расширения, которое мы именуем «Большой взрыв».

На самом деле, такое «раструбное» решение эйнштейновских уравнений поля еще в 1917 году нашел Виллем де Ситтер. Он решил их для случая абсолютно пустого пространства, где действует ксмологическая постоянная и ничего больше. В отсутствие обычной материи, которая могла бы амортизировать гравитационное отталкивание, обусловленное космологической постоянной, такое решение привело де Ситтера к модели Вселенной, которая расширялась с ускорением. Все это решение было названо *деситтеровским пространством*. Такое пространство-время представляет собой Вселенную в виде 3-сферы, рождающуюся с бесконечным радиусом в бесконечно далеком прошлом. Сфера сжимается почти со скоростью света. Но гравитационное отталкивание, эффект космологической постоянной, постепенно затормаживает сжатие, пока оно не останавливается на минимальном радиусе – это талия с наименьшей окружностью – и затем начинает расширяться. Эффект гравитационного отталкивания нарастает, поэтому она расширяется все быстрее. В итоге скорость расширения вплотную приближается к скорости света, и в бесконечно далеком будущем такая Вселенная достигает бесконечного размера. Пространственно-временная схема де-ситтеровского пространства напоминает корсет с узкой талией (рис. 23.2). На схеме показано одно пространственное измерение (вдоль горизонтальной окружности) и время (по вертикали). Будущее находится сверху. Юбка снизу – это этап сжатия, а талия посередине – это минимальный радиус Вселенной. Затем Вселенная расширяется и сверху напоминает раструб.

Как и в пространственно-временной модели Фридмана, здесь нас интересует лишь сама поверхность, похожая на корсет. Нет ничего ни внутри, ни извне. Реальна лишь сама поверхность. Корсетообразное пространство-время обладает круглыми горизонтальными поперечными сечениями, каждому из которых соответствует конкретный момент

времени. Каждое сечение – это окружность вписанной в 3-сферу Вселенной в отдельно взятый момент. Снизу эти окружности велики, посередине минимальны, а выше середины начинают увеличиваться. Так Вселенная, находящаяся в 3-сфере, сначала сужается, а затем расширяется. Вертикальные «корсетные стержни» – это потенциально возможные мировые линии частиц. Это прямые геодезические линии – грузовичок может проехать по такой линии на поверхности корсета, никуда не сворачивая.

Рис. 23.2. Пространственно-временная схема де-ситтеровского пространства. Как и на рис. 22.4 и 22.5, здесь показано одно пространственное измерение и время. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом

Корсетные стержни постепенно сходятся в нижней половине, максимально сближаются в талии, а в верхней половине вновь устремляются друг от друга. В верхней половине частицы с ускорением разлетаются друг от друга, так на них действует кривизна пространства-времени. Когда частицы начинают удаляться друг от друга, их часы экспоненциально замедляются по мере приближения скорости частицы к скорости света. Их часы з.а…м….е…..д……л…….я……..ю…… т…….с……я. На последних ударах часов окружность расширяется до колоссальных размеров. Хотя на схеме показано, что на последних этапах пространство расширяется почти линейно на субсветовой скорости (образующие конуса наклонены под углом почти 45°), если судить по

часам, установленным на самих частицах, то по истечении каждого следующего временного интервала окружность должна казаться увеличивающейся вдвое по схеме: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, Получается экспоненциально ускоряющееся расширение. Процесс напоминает инфляционное увеличение денежной массы, поэтому Гут назвал его *инфляцией*.

Взгляните на талию. Это круг, соответствующий Вселенной, которая вписана в 3-сферу и находится в точке максимального сжатия. Не забывайте, что это 3-сфера. Крайнюю левую точку этого круга можно обозначить как «Северный полюс» этой Вселенной. Допустим, там живет Санта-Клаус. Рассмотрим корсетный стержень слева: это мировая линия Санта-Клауса, сидящего на Северном полюсе 3-сферной Вселенной. Другой стержень корсета, удаленный от него на 180°, у нас черный – это мировая линия пингвина, живущего на Южном полюсе. Санта-Клаус, чья мировая линия находится на Северном полюсе, никогда не увидит пингвина, живущего на Южном полюсе. Луч света, летящий от пингвина в бесконечность прошлого, устремится влево и вверх под углом 45°. Он по диагонали пройдет вверх по передней поверхности корсета, как перевязь, но при этом так и не достигнет мировой линии Санта-Клауса, проходящей слева. В такой Вселенной есть горизонты событий. Санта-Клаус никогда не увидит, что происходит с пингвином, то есть он не сможет заглянуть выше и правее этой перевязи. Допустим, недалеко от Санта-Клауса живет ребенок, его мировая линия также отмечена на рис. 23.2. Лучи света, отражающиеся от этого ребенка, могут долететь до Санта-Клауса. Спустя значительное время Санта-Клаус увидит, как этот ребенок с ускорением удаляется от него. Свет, отражающийся от ребенка, будет приобретать все более выраженное красное смещение. Если ребенок отправит Санта-Клаусу сообщение: «У МЕНЯ ВСЕ ХОРОШО», то Санта-Клаус получит лишь «У МЕ..Н….Я…» Он так и не получит «ВСЕ ХОРОШО». Сигнал «ВСЕ» летит прямо по перевязи под углом 45° и никогда его не достигнет. Санта-Клаусу покажется, что ребенок падает в черную дыру. Когда мировая линия ребенка пересечет перевязь, расположенную под углом 45° (для Санта-Клауса это горизонт событий), сигналы от ребенка перестанут долетать до Санта-Клауса. Пространство между Санта-Клаусом и ребенком попросту раздвигается настолько стремительно, что сигнал «ХОРОШО», испущенный по другую сторону от спирали, не сможет покрыть постоянно возрастающее расстояние между Санта-Клаусом и ребенком. Это не противоречит специальной теории относительности. Она попросту утверждает, что ни один космический корабль не может пролететь мимо вас

со сверхсветовой скоростью. Но общая теория относительности допускает, что само пространство может расширяться настолько быстро, что свет не покроет постоянно расширяющийся пробел. Деситтеровское пространство-время позволяет понять, как частицы могут близ талии войти в контакт друг с другом и достичь термодинамического равновесия, а затем разлететься на огромные расстояния.

В сухом остатке Гут предполагал следующее: деситтеровская Вселенная возникает на талии и сначала напоминает маленькую окружность диаметром, возможно, не более 3 × 10–27 сантиметров. Он исключил из своей модели этап бесконечного сжатия (нижнюю половину полного пространства-времени). Ему требовалось на старте просто немножечко высокоплотного вакуума. Эффект отталкивания, обусловленный высоким отрицательным давлением, запускает постоянно ускоряющееся расширение пространства, так что Вселенная удваивается в размерах каждые 10–38 секунды. Такая Вселенная становится колоссальной. В ходе расширения Вселенной плотность энергии в таком вакууме повсюду остается одинаковой. Космологическая постоянная остается неизменной. Небольшая область с высокой плотностью энергии расширяется и превращается в крупную область с такой же высокой плотностью энергии.

Любопытно, но локальный закон сохранения энергии в данном случае не нарушается. Если бы у нас была емкость, наполненная высокоплотной жидкостью с отрицательным давлением, то для расширения емкости ее стенки потребовалось бы тянуть в стороны, преодолевая отрицательное давление, противодействующее расширению. Та работа, которую я бы проделывал при таком растягивании, сопротивляясь отрицательному давлению (всасыванию), насыщала бы жидкость энергией, и эта энергия позволяла бы держать плотность на все том же высоком уровне, несмотря на расширение емкости. Таким образом, локально энергия бы сохранялась. Но какая сила во Вселенной растягивает таким образом стенки моей емкости? Все дело просто в отрицательном давлении, оказываемом на нее другими подобными пространственно-временными емкостями вокруг. Если давление по всей Вселенной однородно, то его хватает на выполнение этой работы.

В общей релятивистской космологии глобального сохранения энергии не существует, поскольку нигде нет той «основы», которая позволила бы задать стандарт. Следовательно, при отрицательном давлении общее содержание энергии во Вселенной в условиях отрицательного давления могло возрастать. Поэтому Гут смог построить свою модель начав с

небольшой области высокоэнергетического вакуума, который затем разросся до огромной Вселенной с ровно такой же плотностью вакуума. Таким образом, это состояние вакуума оказалось «самовоспроизводящимся», экспоненциально разрастающимся из крошечной точки. Поэтому Гут утверждал, что «бесплатный сыр» Вселенной все-таки достался. Рано или поздно плотность вакуума должна была снизиться, это произошло после разделения сильного и слабого взаимодействий. Когда энергия вакуума в пустом пространстве упала, избыток энергии выплеснулся в форме образования элементарных частиц. Они заполнили Вселенную в состоянии термодинамического равновесия..

Именно здесь инфляционный раструб юной Вселенной смыкается с нижней частью фридмановской модели Большого взрыва, напоминающей по форме мячик. После этого расширение Вселенной начинает замедляться, как в мячиковой модели. Теперь давление превращается в обычное тепловое давление частиц, а оно положительно. Мировые линии, разбегающиеся на этапе раструбной инфляционной эпохи (например, мировые линии Санта-Клауса и ребенка), вновь устремляются друг к другу, когда начинается фридмановский этап с замедлением. Инфляция показала, как могут естественным образом сложиться исходные условия фридмановской модели Большого взрыва. Эффект гравитационного отталкивания, присущий исходному состоянию вакуума (и связанный с отрицательным давлением последнего), спровоцировал Большой взрыв! Большой взрыв мог начаться и не с сингулярности, а с небольшой области с высокоплотным вакуумом. Инфляция позволяет объяснить, почему Вселенная столь велика и при этом так однородна. Также с ее помощью можно объяснить небольшие флуктуации, наблюдаемые в соотношении 1: 100 000. Эти небольшие случайные флуктуации вызваны принципом неопределенности Гейзенберга. В самом начале Вселенная удваивалась в размерах каждые 10^{-38} секунды; при таких кратких промежутках времени принцип неопределенности гарантированно дает в любом поле случайные флуктуации энергии. На самом деле, ячеистая структура скоплений галактик, наблюдаемая в современной Вселенной, – «*космическая паутина*», а также распределение сравнительно теплых и сравнительно холодных участков РИ указывают, что исходные условия были случайными именно в той мере, в какой это могли бы обеспечить квантовые флуктуации, прогнозируемые в рамках инфляционной теории (см. мою книгу «Космическая паутина (*Cosmic Web* [2016])).

Однако в инфляционной теории была одна проблема, которую Гут понимал. Вряд ли высокоэнергетическое состояние вакуума могло

распасться на элементарные частицы везде и сразу. Такое инфлирующее высокоплотное море должно было распадаться на пузыри со сравнительно неплотным вакуумом, этот феномен исследовал Сидни Коулман. Ситуация напоминает кипение воды в кастрюле. Вода не испаряется вся и сразу. В воде образуются пузырьки пара. Но тогда получается неоднородное распределение, не та ровная Вселенная, которую мы надеемся увидеть. Гут обозначил данный факт как проблему. В 1982 году я предположил, что инфляция должна порождать вселенные-пузырьки, причем каждый пузырек может расшириться до размеров отдельной вселенной, такой как наша (рис. 23.3).

В моей теоретической модели мы живем внутри одного из пузырей с низкой плотностью вакуума. Я отметил, что если после формирования этого пузыря потребовалось некоторое время на рассасывание плотного вакуума, то такое рассасывание происходило бы на гиперболической поверхности и у нас получилась бы однородная гиперболическая фридмановская космология (вспомните рис. 22.6). Изнутри пузыря мы смотрим во все стороны в пространстве и смотрим в прошлое во времени, поэтому видим просто нашу пузырьковую Вселенную и однородное инфлюирующее море, из которого она родилась. Для нас все выглядит одинаково, так и решается проблема однородности, сформулированная Гутом. Пузырь расширяется почти со световой скоростью. Но инфлирующее море разрастается так быстро, что кипящие пузыри никогда не успевают заполнить все пространство. Постоянно образуются новые пузырьковые вселенные, а между ними продолжает расширяться инфлирующее море, освобождающее пространство для все новых пузырьковых вселенных. Я представил себе бесконечное множество пузырьковых вселенных, постоянно образующихся в вечно расширяющемся инфлюирующем море, – такой феномен сегодня именуется «*Мультивселенная*» (или «Мультиверс»)[39]. Внутри таких пузырьковых вселенных должна возникать отрицательная кривизна, и эти вселенные должны вечно расширяться. Это будут гиперболические фридмановские вселенные. Поверхности постоянной эпохи будут гиперболическими и вложенными в расширяющиеся пузыри. «*Поверхность постоянной эпохи*» характеризуется тем, что если установить будильник на каждой элементарной частице на этой поверхности, все будильники будут идти синхронно, начиная с момента формирования пузыря. Поверхность гиперболическая, поскольку чем быстрее летит частица, тем медленнее тикают установленные на ней часы и, следовательно, момент срабатывания часов наступает позже (ср. с рис.

22.6). Получается бесконечно протяженная гиперболическая поверхность, загибающаяся кверху по стенкам расширяющегося пузыря (рис. 23.3). В конце концов, когда в бесконечно далеком будущем пузырь достигнет бесконечного размера, в нем возникнет бесконечное количество галактик, следовательно, бесконечное количество пузырьковых вселенных из исходного миниатюрного и высокоплотного деситтеровского пространства.

Все это звучит странно. Как можно получить бесконечное количество вселенных, каждая из которых в конечном счете бесконечно велика, – из конечного исходника? Деситтеровское пространство напоминает обычную трубу, раструб которой направлен вверх. Горизонтальный срез, проходящий через талию деситтеровского пространства у устья трубы, – это круг. Это маленькая конечная вселенная, вписанная в 3-сферу, у нее конечная окружность и конечный объем, как та, которую рассматривал Эйнштейн. Но верхняя часть трубы напоминает по форме конус, а конус можно нарезать кругами, гиперболами или параболами, в зависимости от того, как резать. Если нарезать деситтеровское пространство по горизонтали, получается круг – это вселенная, вписанная в 3-сферу. Если резать под углом 45°, то получается парабола и бесконечная плоская вселенная. Если нарезать вертикальной плоскостью, то получается гипербола – бесконечная вселенная с отрицательной кривизной. История напоминает старую притчу о трех слепцах и слоне. Первый слепец щупает хобот и говорит, что слон похож на змею. Другой щупает ногу и говорит, что слон похож на ствол дерева. Третий щупает бок и говорит, что слон напоминает стену. Аналогично, форма деситтеровского пространства зависит от того, как его сегментировать. Можно сделать во вселенной-пузырьке такой гиперболический сегмент, который будет простираться до бесконечности, обозначить эпоху, в которую заканчивается существование деситтеровского вакуума и энергия сбрасывается в виде частиц, после чего начинается фридмановская модель. Вспомните буханку, которую можно резать на ломтики разной формы – прямоугольные или треугольные. В данном случае реальна лишь сама буханка. Если рассмотреть пространственно-временную геометрию деситтеровского пространства для инфляционной модели, то выясняется, что оно начинается в виде конечной 3-сферной вселенной на талии и вечно расширяется, приобретая бесконечный объем. Такая замечательная геометрия пространства-времени, где инфляция продолжается вечно и пространство становится бесконечно велико, позволяет создать бесконечное количество бесконечных пузырьковых Вселенных в вечно расширяющемся море.

Рис. 23.3. Пузырьковые вселенные, образующиеся в инфлирующем море, – Мультивселенная. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, адаптирована из Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

В разных пузырьковых вселенных могут действовать различные законы физики, если считать, что разные пузыри соответствуют туннелированию и скатыванию в разные долины космического ландшафта, причем значения различных физических полей от долины к долине могут отличаться. Законы физики, действующие в нашей Вселенной, могут оказаться лишь локальными «нормативными актами», что подчеркивают в своих работах Андрей Линде и Мартин Рис.

Важное свойство деситтеровской инфляционной модели таково: она должна начинаться с талии. Нам не нужен этап бесконечного сжатия, предшествующий талии. Борде и Виленкин продемонстрировали почему: на этапе сжатия также будут формироваться пузырьки и, следовательно, пузырьки будут расширяться в сжимающемся пространстве: сравнительно неплотные пузыри будут сливаться друг с другом и заполнять пространство. В результате получится инфлирующее море, которое так и не достигнет талии, а значит, не перейдет к этапу расширения. Возникнет просто сингулярность Большого схлопывания; пузырьки не будут обладать

достаточной отрицательной энергией, чтобы на талии процесс пошел вспять. Итак, Борде и Виленкин пришли к выводу, что инфлирующая Мультивселенная начинается с конечного участка инфлирующего моря. Он может быть миниатюрным, всего 3×10^{-27} см. Это не «ничто», но, пожалуй, «почти ничто» в любом мыслимом приближении.

Плотность энергии вакуума можно сравнить с отметкой высоты на ландшафте. Данная высота соответствует плотности энергии вакуума, то есть плотности энергии пустого пространства. Различные участки местности соответствуют различным значениям полей (например, поля Хиггса), порождающих энергию вакуума. Различные местоположения (разные значения полей) соответствуют разным высотам (разным значениям плотности вакуума). В настоящее время плотность вакуума очень низкая – мы почти на уровне моря. Но в юной Вселенной плотность вакуума должна была быть велика, как будто Вселенная была заперта в высокогорной долине (рис. 23.4).

Если шар окажется в такой долине, то он, в конечном итоге, будет неустойчив. Есть более низкоэнергетическое состояние, куда он может скатиться, – уровень моря. Но шар может остаться в долине, если со всех сторон его окружают высокие горы. В ньютоновской Вселенной такой шар ни при каких условиях не может скатиться вниз, но известен процесс, именуемый «квантовое туннелирование», позволяющий шару проскочить через гору и покатиться к морю[40].

Рис. 23.4. Квантовое туннелирование. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, адаптирована из Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Георгий Гамов открыл процесс квантового туннелирования. Таким образом он объяснил деление ядра урана. При распаде ядра урана выделяется альфа-частица (ядро гелия, в котором два протона и два нейтрона). Альфа-частицу удерживает в ядре сильное ядерное взаимодействие, приковывающее эту частицу к другим протонам и нейтронам. Сильное взаимодействие напоминает горный кряж, опоясывающий долину и заключающий альфа-частицу внутри ядра.

Но сильное ядерное взаимодействие является короткодействующим; если бы альфа-частице удалось каким-то образом вырваться из ядра, преодолев сильное взаимодействие, то она могла бы ускользнуть. Альфа-частица положительно заряжена и, следовательно, положительно заряженный массив ядра стал бы ее отталкивать. Частица покатилась бы по склону в сторону от ядра, набирая кинетическую энергию за счет электростатического отталкивания. По измеренной энергии, которой обладает альфа-частица, испускаемая при делении ядра урана, ученые научились вычислять, насколько высоко на склоне она находилась перед падением. Оказалось, что частица начинает путь *вне*ядра урана! Как она туда попадает? Согласно квантовой механике, свет имеет корпускулярно-волновую природу, и такой же дуализм присущ другим объектам, которые мы называем «частицами», например альфа-частицам. В силу своей волновой природы альфа-частица не имеет четкой локализации, то есть подчиняется принципу неопределенности Гейзенберга. Гамов обнаружил небольшую вероятность того, что альфа-частица может «туннелировать» через ту гору, которая запирает ее в ядре, и внезапно оказаться далеко за пределами ядра, откуда она уже может покатиться вниз под действием электростатического отталкивания. Ситуация напоминает мне буддийский коан «*Как утке выбраться из бутылки?*» (горлышко которой слишком узкое). Ответ: «*А утка уже снаружи!*» Итак, квант альфа-частицы туннелирует через гору, и «альфа-частица уже снаружи». Вот второе достижение, за которое Гамов мог получить Нобелевскую премию.

В примере с пузырьковой вселенной на месте горной долины у нас будет первичная инфляционная вселенная (на талии деситтеровского пространства) с высокой плотностью вакуумной энергии. Вселенная была бы не прочь вечно расширяться, будучи в таком высокоэнергетическом состоянии, но спустя достаточное время возникнет шанс, что она

туннелирует через гору и покатится по склону к морю, высвобождая энергию своего вакуума в виде кинетической энергии, из которой будут рождаться обычные элементарные частицы. Такое туннелирование – это мгновенное формирование пузырька, плотность энергии вакуума в котором чуть ниже, чем за пределами пузырька. Отрицательное давление вне пузырька сильнее отрицательного давления внутри пузырька, и из-за разницы давлений стенки пузырька расширяются. Расширение происходит все быстрее и быстрее, пока, наконец, этот процесс не разгоняется до субсветовой скорости. Тем временем внутри пузырька плотность энергии вакуума постепенно снижается (катится с холма к морю). Пока пузырек катится со склона, инфляция в нем продолжается. Когда он скатится на берег моря и вся его вакуумная энергия растратится по пути на образование элементарных частиц, инфляция остановится и начнется фридмановский этап. Именно такой сценарий независимо друг от друга описали в своих статьях Андрей Линде, а также Андреас Альбрехт и Пол Стейнхардт вскоре после выхода моей работы. Вне пузыря состояние вакуума остается «высокогорным», и инфлюирующее море продолжает стремительно, с ускорением расширяться. Я затрагивал вопросы, связанные с геометрией и специальной теорией относительности в контексте образования пузырьковых вселенных (сегодня этот феномен называется «Мультивселенная»), а тем временем Линде, Альбрехт и Стейнхардт подробно расписали физику частиц, обеспечивающую возникновение пузырьковых вселенных. Я настаивал, что для появления привычной для нас Вселенной инфляция в пузырьковой вселенной должна была продолжаться некоторое время. В моделях Линде, Альбрехта и Стейнхардта этот процесс разворачивался естественным образом: пузырьку требовалось некоторое время, чтобы постепенно скатиться со склона на уровень моря. Позже, в 1982 году, Стивен Хокинг опубликовал статью, в которой поддержал идею пузырьковой вселенной и показал, что под действием инфляции квантовые флуктуации увеличатся настолько, что станут проявляться в космологических масштабах и приобретут ровно такую форму, которая требуется для зарождения во Вселенной галактик и их скоплений[41]. Впоследствии такую структуру удалось проследить как в РИ, так и в распределении галактик (о чем мы рассказывали в главе 15), и эти данные блестяще согласовались с прогнозом инфляционной теории.

Хотя и возможно, что в далеком будущем соседняя пузырьковая вселенная столкнется с нашей (это может произойти примерно через 10^{18000} лет, в таком случае в небе внезапно образуется жаркое пятно,

которое погубит любую жизнь, которая, возможно, будет существовать в тот момент), большинство остальных вселенных в составе Мультивселенной навечно скрыты от нас за горизонтом событий. Они настолько далеко, что исходящий от них свет не в состоянии преодолеть постоянно расширяющуюся область между нами и этими вселенными. Сегодня уже ясно, что как только инфляция начнется, остановить ее сложно. Инфляция будет продолжаться вечно, порождая Мультивселенную с бесконечным количеством вселенных, таких как наша. В 1983 году Линде предложил теорию *хаотической инфляции*, которая также описывает Мультивселенную, состоящую из разреженных «карманных» вселенных в вечно расширяющемся инфлирующем море. Разработанная Линде модель хаотической инфляции предполагает, что квантовые флуктуации обеспечивают свободное движение по ландшафту. Есть шанс, что квантовая флуктуация забросит вас на вершины холмов и гор, где плотность энергии вакуума высока. Плотность энергии нарастает с «высотой», а время, необходимое для удвоения размера, укорачивается вдвое. В «высотных» областях стремительно нарождается больше пространства с высокой плотностью вакуума, и темп инфляции здесь также выше. Следовательно, «высотные» области воспроизводятся быстрее. Здесь возможна аналогия: представьте себе, что горцы многодетнее жителей равнин. В таком случае спустя несколько поколений почти все люди будут жить в горах. Вся Мультивселенная будет расширяться очень быстро. Отдельные регионы могут скатываться в долины, превращаться в такие карманные Вселенные, как наша. Большая часть пространства будет находиться в стремительно расширяющихся горных районах, но постоянно будут образовываться пятнышки (карманные вселенные), скатывающиеся на уровень моря. Итак, нам совсем не обязательно начинать путь в горной долине. В обычном ландшафте всегда должны формироваться вселенные с низкой плотностью, такие как наша, а вокруг будет вечно расширяться Мультивселенная.

Пусть мы и не видим других вселенных, слагающих Мультивселенную, есть основания полагать, что они существуют, поскольку они кажутся неизбежным элементом теории инфляции, объясняющей массу эмпирических данных.

Инфляционная модель получила серьезную поддержку по результатам работы спутников WMAP и «Планк». Сила температурных флуктуаций РИ, наблюдаемых в различных угловых масштабах, в точности соответствует прогнозам инфляционной теории (вспомните рис. 15.3). Данные спутников WMAP и «Планк» также показали, что кривизна нашей Вселенной близка к нулю. В положительно искривленной Вселенной мы бы наблюдали меньше

пятен в космическом микроволновом фоне, поскольку окружность большого круга меньше $2\pi r$, значения из евклидовой геометрии. Если бы Вселенная имела отрицательную кривизну, то окружность была бы больше $2\pi r$, пятен было бы больше, они были бы мельче по угловому размеру, чем предполагает евклидова геометрия. Согласно наблюдениям, пик температурных флуктуаций приходится примерно на 1° в угловом масштабе. Это согласуется с моделью Вселенной, кривизна которой практически нулевая.

Таким образом, знак кривизны нашей Вселенной на самом деле неизвестен. Просто кривизна настолько мала, что ее не удается измерить. Согласно современным данным, видимая Вселенная является плоской с точностью чуть выше 1 %. Аналогично, баскетбольная площадка выглядит плоской, хотя мы и знаем, что она вписывается в кривизну Земли. Просто радиус Земли настолько превышает длину баскетбольной площадки, что ее кривизна практически незаметна. Как известно, в древности Земля считалась плоской, поскольку любой доступный для наблюдения участок Земли был настолько мал, что казался приблизительно плоским. Нам известно, что радиус кривизны Вселенной гораздо больше 13,8 миллиарда световых лет – расстояния, за которое мы не можем заглянуть. Гут подчеркивал: неважно, какова была изначальная форма Вселенной (положительной или отрицательной была ее кривизна); в любом случае, инфляция – простейшая модель, обеспечивающая расширение Вселенной до значительно больших масштабов, нежели у наблюдаемой нами части пространства. Гут предположил, что Вселенная окажется приблизительно плоской, – и был прав. Если наша Вселенная является пузырьковой, это попросту означает, что инфляция долгое время продолжалась внутри пузырька, пока состояние вакуума катилось вниз по склону после туннелирования. «Длительный» период инфляции, скажем 1000 удвоений в размере, мог уложиться всего в 10^{-35} с, если на каждый акт удвоения уходило 10^{-38} с. В таком случае современный радиус Вселенной должен в 10^{274} раз превышать размеры той ее части, которую мы можем наблюдать. Естественно, она должна казаться плоской.

В современных космологических моделях есть два определяющих параметра: Ω_m и Ω_Λ. От значений этих параметров зависит история расширения Вселенной, а также тот факт, конечна Вселенная (в форме 3-сферы) или бесконечна. Первый параметр определяет плотность материи и вычисляется по формуле $\Omega_m = 8\pi G\ _m/3H_0^2$, где G – гравитационная постоянная Ньютона, ρ_m – средняя плотность материи в современной

Вселенной (речь как об обычной, так и о темной материи), а H_0 – современная постоянная Хаббла, указывающая скорость расширения Вселенной. Числитель ($8\pi G\rho_m$) описывает плотность Вселенной (силу гравитационного притяжения), а знаменатель ($3H_0^2$) – кинетическую энергию расширения. В простых фридмановских моделях, учитывающих только обычную материю, Ω_m сообщает, будет ли Вселенная расширяться вечно; если $\Omega_m > 1$, то гравитационное притяжение пересилит кинетическую энергию расширения и Вселенная рано или поздно схлопнется: здесь речь идет о 3-сферном фридмановском пространстве-времени, похожем на мяч, описанный на рис. 22.5. Если $\Omega_m < 1$, то кинетическая энергия расширения превосходит гравитационное притяжение. В таком случае у нас получается фридмановская Вселенная с отрицательной кривизной, которая расширяется вечно. Если $\Omega_m = 1$, то кинетическая энергия уравновешивает притяжение и модель получается плоской; расширение постепенно замедляется, плотность снижается, а кинетическая энергия расширения ослабевает. Все эти фридмановские модели характеризуются $\Omega_\Lambda = 0$, то есть нулевой плотностью вакуума в пустом пространстве, – на рис. 23.5 они расположены по нижнему краю.

Если сегодня вакуум обладает некоторой энергией, то требуется учитывать и значение второго параметра, характеризующего плотность энергии вакуума и описываемого формулой $\Omega_\Lambda = 8\pi G_{вак}/3H_0^2$, где $\rho_{вак}$ – плотность энергии вакуума (темной энергии) в нынешней Вселенной. Нижний индекс напоминает, что темная энергия функционально подобна эйнштейновской космологической постоянной Λ. Все возможные космологические модели можно отобразить на плоскости. По оси абсцисс откладывается значение Ω_m (плотность материи), а по оси ординат – Ω_Λ (энергия вакуума, она же темная энергия). Конкретная космологическая модель соответствует точке на плоскости с рис. 23.5 с координатами (Ω_m, Ω_Λ), каждая пара соответствует некоторой современной комбинации значений плотности материи и темной энергии.

При Ω_Λ не равной нулю получаются модели, заполняющие диаграмму. Диагональной линией обозначено множество моделей, для которых $\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$, то есть плоских моделей, соответствующих инфляционной теории. Модели слева от этой линии имеют седловидную форму, и эти вселенные обладают бесконечной протяженностью, а модели справа от красной линии – это 3-сферные вселенные. Область, покрытая черными

точками и напоминающая по форме галстук, содержит модели, согласующиеся с данными о РИ, полученными с суборбитального телескопа Boomerang в Антарктиде, – это один из важнейших ранних экспериментов. Эта область лежит прямо по линии, подтверждая, что свойства РИ свидетельствуют в пользу плоской модели. Можно наложить на космологическую модель еще одно ограничение: непосредственно измерить хронологию расширения Вселенной, соотнося данные о красном смещении и о расстояниях до далеких объектов. Ученые используют так называемые сверхновые типа Ia, которые удобны в качестве стандартных свеч; участок плоскости (Ω_m, Ω_Λ), допустимый по наблюдениям сверхновых типа Ia, показан светло-серой заливкой.

Рис. 23.5. Космологические модели (Ω_m, Ω_Λ). Каждая точка на этой диаграмме соответствует конкретной космологической модели с присущей

ей плотностью материи (координата Ω_m по оси абсцисс) и плотности темной энергии (координата Ω_Λ по оси ординат). Область, обозначенная светло-серой заливкой, захватывает модели, согласующиеся с наблюдениями сверхновых типа Ia, свидетельствующими, что расширение Вселенной ускоряется. Область, обозначенная черными точками, захватывает модели, согласующиеся с наблюдениями реликтового излучения (РИ), полученными в рамках проекта Boomerang с суборбитального аэростата в 2000 году. Тогда была опубликована одна из первых статей, демонстрирующих, что по сумме наблюдений РИ и сверхновых напрашивается вывод, что наша Вселенная плоская ($\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$) с $\Omega_m \approx 0{,}3$ и $\Omega_\Lambda \approx 0{,}70$. Темная энергия составляет 70 % от всего содержимого Вселенной. Последующие наблюдения, сделанные при помощи спутников WMAP и «Планк», убедительно подтвердили это заключение. Иллюстрация публикуется с разрешения MacMillan Publishers Ltd по изданию Nature, 404, P. de Bernardis, et al. April 27, 2000

Согласно этим данным, Вселенная расширяется все быстрее, и за это открытие Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт и Адам Рисс в 2011 году разделили Нобелевскую премию по физике. Модели с $\Omega_\Lambda > \Omega_m/2$ характеризуются расширением, ускоряющимся на данном этапе, – гравитационное отталкивание темной энергии сильнее гравитационного притяжения материи. Светло-серая область, вычисленная по наблюдениям сверхновых, также подтверждает такое неравенство и показывает, что сегодня Вселенная расширяется с ускорением. (Модели с $\Omega_\Lambda < \Omega_m/2$ должны сегодня расширяться все медленнее). Черный галстук пересекается со светло-серой областью на небольшом участке со значениями около $\Omega_m \approx 0{,}30$ и $\Omega_\Lambda \approx 0{,}70$. Эти значения согласуются с данными, полученными как на материале РИ, так и на материале сверхновых.

Интересно, что такое перекрытие двух областей согласуется со значением $\Omega_m \approx 0{,}30$, вычисленным на основе масс скоплений галактик, движений отдельных галактик и разрастания структуры Вселенной. Эта цифра включает как обычную материю (барионы – протоны и нейтроны), так и темную материю. Приблизительно зная величину постоянной Хаббла 67 (км/с)/Мпк, мы, как выясняется, можем непосредственно определить Ω_m и $\Omega_{барион}$, измерив относительную высоту четных и нечетных пиков на рис. 15.3. Ответ таков: $\Omega_{барион} \approx 0{,}05$ и $\Omega_m \approx 0{,}30$. Результаты наблюдений РИ

согласуются со значением $\Omega_{\text{барион}} \approx 0{,}05$, которое Гамов вычислил по данным о нуклеосинтезе, рассмотренным в главе 15. Эти данные свидетельствуют, что львиная доля материи во Вселенной – это темная материя ($\Omega_{\text{темнмат}} \approx 0{,}25$), которая не может состоять из обычных частиц (барионов). Сейчас ученые пытаются выяснить детальные свойства темной материи, об этом рассказывал Майкл.

Синие линии на рис. 23.5 показывают возраст Вселенной по шкале $1/H_0$. Предпочтительная космологическая модель, расположенная у самой линии, обозначена «Возраст = $1/H_0$».

После того как в 2000 году были получены результаты проекта Boomerang, спутник WMAP с высокой точностью исследовал РИ и, уточнив эти оценки, позволил построить стандартную космологическую модель, согласующуюся со всеми ограничениями наблюдений. Спутник «Планк» дополнительно уточнил и эти оценки: $H_0 = 67$ (км/с)/Мпк; возраст Вселенной – 13,8 миллиарда лет, а значение $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ с учетом погрешностей наблюдений согласуется с моделью плоской Вселенной точнее, чем на 1 %.

Результаты WMAP в сумме с оценками по сверхновым и другими данными даже позволили отследить хронологию расширения Вселенной. Затем, вооружившись уравнениями Эйнштейна, мы смогли вычислить *отношение давления к плотности энергии* для темной энергии – это ключевой показатель, обозначаемый w. WMAP определил значение как $w = -1{,}073 \pm 0{,}09$, что в пределах погрешности наблюдений согласуется со значением –1, спрогнозированным Эйнштейном для модели с космологической постоянной. Спутник «Планк» дал схожую оценку. Недавно в рамках Слоановского цифрового обзора неба» удалось измерить, что современное значение w или $w_0 = -0{,}95 \pm 0{,}07$, при этом использовались данные о скучивании галактик и удобная формула, которую вывели мы с Заком Слепяном. Воспользовавшись теми же данными и формулой, но присовокупив информацию о степени линзирования РИ со стороны далеких галактик, команда «Планка» уточнила значение $w_0 = -1{,}008 \pm 0{,}068$. Все эти значения в пределах погрешности наблюдений согласуются со значением –1, спрогнозированным для энергии вакуума (темной энергии). Известно, что плотность темной энергии положительна, так как именно положительная плотность энергии, значительно превосходящая плотности обычной и темной материи, требуется для возникновения такой плоской Вселенной, которую мы и наблюдаем.

Известно, что давление темной энергии отрицательно, поскольку, с учетом положительной плотности ее энергии, лишь отрицательное давление темной энергии может обеспечить гравитационное отталкивание, необходимое для наблюдаемого ускоренного расширения Вселенной. Мы даже смогли точно измерить величину этого отрицательного давления – и выяснилось, что она равна взятой с обратным знаком плотности темной энергии в пределах погрешности наблюдений. Эйнштейн бы обрадовался! Его космологическая постоянная – никакая не ошибка!

Иногда темную энергию описывают как таинственную силу, вызывающую нынешнее ускорение расширения Вселенной, или отмечают, что мы ничего не знаем о темной энергии. Не совсем так. Сила, под действием которой происходит ускоряющееся движение Вселенной, – это просто гравитация. Отталкивание связано с тем, что темная энергия обладает отрицательным давлением. Есть серьезные подозрения, что темная энергия должна стоять в правой части тождеств Эйнштейна (там, где учитывается материя Вселенной), а не в левой части (с описанием законов тяготения), поскольку есть основания полагать, что содержание темной энергии в юной Вселенной было выше, и именно под ее действием началась инфляция. Предполагается, что темная энергия – это некая энергия вакуума, порождаемая полем или полями, но мы не знаем, какими. Известно, что количество темной энергии со временем практически не меняется, но неизвестно, это медленный рост (карабканье по склону холма) или медленное снижение (скатывание). В настоящее время эти проблемы активно исследуются.

Слоановский цифровой обзор неба позволил точно оценить постоянную Хаббла по размерам характерных особенностей в скучивании галактик, соответствующих колебаниям, видимым во флуктуациях РИ с рис. 15.3. В этом плане они сыграли роль цефеид для оценки крупномасштабной структуры, а данные по сверхновым позволили детально отследить изменения постоянной Хаббла со временем. Было найдено современное ее значение: значение H_0 = 67,3 ± 1,1 (км/с)/Мпк. Отсюда получено, что плотность темной энергии составляет около $6{,}9 \times 10^{-30}$ г/см^3. Если взять сферу радиусом с орбиту Луны, то в этой сфере нашлось бы 1,6 кг темной энергии – ничтожное количество по сравнению с массой Земли, – и эта величина настолько мала, что мы не замечаем воздействия ее отрицательного давления, то есть не наблюдаем отталкивающего влияния на орбиту Луны. Но в космологических масштабах, где средняя плотность материи равна всего 3×10^{-30} г/см^3,

эффект темной энергии огромен.

Построить целую космологическую модель с минимальными погрешностями – серьезное достижение. Спутники WMAP и «Планк» позволили детально измерить величину флуктуаций РИ как функцию их углового масштаба, и эти результаты чрезвычайно хорошо согласуются с прогнозами инфляционной теории (см. рис. 15.3). Это эффектное экспериментальное подтверждение инфляции. А темная энергия, наблюдаемая сегодня, имеет такую же форму, которая могла бы обеспечить инфляцию в ранней Вселенной, – но только у нее очень низкая плотность.

Недавно была предложена новая независимая проверка инфляционной теории. Если инфляция приводит к удвоению размера Вселенной примерно каждые 10–38 секунд, то в самом начале пространство просматривалось лишь на 10^{-38} световых секунд или на 3×10^{-28} см. Это крошечное расстояние и, в силу квантово-механического принципа неопределенности Гейзенберга, из-за этого в геометрии пространства-времени возникают флуктуации (рябь), которые, согласно теории Эйнштейна, распространяются со скоростью света. Речь идет о гравитационных волнах. Они должны оставлять характерный вихревой узор на фоне поляризации РИ, который, в принципе, можно измерить. До сих пор найти его не удалось. Пределы возможностей спутника «Планк», а также наземных экспериментов BICEP2 и в обсерватории Кека недостаточны даже для проверки простейшей модели хаотической инфляции Линде. Амплитуда возникающих при этом гравитационных волн зависит от точной формы того склона, по которому мы катимся (см. рис. 23.4). Команда «Планка» считает, что инфляционная модель наилучшим образом согласуется с расчетами Алексея Старобинского, согласно которым к концу инфляционной эпохи Вселенная удваивается в размерах каждые 10^{-38} секунд, тогда как в простейшей модели Линде она увеличивается в 5 раз каждые 10^{-39} секунд. Если бы расширение было именно таким, то есть в 6 раз менее бурным, оно давало бы гравитационные волны с амплитудой вшестеро слабее, явно гораздо ниже современного верхнего предела. Ряд экспериментов, проводимых как при помощи высотных аэростатов, так и на поверхности земли, в том числе в Антарктиде, призваны дополнительно снизить имеющиеся погрешности и проверить инфляционные модели. Астрономам не терпится увидеть, откроют ли эти эксперименты новое окно в раннюю историю Вселенной.

Если говорить о современной Вселенной, одним из первых астрономов, занимавшихся космологией в XX веке, был Жорж Леметр. В

1931 году он предложил модель, в которой Вселенная началась с Большого взрыва и расширялась по фридмановскому принципу, пока не достигла инерционного этапа, когда космологическая постоянная практически полностью уравновешивает плотность материи и некоторое время стремится к эйнштейновской стационарной модели, а затем продолжает расширение. По мере разрежения материи космологическая постоянная начинает доминировать во Вселенной. Пространственно-временная схема такой модели снизу выглядит как часть мячика (фридмановская модель), затем как цилиндр (эйнштейновский стационарный этап) и, наконец, как раструб (этап деситтеровского пространства). Леметр все описал верно, кроме «инерционного» этапа в середине. Леметр первым рассчитал скорость расширения Вселенной, совместив хаббловские расчеты расстояний до галактик и данные о красном смещении, полученные Слайфером. Именно он первым предположил, что космологическую постоянную Эйнштейна следует трактовать как состояние вакуума с положительной плотностью энергии и отрицательным давлением. Весьма неплохо для отдельно взятой научной карьеры!

Инфляция очень успешно объясняет структуру наблюдаемой Вселенной. Мы на самом деле не знаем, как началась инфляция, поскольку инфляция «забывает» о своих исходных условиях при экспоненциальном расширении Вселенной, и исходные компоненты Вселенной размывая любые исходные компоненты. Но есть некоторые соображения о том, как могла начаться инфляция.

Инфляция может начаться с крошечной 3-сферной Вселенной, расположенной в талии деситтеровского пространства. Окружность этой Вселенной перед началом расширения могла составлять всего 3 × 10–27 см. Но *где* это произошло? Александр Виленкин предположил, что расширение могло начаться в результате квантового туннелирования – процесса, аналогичного формированию пузырьковых вселенных. На этот раз шар, покоящийся в горной долине, будет соответствовать 3-сферной вселенной нулевого размера. Затем он туннелирует через гору и неожиданно окажется за пределами долины, на склоне. Это будет 3-сферная вселенная конечного размера – талия де-ситтеровского пространства. Этап скатывания шара по склону будет соответствовать деситтеровской воронке. Как выглядела бы пространственно-временная схема такой вселенной?

У Виленкина получилась фигура, напоминающая волан для бадминтона (рис. 23.6). Нижняя оконечность – это точечная исходная Вселенная нулевого размера. Оперенная воронка волана – это де-ситтеровское расширение в конце. Нижняя точка и воронка соединены

черной шарообразной фигурой. Именно такова геометрия Вселенной в момент туннелирования через гору. Поскольку в туннеле мы находимся «под землей», знак «минус» перед временем в формуле для интервала меняется на обратный: время становится просто еще одним пространственноподобным измерением. Это полушарие – половина сферы, в которой четыре пространственных измерения, а время отсутствует. В этой области никакие часы не идут; туннелирование происходит в одно мгновение. Сначала шар лежит в горной долине, а в следующий миг он уже снаружи. Джеймс Хартл и Стивен Хокинг рассмотрели такую модель и добавили идею о том, что это чашевидное дно, начальная точка – южный полюс – не отличается от всех прочих точек поверхности. Она в точности подобна Южному полюсу Земли, который ничем не отличается от всех остальных точек земной поверхности. Внизу у Вселенной границ нет – Хокинг назвал этот феномен *отсутствием граничных условий*. Кроме того, Хокинг говорил, что в этом первичном регионе течет *мнимое* время. Мнимое число i – это квадратный корень из –1. Как правило, $ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$, поэтому, будь у меня мнимое время it, так как $i2 = -1$, величина $-d(it)^2$ превратилась бы в $+dt^2$ и у нас получилось бы $ds^2 = dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$. Выражение «мнимое время» звучит жутковато, но в данном случае время просто превращается еще в одно пространственное измерение. В этой области будет четыре пространственных измерения, а не три пространственных измерения и время.

Рис. 23.6. Пространственно-временная схема Вселенной, туннелировавшей из ничего. Иллюстрация предоставлена Дж. Ричардом Готтом, адаптирована из Time Travel in Einstein’s Universe, Houghton Mifflin, 2001

Квантовое туннелирование – по-настоящему странная штука. Мы считаем, что Вселенная началась с какого-то странного события, поскольку последовавшие события были поистине замечательными. Может быть, это было квантовое туннелирование. Но на самом деле мы начинаем не с полного «ничто». Вначале было квантовое состояние, соответствующее Вселенной нулевого размера, в котором заложена вся информация о законах физики и квантовой механики. Как *ничто* может содержать информацию о законах физики? Законы физики – это просто правила, которым подчиняется материя. Если материи нет, то каков смысл физических законов? Это одна из проблем, связанных с возникновением Вселенной из ничего.

Тем временем Андрей Линде отметил, что инфлирующая Вселенная может породить другую инфлирующую Вселенную путем квантовой флуктуации. Деситтеровский инфляционный раструб может породить другой такой же раструб, который отпочкуется и станет расти сам, как ветка на дереве. На самом деле эта ветка инфлирует и станет такой же большой, как ствол, а также выпустит собственные ветки. Ветки будут

расти от веток, и образуется бесконечная Вселенная-фрактал, полностью происходящая от исходного ствола. Каждая отдельная ветка – это воронка, в которой могут образовываться пузырьковые вселенные (см. рис. 23.3). Возможно, мы живем в пузырьковой вселенной на одной из веток, но по-прежнему остается вопрос: откуда взялся ствол?

Мы с Ли-Синь Ли пытались ответить на этот вопрос. Мы предположили, что одна из веток завернулась во времени назад и превратилась в ствол. Наша модель показана на рис. 23.7. В верхней части рисунка изображены четыре воронкообразные деситтеровские инфлирующие вселенные, обозначенные слева направо 1, 2, 3 и 4. Вселенная 2 порождает вселенную 1. Вселенная 2 порождает вселенную 3. Вселенная 3 порождает вселенную 4. Вселенная 4 – правнучка вселенной 2. Эти ветви продолжат расширяться, порождать новые ветви, и так до бесконечности. Эти воронки не сталкиваются друг с другом: представьте себе, что они растут рядом друг с другом в некоем пространстве с высшими измерениями. На этой пространственно-временной схеме, как и на предыдущей, реальна только поверхность.

Теперь переходим к наиболее удивительному свойству этой модели: вселенная 2 также порождает новую ветку, которая заворачивается во времени и становится стволом. В самом начале возникает небольшая временная петля, по форме напоминающая кольцо в цифре «6». Вселенная 2 – сама себе мать! Как мы уже говорили, общая теория относительности допускает существование петель в пространстве-времени. В этой модели нет сингулярностей кривизны. Нам удалось найти для этой вселенной самосогласованное и стабильное квантовое состояние вакуума. У временной петли есть горизонт Коши, граница той зоны, в которой возможны путешествия во времени. Горизонт пересекает ствол под углом 45°, как раз там, где ветка отходит от дерева. Можно закручивать петлю в «шестерке» снизу столько раз, сколько захочется, но если перейти на ветку, которая напоминает хвостик «шестерки», то пути назад не будет. Если вы еще не достигли горизонта Коши, то можете вернуться с ветки и зайти еще на один круг, чтобы посмотреть на себя в прошлом, но стоит пересечь горизонт Коши и миновать точку ветвления – и вам останется путь только вверх, к одной из верхних воронок. В самом начале этой вселенной стоит маленькая машина времени, которая однажды останавливается. Любопытно, что выход из такой машины времени стабилен, поэтому машину времени удобнее строить в начале существования Вселенной.

Рис. 23.7. Самопорождающаяся Вселенная Готта – Ли. Петля внизу – это машина времени; Вселенная рождает сама себя. Иллюстрация сделана по материалам статьи J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, Sizing Up the Universe, National Geographic, 2011

Это интересно, поскольку если установить машину времени у зарождения Вселенной, появится возможность объяснить первопричину этой Вселенной. Каждому событию во Вселенной предшествует какое-то другое событие. Если вы окажетесь в петле времени, то против часовой стрелки от вас всегда будут какие-то события, расположенные в прошлом и порождающие причинно-следственную связь. Мультивселенная конечна в прошлом, но самого раннего события в ней нет. Согласно общей теории относительности, такое возможно в искривленном пространстве-времени.

По-видимому, эта теоретическая модель также хорошо согласуется с теорией суперструн. Теория суперструн, она же М-теория, описывает одиннадцатимерное пространство-время, состоящее из одного макроскопического измерения времени, трех измерений пространства и семи дополнительных пространственных измерений, микроскопических и свернутых, – они понравились бы Калуце и Клейну. Сложная форма микроскопических измерений определяется законами физики. Интересно, что, согласно инфляционной теории, три наблюдаемых сегодня макроскопических измерения изначально были столь же малы, как и

микроскопические измерения Калуцы – Клейна; это была деситтеровская талия размером около 3×10^{-27} см. В ходе инфляции эта микроскопическая деситтеровская окружность радикально увеличилась. Сначала в ней насчитывалось десять микроскопических свернутых пространственных измерений; семь такими и остались, а три просто раздулись до огромных размеров в самом начале времен. В нашей модели (Готта – Ли) предполагается, что исходное время также было свернуто в микроскопическую петлю. Возможно, ее окружность во времени (продолжительность обхода петли) составляла примерно от 5×10^{-44} до 10^{-37}секунд (в случае предложенного нами самосогласованного квантового состояния вакуума). В этой временной петле свернуты все десять измерений пространства и времени, все они микроскопические.

Одно из удивительных свойств инфляции заключается в том, что небольшой участок инфлирующего вакуума расширяется и заполняет огромное пространство, но каждый мельчайший фрагмент этого пространства выглядит как исходный участок. Если один из этих мельчайших участков – исходный, то у нас появляется петля времени. Следовательно, в нашей теории Вселенная возникает не из ничего, а из чего-то, из маленького фрагмента самой себя. Вселенная может быть собственной матерью. Путешествия во времени – довольно необычный феномен, допустимый в рамках общей теории относительности; возможно, именно путешествия во времени объясняют, как возникла Вселенная.

Я бы сказал, что на сегодняшний день инфляционная теория вполне оформилась. Она подробно объясняет наблюдаемые флуктуации РИ (вспомните рис. 15.3). Если вы сомневаетесь в факте инфляции, не забывайте, что вялотекущая инфляция идет и сегодня. Расширение Вселенной ускоряется; по всей видимости, это связано с низкой плотностью современного состояния вакуума (темной энергии), которая составляет $6{,}9 \times 10^{-30}$ г/см^3. Инфляция началась потому, что в юной Вселенной темной энергии было очень много. По-видимому, в результате инфляции неизбежно возникает Мультивселенная. Насколько ученые в этом уверены? Однажды сэра Мартина Риса (королевского астронома) спросили на конференции, насколько он уверен, что мы живем в Мультивселенной. Рис ответил, что голову на отсечение не даст, но готов поспорить на жизнь собственного пса, что это так. Линде говорил, что поскольку потратил десятки лет на разработку инфляционной теории, он готов поспорить на собственную жизнь, что она верна. Нобелевский лауреат Стивен Вайнберг сказал, что готов поставить на эту теорию две жизни – и Линде, и пса

Мартина Риза!

Как началась инфляция? Мы не знаем. Возникла ли Вселенная из ничего в результате квантового туннелирования (вероятно, это самая популярная модель) или, что еще более удивительно, в самом начале Вселенной существовала маленькая временная петля? Педро Гонсалес-Диас предположил, что когда у нас будет истинная теория квантовой гравитации, две эти модели даже могут сойтись в одну. Другое мнение, высказанное Полом Стейнхардтом и Нилом Туроком, таково: Большой взрыв произошел от столкновения двух вселенных, плывших в одиннадцатимерном пространстве-времени, и при столкновении они резко разогрелись. Могут происходить и многократные взрывы (представьте себе два листа бумаги, две плоские Вселенные, которые колышутся в трехмерном пространстве и бьются друг о друга. Принципиально М-теория допускает такие явления). Ли Смолин считает, что наша Вселенная могла возникнуть внутри черной дыры в более старой Вселенной. Когда звезда схлопнулась в черную дыру, плотность в ее недрах росла и росла, пока не сформировалось высокоплотное состояние вакуума, чье гравитационное отталкивание расперло его до деситтеровской талии и спровоцировало переход в расширяющееся инфляционное состояние, которое могло породить Мультивселенную, – такой вариант указывали Клод Баррабе и Валерий Фролов. Все это происходило в формирующейся черной дыре, только «ухмылка» с диаграммы Крускала меняется на начальный этап расширения деситтеровского пространства.

Существует ряд спекулятивных идей, исследованием которых физики занимаются в поисках ответа на вопрос вопросов: с чего началась Вселенная? Из всех упомянутых альтернатив на настоящий момент, пожалуй, наиболее популярен вариант с туннелированием из ничего, но мы попросту не знаем, какой из вариантов правильный. Возможно, узнаем ответ, построив «Теорию Всего», которая объединит общую теорию относительности, квантовую механику, а также сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия, что позволит объяснить все законы физики. Когда у нас появятся уравнения «Теории Всего», мы увидим их космологические решения. Вот зачем мы занимаемся фундаментальной физикой. Мы ищем подсказки о том, как устроена Вселенная и, возможно, с чего она началась.

Глава 24
Наше будущее во Вселенной

Автор: Дж. Ричард Готт

В этой главе я расскажу о будущем Вселенной. Я постараюсь в хронологическом порядке описать ключевые события истории Вселенной, как минувшие, так и предстоящие. Здесь будут как неимоверно протяженные отрезки времени из далекого будущего, так и некоторые невероятно краткие события, происходившие в юной Вселенной. Каков самый ранний момент в истории Вселенной, о котором можно говорить?

Чтобы это узнать, нужно ответить на два взаимосвязанных вопроса. Первый: каков кратчайший период, который можно измерить? Второй: каковы самые быстрые часы, которые только можно себе представить? В любых часах, даже в кварцевых, должен быть какой-то колеблющийся элемент – подобный маятнику в часовом шкафу. Если мне нужны самые быстрые часы – значит, нужен элемент, способный совершать самые быстрые колебания. Такой элемент – свет! Именно он совершает самые быстрые колебания. Фактически мне нужны светочасы с рис. 17.1: они состоят из двух зеркал и луча света, отражающегося между зеркалами. Если я захочу ускорить эти часы, что мне сделать? Немного сдвинуть зеркала. Чем ближе зеркала, тем быстрее тикают часы. У меня в часах будет летать вверх-вниз один фотон.

Что произойдет, если мои часы будут совсем маленькими? Есть проблема. Внутри часов должно хватать места хотя бы на одну волну фотона с длиной λ.Если расстояние между зеркалами в моих часах равно L, то минимально возможное расстояние $L = \lambda$.Длина и частота фотона соотносятся по формуле $\lambda = c/\nu$.Чем меньше длина волны, тем выше будет ее частота. Уменьшая размер часов L, я должен сокращать и длину волны фотона, так чтобы волна умещалась в часах. При этом приходится увеличивать частоту фотона. Повышение частоты означает повышение энергии, поскольку энергия фотона определяется по формуле $E = h\nu$.Также не забываем об эйнштейновской формуле $E = mc^2$. Энергия фотона соответствует некоторой массе. Итак, когда я уменьшаю мои часы, энергия фотона увеличивается, а вместе с ней увеличивается масса часов. В конце концов часы станут столь массивными и втиснутыми в такой малый размер L, что провалятся за собственный радиус Шварцшильда и превратятся в

черную дыру! Таким образом, если я попытаюсь чрезмерно разогнать часы, то они схлопнутся в черную дыру, когда длина часов L достигнет примерно $1{,}6 \times 10^{-33}$ см и они станут тикать с частотой раз в каждые $5{,}4 \times 10^{-44}$ с. Этот период называется *планковским временем*». Это кратчайшее время, которое можно измерить. О длине $L = 1{,}6 \times 10^{-33}$ см мы уже упоминали. Я говорил, что размер сингулярности в центре шварцшильдовской черной дыры ненулевой – на самом деле сингулярность имеет примерно $1{,}6 \times 10^{-33}$ см в поперечнике, поскольку размазывается под действием квантовых эффектов. Эта величина называется *планковской длиной*, это минимальный отрезок, который можно измерить. Рассказывая, что окружности дополнительных пространственных измерений, прогнозируемых теорией струн, могут иметь размеры порядка 10^{-33} см, мы упоминали о планковской длине.

Нельзя измерить время короче планковского. Длина маленькой временной петли, которая, по нашему с Ли-Синь Ли мнению, существовала в начале Вселенной, могла быть именно столь малой (см. главу 23). На самом деле, если рассмотреть обычное пространство-время в масштабе около 10^{-33}см и в периоды порядка $5{,}4 \times 10^{-44}$ с, то геометрия пространства-времени в соответствии с принципом неопределенности станет зыбкой. На таком масштабе пространство-время станет пенистым и многосвязным. Можно выразить значение планковской длины $L_{\text{планк}} = (Gh/2\pi c^3)^{1/2} = 1{,}6 \times 10^{-33}$ см через фундаментальные постоянные. Здесь все наши давние знакомые: ньютоновская гравитационная постоянная G, нужная для расчета радиуса черной дыры; постоянная Планка h, применяемая для расчета энергии фотона по формуле $E = h\nu$, а также c, скорость света, нужная для расчета массы, эквивалентной энергии фотона ($E = mc^2$). Планковское время $T_{\text{планк}} = L_{\text{планк}}/c$ равно периоду времени, за которое луч света проходит планковскую длину. Пренебрегая коэффициентами порядка 2 и π, это минимальный размер самых быстрых часов, пробив который они превратятся в черную дыру. Масса таких миниатюрных быстрых часов равна планковской массе, или $2{,}2 \times 10^{-5}$ г, и они имеют *планковскую плотность*, которая составляет 5×10^{93} г/см^3. Именно такова может быть плотность сингулярности в недрах черной дыры, пока сингулярность не начнет размазываться под действием квантовых эффектов. Именно на планковских масштабах квантовая механика начинает доминировать над общей теорией относительности и, как упоминалось выше, единой теории квантовой гравитации у нас пока нет. Поэтому планковская шкала (в единицах длины или времени) – это

предел, за которым реальность в настоящее время непостижима.

Планковское время 5,4 × 10^{-44} с – это кратчайший период, который можно измерить, и самый ранний момент в истории Вселенной, о котором можно говорить. Как я уже рассказывал, наша Вселенная могла быть всего одним пузырьком (пятном) в инфлюирующей воронке, одной из ветвей в бесконечном фрактальном дереве Вселенных, слагающих Мультивселенную, которая может быть сколь угодно древней. Но я отсчитываю время с момента формирования нашего пузырька. В табл. 24.1 перечислено, что происходило в каждую эпоху.

По окончании инфляции (10^{-35} с) состояние вакуума, наполнявшее юную Вселенную высокоплотной темной энергией, распадается с образованием теплового излучения. Это излучение очень горячее, и в нем не только фотоны (переносчики электромагнитного взаимодействия), но и кварки, антикварки, электроны, позитроны, мюоны, антимюоны, таоны (утяжеленный аналог мюона), антитаоны, нейтрино, антинейтрино, глюоны (переносчики сильного ядерного взаимодействия), X-бозоны (гипотетические частицы, существование которых предполагается в некоторых теориях; якобы они распадаются асимметрично и из-за этого в современной Вселенной вещества настолько больше, чем антивещества), W- и Z-частицы (переносчики слабого взаимодействия), бозоны Хиггса (это частица, связанная с полем Хиггса, которое наделяет частицы массой) и гравитоны (переносчики гравитационного поля – аналогичные фотонам, которые являются переносчиками электромагнитного поля). Если теория суперсимметрии верна, то для каждой из вышеперечисленных частиц должна существовать суперсимметричная частица-партнер.

Кратко расскажу о гравитонах. Эйнштейн обнаружил, что одним из решений общей теории относительности являются гравитационные волны, рябь в геометрической структуре пространства-времени, распространяющаяся со скоростью света. Аналогично, Максвелл до него обнаружил, что электромагнитные волны, распространяющиеся в пустом пространстве со скоростью света, – это решение его уравнений поля в случае электромагнетизма. Косвенные подтверждения существования гравитационных волн (которые должны состоять из гравитонов) получены при наблюдениях двойного пульсара Тейлора и Халса, две компоненты которого движутся по все сильнее сжимающейся спиральной орбите. Именно это и прогнозировал Эйнштейн: гравитационные волны должны возникать при подобном вращении нейтронных звезд.

Таблица 24.1. Эпохи в истории Вселенной

Время с рождения Вселенной	Что произошло
$5{,}4 \times 10^{-44}$ секунды	Планковское время
10^{-35} секунд	Окончание инфляции; случайные квантовые флуктуации уже породили зародыши будущих галактических образований; возникает материя; кварковый бульон
10^{-6} секунд	Кварки сливаются, образуя протоны и нейтроны
3 минуты	Синтез гелия; образуются легкие химические элементы
380 000 лет	Рекомбинация; электроны объединяются с протонами, образуя атомы водорода; появляется космический микроволновый фон
1 миллиард лет	Образуются галактики
10 миллиардов лет	Возникает жизнь на Земле
13,8 миллиарда лет	Наше время
22 миллиарда лет	Солнце покидает главную последовательность и превращается в белый карлик
850 миллиарда лет	Вселенная остывает до температуры Гиббонса—Хокинга
10^{14} лет	Звезды угасают; гибнут красные карлики
10^{17} лет	Планеты отрываются от звезд; из-за межзвездных контактов планеты улетают от родных звезд, распадаются планетные системы белых карликов или нейтронных звезд
10^{21} лет	Образуются черные дыры галактической массы; большинство звезд и планет выброшено (из галактик)
10^{64} лет	К этому моменту должны распасться протоны; во Вселенной остаются черные дыры, электроны, позитроны, фотоны, нейтрино и гравитоны
10^{100} лет	Испаряются черные дыры, сравнимые по массе с галактиками

14 сентября 2015 года в рамках эксперимента LIGO впервые удалось непосредственно обнаружить гравитационные волны. Лазерный интерферометр с исключительной точностью (до 1/1000 диаметра протона) измерил расстояние между парами зеркал и зафиксировал колебание расстояний между ними, обусловленное прохождением гравитационной волны. Как же примечательно, что гравитационные волны теоретически предсказал Эйнштейн, а открыты они были при помощи лазера – и принцип лазера тоже описал Эйнштейн. Источником этих гравитационных волн оказались две черные дыры, одна в 29 солнечных масс, другая в 36, по

спирали сближавшиеся друг с другом и слившиеся с образованием новой черной дыры в 62 солнечные массы. Итак, гравитационные волны существуют, и результаты эксперимента согласуются с допущением, что гравитоны движутся со скоростью света. Поскольку гравитация так слаба, нам пока не удалось зафиксировать отдельный гравитон, но ожидается, что такие частицы должны существовать. Ведь гравитационные волны существуют, а они должны обладать корпускулярно-волновым дуализмом, точно так же, как электромагнитные волны и фотоны.

Эпоха, когда по Вселенной стремительно носились все эти частицы, называется *кварковым бульоном*. Кварки свободно перемещаются в пространстве, не объединяясь в крепкие тройки. Из-за принципа неопределенности в некоторых областях квантовое состояние вакуума распадается чуть раньше, в других – чуть позже, поэтому в тепловом излучении возникают случайные флуктуации.

Такие флуктуации плотности имеют место и на отметке около 10–35 секунд, когда заканчивается инфляция. Они дают начало сгусткам, которые под действием гравитации за следующие 13,8 миллиарда лет постепенно превратятся в галактики и грандиозные скопления галактик, наблюдаемые сегодня. Ячеистая структура распределения галактик, которую мы видим сейчас (рис. 15.4), в которой большие скопления галактик связаны нитями (или цепочками) галактик, называется *космической паутиной*. Эта паутина сравнима с (невероятно разбухшими) «ископаемыми остатками» тех самых квантовых флуктуаций, происходивших, когда Вселенной было всего 10^{-35} секунд[42].

По мере расширения Вселенной этот горячий суп остывает, и массивные частицы распадаются на более легкие. Исходно во Вселенной имелось равное количество вещества и антивещества, но считается, что из-за асимметричного распада тяжелых X-бозонов (в пользу вещества, а не антивещества) в продуктах распада вещества оказалось чуть больше, чем антивещества. По мере столкновения и аннигиляции частиц вещества и вещества (из них образовывались фотоны) во Вселенной осталось преимущественно обычное вещество. Галактики, наблюдаемые сегодня, сконденсировались из вещества. Частицы антивещества – редкость в современной Вселенной, они постоянно рискуют столкнуться с одной из многочисленных частиц вещества и аннигилировать. Сегодня частицы антивещества имеют безоговорчное численное превосходство над частицами антивещества.

К 10^{-6} секундам излучение остыло настолько, что кварки стали

связываться друг с другом, образуя протоны и нейтроны. Существует шесть разных ароматов кварков: верхние (*u*), нижние (*d*), странные (*s*), очарованные (*c*), прелестные (*b*) и истинные (*t*)[43]. Протон состоит из двух верхних кварков и одного нижнего; они удерживаются вместе, обмениваясь тремя глюонами. (Тут есть мнемоническое правило: в нейтроне больше нижних кварков, и слова «нейтрон» и «нижний» начинаются с «н»; в протоне же больше верхних кварков, и слова «протон» и «верхний» содержат в первом слоге букву «р» – латинскую «р».) Нейтрон состоит из двух нижних кварков и одного верхнего кварка, они также удерживаются вместе тремя глюонами. Верхний кварк имеет электрический заряд +2/3, а нижний – заряд –1/3. Таким образом, электрический заряд протона равен +1, а нейтрон нейтрален, его заряд 0.

На отметке 3 минуты начинается синтез гелия, рассмотренный в главе 15. Вселенная уже остыла настолько, что протоны могут сцепляться с нейтронами и образовывать легкие элементы. Наиболее легкий из распространенных элементов – это водород (протон), но кроме того, синтезируется заметное количество гелия, а также небольшие количества дейтерия и лития. Исследуя именно эту эпоху, Гамов и его ученики спрогнозировали существование РИ.

На отметке 380 тысяч лет Вселенная остывает примерно до 3000 К. К этому моменту электроны могут связываться с протонами и образовывать атомы водорода. Как я уже говорил, этот процесс называется *рекомбинацией*. Вселенная превращается из электрически заряженной плазмы, состоящей в основном из протонов (+) и электронов (—), в электрически нейтральный газ, преимущественно водород: здесь каждый протон успел захватить себе электрон и образовать электрически нейтральный атом водорода. До наступления этой эпохи фотоны постоянно сбивались с траектории, взаимодействуя с электрически заряженными частицами, то есть протонами и электронами, перемещаясь хаотичной «походкой пьяницы». Далеко улететь такие фотоны не могли, поскольку постоянно сбивались с курса. После эпохи рекомбинации фотоны смогли беспрепятственно пролетать по прямой большие расстояния. Благодаря такому переходу к свободным фотонам, эту эпоху мы уже можем непосредственно наблюдать: от нее и осталось реликтовое излучение.

На отметке 1 миллиард лет должно было начаться формирование галактик. Квазары с большим красным смещением, рассмотренные в главе 16, возникли в молодых галактиках, которые заметны в чуть более ранний период.

Сегодня Вселенной 13,8 миллиарда лет.

К отметке 22 миллиарда лет Солнце покинет главную последовательность звезд и станет белым карликом. Галактика Туманность Андромеды столкнется с галактикой Млечный Путь.

К отметке 850 миллиардов лет Вселенная остынет до постоянной температуры в ходе процесса, описанного Гиббонсом и Хокингом. Как я рассказывал в главе 23, согласно наблюдениям, Вселенная наполнена темной энергией, давление которой равно по величине плотности энергии, но является *отрицательным* (динамически эквивалентно космологической постоянной Эйнштейна). По мере того как материя во Вселенной становится все более разреженной в результате расширения, а уровень темной энергии тем временем остается прежним, Вселенная все сильнее попадает под влияние темной энергии, и этот процесс продолжится в будущем. Следовательно, геометрия Вселенной в будущем должна напоминать геометрию деситтеровского пространства, пространственно-временную воронку. Она должна вечно расширяться. Две галактики, между которыми сегодня возможна связь, будут все быстрее и быстрее разлетаться в стороны. В конце концов пространство между галактиками станет расширяться так быстро, что свет не сможет преодолеть постоянно растущее расстояние между ними. Возникнут горизонты событий. Далекая галактика будет выглядеть в точности так, словно она падает в черную дыру. Если инопланетяне из далекой галактики пошлют нам сигнал «ДЕЛА ИДУТ ВПОЛНЕ ХОРОШО», то нам покажется, что они послали «ДЕЛА И…Д…У…Т…». Конец сообщения, «ВПОЛНЕ ХОРОШО», мы никогда не получим. События, которые произойдут в далекой галактике в последующие времена, окажутся за пределами нашего горизонта и мы их никогда не увидим (см. рис. 23.2).

Хокинг показал, что горизонты событий испускают хокинговское излучение. Гиббонс и Хокинг вычислили, что в далеком будущем в деситтеровском пространстве любой наблюдатель будет видеть возникающее в результате тепловое излучение, вполне уместно названное «*излучение Гиббонса – Хокинга*». Это тепловое излучение, которое станет заметно в нашей Вселенной в будущем, будет обладать характерной длиной волны ($\lambda_{макс}$) примерно в 22 миллиардов световых лет. Длина РИ и далее будет увеличиваться по мере экспоненциального расширения Вселенной, удваиваясь в размерах каждые 12,2 миллиарда лет. Через 850 миллиардов лет с рождения Вселенной тепловое излучение РИ будет иметь длину волны свыше 22 миллиардов световых лет и станет несущественным по сравнению с излучением Гиббонса – Хокинга, льющимся с горизонтов

событий. С этого момента Вселенная прекратит остывать, ее температура установится на уровне Гиббонса – Хокинга, составив примерно 7×10^{-31} К. Это очень холодно, но все равно выше абсолютного нуля.

На самом деле, эти идеи проверяемы. Излучение Гиббонса – Хокинга возникает еще на раннем инфляционном этапе существования Вселенной. В него входит как электромагнитное, так и гравитационное излучение. Если такое гравитационное излучение со времен зарождения Вселенной когда-нибудь удастся обнаружить в виде отпечатков, заметных в поляризации РИ (см. главу 23), это, на мой взгляд, станет важным эмпирическим доказательством в пользу существования механизма хокинговского излучения. Такие гравитационные волны не исходят от движущихся тел, как зафиксированные в проекте LIGO, а обусловлены совершенно иным, хокинговским механизмом – квантовым процессом. Подобное открытие будет по-настоящему новым и захватывающим.

Излучение Гиббонса – Хокинга, которое, вероятно, предстоит увидеть в далеком будущем, в конечном итоге будет пагубно для разумной жизни. Фримен Дайсон однажды продемонстрировал, что разумная жизнь может неопределенно долго продержаться на конечном источнике энергии, если будет возможность сбрасывать избыточное тепло в постоянно остывающую термостатическую «баню». Если бы я показывал кино при температуре 300 К, используя фотоны видимого света, то на показ кино ушло бы определенное количество энергии. Но допустим, что мы замедлим все происходящее в кинотеатре. Допустим, фильм идет в инфракрасном диапазоне, а длина волны инфракрасных фотонов вдвое больше, чем у фотонов видимого света. Я мог бы показать то же самое кино, затратив вполовину меньше энергии (каждый фотон унесет вдвое меньше энергии), но само кино продлится вдвое дольше (поскольку волна у фотона вдвое длиннее). Длины волн фотонов теплового излучения в таком кинотеатре также будут вдвое длиннее, поэтому там установится температура не 300 К, а 150 К. Разумная жизнь может экономить энергию, но мышление и коммуникации становятся при этом все М.…Е.…Д.…Л.…Е.…Н.…Н.…Е.…Е. Можно даже продумать бесконечное количество мыслей, располагая ограниченным источником энергии, но при этом придется замедлять и замедлять мышление. Это реализуемо, если остается возможность сбрасывать любое избыточное тепло (обязательно возникающее при биологических процессах, в частности при мышлении) в постоянно остывающий микроволновый фон, время от времени впадая в анабиоз и со временем существуя на все более низких температурах. Пока РИ продолжает остывать, приближаясь к абсолютному нулю, это работает. Но

к отметке 850 миллиардов лет Вселенная достигнет термодинамического равновесия при температуре Гиббонса – Хокинга, после чего эта температура не изменится. После этого не получится переходить в более низкотемпературный режим деятельности ради сохранения энергии. Потребуются технологии заморозки, которые быстро истощат всю оставшуюся энергию. Более того, другие галактики унесутся за горизонты событий, и у вас в распоряжении останется лишь конечный объем запасенной энергии. Разумная жизнь будет испытывать дефицит энергии и в конечном итоге вымрет.

Есть еще одна беда. На отметке 1014 лет звезды угаснут – к этому времени последние, самые мелкие звезды истратят запасы своего водородного топлива и погибнут. Во Вселенной стемнеет. Останутся только звездные огарки – белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Возможно, вокруг них еще будут вращаться последние планеты. Но к отметке 1017 лет произойдет достаточно много тесных контактов между звездами, при которых планеты будут сорваны с орбит и выброшены в межзвездное пространство.

На отметке 10^{21} лет сформируются черные дыры, сравнимые по массе с галактиками. В результате парных гравитационных взаимодействий между телами некоторые звезды будут словно пращой выброшены за пределы галактик, а остальные свалятся в черные дыры в центрах галактик. Звезды будут по спирали падать в них, теряя энергию на гравитационное излучение.

К отметке 10^{64} лет (если этого не произойдет ранее), согласно Хокингу, должны распасться протоны. Распад протона происходит в результате редкого события: временного падения в черную дыру планковского размера (из-за принципа неопределенности), после чего эта черная дыра быстро развоплощается в виде хокинговского излучения. В черной дыре не сохраняются барионы (протоны и нейтроны) – она «не запоминает», был ли это протон или позитрон, но запоминает его электрический заряд. Поэтому позитрон, который легче протона, может быть излучен в числе продуктов распада такой черной дыры, в которой исчез протон. После распада протонов самыми массивными частицами, которые останутся во Вселенной, станут электроны и позитроны. Протоны могут распасться даже раньше, возможно, к отметке 10^{34} лет, но во всяком случае не позже чем к 10^{64} лет.

К моменту 10^{100} лет черные дыры, сравнимые по размерам с галактиками, испарятся в виде хокинговского излучения.

Что будет потом? Стандартная картина, которую рисуют физики, такова: темная энергия, сегодня вызывающая экспоненциальное расширение Вселенной, – это состояние вакуума с постоянной положительной плотностью энергии (и отрицательным давлением). Стивен Вайнберг сравнивает нынешнюю ситуацию с таким примером. Мы живем в долине чуть выше уровня моря – наша высота соответствует количеству темной энергии, присутствующей в вакууме. Мы скатились на дно этой долины и просто в ней сидим. Содержание энергии в вакууме – уровень темной энергии – со временем не меняется. Поэтому Вселенная еще очень долго будет удваиваться в размерах каждые 12,2 миллиарда лет.

Если времени остается достаточно много, то возможно, что наше состояние вакуума, дающее темную энергию, может путем квантового туннелирования перейти в более низкоэнергетическое состояние (упасть в еще более низменный регион под нашей долиной). В таком случае где-то в пределах наблюдаемой Вселенной станет формироваться пузырь с менее плотным, чем у нас, состоянием вакуума. Отрицательное давление за пределами пузыря окажется «более отрицательным», чем его внутреннее давление, из-за чего стенки пузыря будут распахиваться в стороны. Через непродолжительное время пузырь будет распространяться во все стороны почти со скоростью света. Он будет расширяться вечно. Внутри пузыря будут действовать иные законы физики, и вы погибнете, если его стенка в вас врежется.

Можно рассчитать, какова вероятность в некоторую единицу времени попасть путем квантового туннелирования во внешний «низменный» регион. Возможно, мы сможем увидеть формирование пузырей с более разреженным вакуумом «всего» через 10^{138} лет по причине известной нестабильности хиггсовского вакуума. Но многие физики думают, что хиггсовский вакуум стабилизируется под действием более высокоэнергетических эффектов. В данном случае, согласно ориентировочным расчетам Андрея Линде, пузырьки с разреженным вакуумом должны начать формироваться лишь спустя $_{10}10^{34}$ лет! Образующиеся таким образом пузырьки, точно как пузырьковые вселенные на рис. 23.3, никогда не успеют заполнить все пространство. Постоянно расширяющееся вакуумное состояние так и будет удваиваться в размерах каждые 12,2 миллиарда лет, и его объем будет все ближе стремиться к бесконечности. Это будет вечно инфлирующее море, где то тут, то там возникают такие пузырьки. В конце времен Вселенная будет напоминать вечное игристое шампанское.

По расчетам Линде и Виленкина, еще реже случайная квантовая флуктуация может приводить к тому, что вся видимая Вселенная перескочит в более высокоплотное состояние вакуума, в результате чего возникнет новая, стремительно расширяющаяся высокоплотная инфляционная Вселенная. Это событие будет напоминать высокоэнергетическую инфляцию, которая состоялась при рождении нашей Вселенной, и при этом может родиться новая Мультивселенная. Возможно, до такого события остается $_{10}101^{20}$ лет!

Есть и другой вариант: возможно, мы живем не в долине, а на склоне и медленно спускаемся к уровню моря. Такая картина так и называется – *медленным скатыванием темной энергии*. По исследованиям Бхарата Ратры, Джима Пиблса, Зака Слепяна, моим и многих других, в таком случае запас темной энергии постепенно истощится за миллиарды лет, и в конечном итоге мы скатимся к состоянию вакуума с нулевой плотностью энергии. Именно такое скатывание произошло прямо перед началом инфляции, где состояние с очень высоким уровнем темной энергии превратилось в наблюдаемый сегодня низкоэнергетический вакуум. Эти сценарии можно исследовать, детально измеряя хронологию расширения Вселенной вплоть до сегодняшнего момента. Таким образом, вооружившись уравнениями Эйнштейна, можно измерить для темной энергии отношение давления к плотности энергии – это отношение называется w. Если окажется, что w в точности равно –1, динамическому эквиваленту эйнштейновской космологической постоянной, это будет аргумент в пользу сценария «заперты в долине», в таком случае уровень темной энергии не изменится, а Вселенная так и будет удваиваться в размерах каждые 12,2 миллиарда лет. Однако если отрицательное значение w не дотягивает до –1, то мы будем постепенно скатываться к уровню моря, и ускоренное расширение должно будет в конце концов смениться приблизительно линейным. Вселенная так и будет вечно расширяться, но линейно. В данном случае расширение Вселенной растет со временем как 1, 2, 3, 4, 5, 6…

Роберт Колдуэлл, Марк Камёнковски и Невин Вайнберг выдвинули радикальную версию о том, что значение w может быть ниже –1. Этот феномен они назвали *фантомной энергией*. В таком случае должна порождаться энергия вакуума, увеличивающаяся со временем по мере расширения Вселенной. Расширение становится лавинообразным, и в будущем возникает сингулярность (Большой разрыв), которая разорвет на части галактики, звезды и планеты, возможно, в ближайший триллион лет.

Такая «фантомная» энергия требует отрицательной кинетической энергии при скатывающемся движении поля, контролирующего темную энергию. Мне такой вариант кажется маловероятным по физическим соображениям. При таком сценарии наблюдаемая сегодня темная энергия должна совершенно не походить на «раннюю» темную энергию, существовавшую на этапе инфляции. Итак, пусть такая возможность и сохраняется, она кажется менее вероятной, чем два предыдущих сценария. Но многие физики воспринимают «фантомную энергию» вполне серьезно[44].

Как я рассказывал в главе 23, наилучшая современная оценка w (полученная исследовательской группой «Планка» на основании всех имевшихся данных, в том числе из Слоановского небесного обзора неба) составляет $w0 = –1{,}008 \pm 0{,}068$. Примечательно, что в пределах погрешности это значение согласуется с простым –1 (приближенным значением эйнштейновской космологической постоянной), а значит, наблюдения свидетельствуют, что мы «лежим на дне долины». Этот результат замечательно подкрепляет общую идею о том, что темная энергия соответствует состоянию вакуума с положительной энергией и отрицательным давлением. Однако имеющиеся наблюдения по-прежнему не позволяют разграничить те модели, в которых мы просто лежим на дне, от тех, где мы медленно катимся вниз (или вверх) по склону. В двух последних случаях w_0 будет близким к –1, но все-таки иным, чуть выше или чуть ниже. Если будущие высокоточные измерения w однозначно покажут, что значение w отличается от –1, то мы сможем определиться, с каким именно феноменом имеем дело: с медленным скатыванием темной энергии или фантомной энергией. Но если с оптимизацией измерений и постепенным устранением неточностей мы по-прежнему будем убеждаться, что $w_0 = –1$ в пределах погрешности, то вполне можем объявить триумф модели «лежим в долине». Сейчас реализуется ряд экспериментальных программ, призванных в будущем снизить погрешность при измерении w_0 более чем на порядок; есть надежда, что эти программы помогут понять, какова будет окончательная судьба Вселенной.

Я изложил наиболее вероятные с современной точки зрения версии о том, что ждет Вселенную в будущем. Но что насчет нашего будущего во Вселенной? Что может произойти с нами? Как сложится в будущем судьба нашего вида *Homo sapiens*? На этот вопрос очень хотелось бы ответить.

Во-первых, хотел бы отметить, что мы живем в весьма тепличную эпоху. Вселенная уже достаточно остыла, чтобы стать обитаемой, прошло

достаточно времени, чтобы успели сформироваться углерод и другие элементы, необходимые для жизни, звезды ярко светят, обеспечивая нас теплом и энергией. В эту эпоху есть надежда повстречать во Вселенной разумных наблюдателей. Когда звезды угаснут, разумной жизни придется гораздо тяжелее. Заглянув в табл. 24.1, мы увидим, что живем в жизнепригодную эпоху. *Слабый антропный принцип*, идея, выдвинутая Робертом Дикке, а позже точно сформулированная Брэндоном Картером, гласит, что разумные наблюдатели, естественно, должны ожидать, что окажутся в жизнепригодных точках Вселенной и в тот период ее истории, когда она подходит для обитания. (По логике, в *непригодную* для жизни эпоху попросту не существовало бы никого, кто мог бы ставить такие вопросы!) Действительно, мы существуем в апогее максимально тепличной эпохи в истории Вселенной.

Но поскольку пока мы – единственная известная разумная форма жизни во Вселенной, хотелось бы знать, какова ожидаемая долговечность человеческого вида в целом. Как осмыслить такой вопрос?

В 1969 году я побывал у Берлинской стены, разделявшей две части города, относившиеся соответственно к Западной и Восточной Германии. На тот момент люди гадали, сколько простоит Берлинская стена. Некоторые считали, что это временная помеха и скоро она падет. Но другие полагали, что стена останется перманентным атрибутом современной Европы.

На рис. 24.1 – моя фотография 1969 года. Я стою возле стены. Чтобы оценить потенциальную долговечность стены, я решил применить принцип Коперника. Главное помнить: я ничем не примечателен. Я только что приехал в Европу после колледжа – тогда еще можно было «побывать в Европе за 5 долларов в сутки». Я пришел посмотреть на Берлинскую стену просто потому, что оказался в Берлине и тогда там стояла стена.

Рис. 24.1. Рич Готт у Берлинской стены в 1969 году. Правой ногой я стою в Восточном Берлине, левой ногой – в Западном Берлине. Берлинская стена возвышается за мной. Снимок из архива Дж. Ричарда Готта

Я мог наблюдать любой момент в ее истории. Но если мой визит не случаен, то он должен прийтись на какой-то конкретный момент между постройкой и сносом стены. (Конец наступит, когда стена рухнет либо когда не останется никого, кто мог бы ее увидеть, – в зависимости от того, что наступит раньше.) В таком случае должна быть примерно 50-процентная вероятность, что я нахожусь где-то в средней половине ее существования. Две четверти срока прошло до моего прихода, еще две четверти пройдет после. Если бы я пришел к ней на в начале этой средней половины, то у меня в прошлом осталась бы 1/4 ее истории, а 3/4 лежало бы в будущем. В таком случае ожидаемая долговечность стены была бы втрое больше, чем ее история. Напротив, если бы я оказался в финале срединных 50 %, то 3/4 ее истории было бы в прошлом, а 1/4 оставалась бы в будущем. Поэтому будущее составляло бы 1/3 от прошлого.

Поэтому я рассудил, что существует 50-процентная вероятность, что я нахожусь между двумя этими крайностями и что будущая долговечность стены составит от 1/3 до троекратного срока ее прошлого (рис. 24.2). На

момент моего визита стене было 8 лет. Стоя у стены, я сказал другу Чаку Аллену, что стена простоит еще от 2,66 до 24 лет.

Рис. 24.2. Формула Коперника (доверительный интервал 50 %). Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Двадцать лет спустя я смотрел телевизор, и тогда позвонил другу, чтобы сказать: «Чак, помнишь я говорил о долговечности Берлинской

стены? Включи телевизор, там Том Брокау, корреспондент NBC, ведет трансляцию со стены, сегодня она рухнет!» Чак помнил мой прогноз. Берлинской стене суждено было простоять еще 20 лет после моего приезда, а эта цифра попадает в интервал от 2,66 до 24 лет. Я приезжал туда в разгар холодной войны, так что уже в следующую миллисекунду ее (и меня) могла испепелить атомная бомба. Напротив, некоторые знаменитые стены, например Великая китайская стена, простояли тысячи лет. Я прогнозировал довольно узкий интервал, но все-таки не ошибся.

Ученые обычно предпочитают делать предсказания, вероятность исполнения которых выше 50 %. Им нравится, когда надежность прогноза составляет около 95 %. Доверительный интервал 95 % обычно упоминается в научных статьях. Как при этом меняется аргументация? Применяя принцип Коперника, не забываем, что наше положение во времени ничем не примечательно, и существует 95 %-я вероятность, что мы окажемся где-то в средних 95 % периода наблюдаемости чего бы то ни было – то есть ни в первых 2,5 %, ни в последних 2,5 % (рис. 24.3).

В дробном выражении 2,5 % равно 1/40. Если ваши наблюдения попали в начало этих средних 95 % – то есть всего в 2,5 % от начала, – то минула лишь 1/40 истории наблюдаемого вами явления, а 39/40 остается в будущем. Будущее в 39 раз длиннее прошлого. Если вы оказались в 2,5 % от конца, то 39/40 истории уже прошло, а остается 1/40. Прошлое в 39 раз длиннее будущего. Если вы находитесь в средних 95 % между двумя этими крайностями (вероятность чего составляет 95 %), то будущее наблюдаемого явления может составлять от 1/39 от прошлого до 39-кратной величины. Следовательно, *прогнозируемая долговечность любого наблюдаемого явления должна составить от 1/39 пройденного срока до 39-кратной величины пройденного срока (доверительный интервал 95 %).*

Я решил применить это правило к какому-нибудь важному явлению – например, поговорить о будущем нашего вида *Homo sapiens*. Нашему виду около 200 000 лет. Наша история восходит к митохондриальной Еве, жившей в Африке. Митохондриальная Ева – наша общая праматерь. По формуле, существует 95 %-я вероятность, что наше местоположение в хронологии нашего вида ничем не примечательно, и в таком случае прогнозируемая долговечность нашего вида *Homo sapiens* должна составить еще как минимум 5100 лет (то есть 200000/39), но менее чем еще 7,8 миллиона лет (то есть 200 000 × 39)[45]. У нас нет никакой статистики по другим разумным существам (таким, которые могли бы задавать вопросы), так что, пожалуй, это – максимум, на который мы способны.

Рис. 24.3. Формула Коперника (доверительный интервал 95 %). Предоставлено Дж. Ричардом Готтом

Диапазон прогнозируемой долговечности именно так велик, ведь мы стремимся к 95 %-й достоверности. Однако многие эксперты озвучивают прогнозы, находящиеся за пределами этого диапазона. Согласно некоторым апокалиптическим выкладкам, мы погибнем в ближайшие 100 лет. Но если так и есть, очень жаль, что мы с вами очутились в самом финале человеческой истории. Некоторые оптимисты считают, что нам предстоит

колонизировать Галактику и сохраниться на триллионы лет. Если это так – нам очень повезло родиться в самом начале человеческой истории. Поэтому, даже в таком широком диапазоне, формула Коперника все равно достаточно информативна и ограничивает возможности более четкими рамками, чем многие другие подходы.

Определенно, все, что мы знаем об астрономии, подсказывает нам со всей серьезностью относиться к принципу Коперника (согласно которому наше местоположение ничем не примечательно). Изначально мы думали, что занимаем особое место во Вселенной. Но затем пришло понимание, что Земля – лишь одна из планет, вращающихся вокруг Солнца. Затем выяснилось, что Солнце – самая обычная звезда, расположенная вовсе не в центре Галактики, а на полпути от центра к окраине. Мы узнали, что наша Галактика относится к самой обычной группе галактик в заурядном скоплении. Чем больше мы узнавали, тем менее примечательным оказывалось наше местоположение.

Принцип Коперника – одна из самых успешных гипотез всех времен, которая вновь и вновь подтверждается в самых разных контекстах. Христиан Гюйгенс воспользовался ею, чтобы спрогнозировать, каковы расстояния до звезд. Звезды, рассуждал он, – это просто другие солнца, подобные нашему. Если всем звездам присуща такая же яркость, как и Солнцу (предполагается, что Солнце ничем не примечательно), то звезды могут казаться в небе настолько тусклее Солнца, поскольку расположены они гораздо дальше. Он счел, что ближайшая к нам звезда – это Сириус, самая яркая звезда на небе. Оценив яркость Сириуса относительно солнечной, он заключил, что Сириус должен быть от нас в 27 664 раза дальше Солнца. На самом деле он попал в правильный ответ в пределах двух порядков – выдающееся достижение, учитывая, с какими неопределенностями ему пришлось иметь дело. Гюйгенс верно заключил, что межзвездные расстояния просто огромны по сравнению с размерами Солнечной системы.

Когда Хаббл обнаружил, что галактики равномерно разлетаются от нас во всех направлениях, он мог бы подумать, что мы занимаем особое место в центре масштабного взрыва. Но после Коперника мы уже не попадаемся на такую удочку. Учитывая, как много во Вселенной галактик, вряд ли нам повезло родиться именно в той, что находится в самом центре. Если ситуация выглядит для нас именно таким образом, это значит, что ровно такой же она кажется и всем остальным наблюдателям из других галактик – иначе мы были бы особенными. Так появились однородные изотропные модели Большого взрыва, вписывающиеся в специальную теорию

относительности. Гамов, Херман и Альфер воспользовались ими и спрогнозировали существование реликтового излучения за 17 лет до того, как Пензиас и Уилсон действительно открыли это излучение. Это был один из величайших подтвержденных прогнозов в истории науки. Этот успех во многом объясняется тем, что мы всерьез воспринимаем принцип Коперника, а затем проверяем, к чему он нас приведет.

Интересно, что общая долговечность нашего вида, прогнозируемая по принципу Коперника, замечательно согласуется с фактической долговечностью многих других видов, обитавших на Земле. Когда я с 95-процентным доверительным интервалом спрогнозировал общую долговечность человеческого вида в интервале от 205 100 до 8 миллионов лет (то есть 200 000 лет мы уже прожили, и еще нам, вероятно, отпущено от 5100 до 7 800 000 лет в будущем). *Homo erectus*, наши ближайшие предшественники, просуществовали 1,6 миллиона лет, а неандертальцы – всего около 300 000 лет. Средняя долговечность вида среди млекопитающих – 2 миллиона лет, а среди других групп организмов средняя долговечность вида варьируется от 1 до 10 миллионов лет. Даже страшные тираннозавры (*Tyrannosaurus rex*) исчезли, продержавшись всего 2,5 миллиона лет. Примерно 65 миллионов лет назад они вымерли из-за столкновения Земли с астероидом.

Не забывайте, что принцип Коперника учитывает лишь ту часть нашей истории, когда мы уже были разумным видом, то есть обладали самосознанием и могли задавать вопросы, – Нил бы назвал нас «существами, способными заниматься алгеброй». Если нам действительно предстоит просуществовать еще триллион лет, то как же нам повезло родиться на самой заре истории нашего вида, когда нам было всего лишь 200 000 лет, и более того, как раз в ту эпоху, когда мы уже в состоянии, оглядываясь назад, спрогнозировать нашу потенциальную долговечность в ряду других видов. Если рассмотреть какую-либо случайную точку в триллионнолетней истории, скажем момент через 400 миллиардов лет с сегодняшнего дня, то уже будет известно, что наш вид просуществовал гораздо дольше, чем другие виды, и вправе также претендовать на значительную долговечность в будущем. Наше будущее выглядело бы гораздо оптимистичнее, если бы сейчас человечеству было 400 миллионов лет, а не 200 тысяч – именно такова наша фактическая нынешняя долговечность.

В принципе, мы, *Homo sapiens*, можем оказаться гораздо долговечнее других видов именно потому, что мы разумны. Но тем не менее мы просто млекопитающие, и срок нашего существования ничуть не выбивается из

показателей долговечности других видов млекопитающих. Пусть даже млекопитающие гораздо смышленее, чем «среднестатистический» вид, нельзя сказать, что средняя долговечность млекопитающих ощутимо выше, и гоминиды (например, *Homo erectus* и неандертальцы) просуществовали не дольше, чем обычные виды млекопитающих. По-видимому, интеллект и долговечность вида не коррелируют. Есть повод задуматься.

Действительно, если просто воспользоваться статистическими данными о длительности существования других видов млекопитающих, чтобы спрогнозировать нашу потенциальную долговечность, то получится, что нам отпущено еще от 50 600 до 7,4 миллиона лет (с 95-процентным доверительным интервалом). Этот интервал укладывается в пределы, выводимые из принципа Коперника, когда мы отталкиваемся лишь от данных о фактической долговечности человека как разумного вида. Обитая на Земле, мы подвергаемся тем же опасностям, что и другие виды, которые уже вымерли. Поскольку мы пока продержались всего около 200 тысяч лет, стоит обеспокоиться, что интеллект совсем не гарантирует нам повышенных шансов на выживание по сравнению с другими видами. Эйнштейн был очень умен, но прожил не дольше большинства из нас. Вполне возможно, что разумность отнюдь не увеличивает срок существования вида.

Может показаться, что это вполне нормально. Да, *Homo sapiens* вымрет, но мы породим еще более разумный вид, который придет нам на смену. Однако Дарвин отмечал, что от большинства видов вообще не остается видов-потомков. Некоторые виды сменяются потомками – те, что умеют хорошо распространяться. Но большинство исчезает с концами. В данном случае отметим, что все остальные человеческие виды (в том числе неандертальцы, *Homo heidelbergensis*, *Homo erectus*, *Homo habilis* и австралопитеки) вымерли. Для сравнения: в отряде грызунов сегодня насчитывается 1600 видов. Они отлично себя чувствуют, их шансы на выживание высоки. В чудесной книге «После человека» Дугал Диксон размышлял о том, к чему могла бы привести эволюция еще через 50 миллионов лет, и его выводы говорят не в нашу пользу. Мы, люди, исчезнем в течение ближайшего миллиона лет. Через 50 миллионов лет из наших современников по-прежнему во множестве сохранятся кролики, но они вымахают до размеров оленя. Охотиться на них будут стаи крысоподобных тварей, которые произойдут от современных грызунов. Самое страшное в этой книге и том будущем, которое он живописует, – в том, насколько оно реалистично и при этом недружелюбно для нас. Среди земных млекопитающих до сих пор не попадалось разумных наблюдателей,

способных задаваться вопросами вроде «Сколько просуществует наш вид?» Разумеется, маловероятно, что на Земле возникнут именно такие животные, которых описал Дугал Диксон, поскольку у эволюции много возможных путей, но в книге отмечается, что, скорее всего, среди животных далекого будущего не будет никаких разумных наблюдателей. Стивен Джей Гулд в том же духе назвал нас «лишь очередным стеклянным шариком» на эволюционной новогодней елке.

Все тот же принцип Коперника применим и ко всей родословной разумных существ, которые могут произойти от нас в будущем. Мы – первый разумный вид в этой ветви (способный задаваться подобными вопросами), на настоящий момент длительность нашего разумного существования составляет 200 тысяч лет (1/65 000 возраста Вселенной) и, следовательно, вся эта разумная ветвь очевидно не вечна[46], в будущем пределы долговечности наших потомков должны быть примерно такими же, как и пределы долговечности нашего вида. Вполне возможно, что мы – единственный разумный вид в нашей эволюционной линии, учитывая, что наш разумный вид – очевидно первый. Это согласуется с замечанием Дарвина, что большинство видов вымирают, не оставляя потомков.

В некоторых случаях не следует прибегать к этой формуле. Например, на свадьбе, когда утихнут поздравления, не нужно говорить, что брак продлится еще 39 минут! Вас пригласили на свадьбу в назначенный час, чтобы засвидетельствовать этот союз. Но, как правило, формула Коперника работает. С тех пор как я ее предложил, она была многократно проверена и позволила успешно спрогнозировать долговечность самых разных явлений – от популярности бродвейских пьес и мюзиклов, до срока действия правительств и сроков пребывания мировых лидеров у власти[47]. Другое исключение: этот метод не подходит для оценки потенциальной долговечности Вселенной. Вы можете жить в особом (пригодном для обитания) месте, поскольку вы – разумный наблюдатель. (Разумных наблюдателей не было в юной горячей Вселенной, такие наблюдатели также, вероятно, должны вымереть к эпохе, когда во Вселенной не останется звезд главной последовательности.) Но относительно других разумных наблюдателей ваше положение во времени и в пространстве должно быть непримечательно. В целом формула Коперника работает потому, что среди всех мест, где могут находиться разумные наблюдатели, найдется лишь немного специфических мест и масса неспецифических. Просто вы обитаете в одном из таких неспецифических мест. Кроме того, ваши текущие наблюдения вряд ли делаются из некоторой уникальной

точки относительно той огромной совокупности других точек, в которых могут находиться разумные наблюдатели.

У нас нет статистических данных о долговечности разумных видов во Вселенной. Мы не знаем, как долго они способны просуществовать. Но мы знаем, сколько уже сами успели просуществовать в качестве разумного вида, и не должны игнорировать этого весомого массива информации. Формула Коперника показывает, как можно на основе этой информации спрогнозировать нашу потенциальную долговечность с 95-процентным доверительным интервалом.

Если вы не уникальны, то следует ожидать, что вы родились в некоторый случайный момент в истории человеческого рода. За последние 200 тысяч лет родились около 70 миллиардов человек. Согласно формуле Коперника, существует 95-процентная вероятность, что в будущем родится еще от 1,8 миллиарда до 2,7 триллиона человек. Будучи рецензентом моей статьи, опубликованной в 1993 году в *Nature*, Брэндон Картер (прославился своей формулировкой антропного принципа) написал, что они с Джоном Лесли и Хольгаром Нильсоном обнаружили, что у любого из нас невелики были шансы родиться в числе первых людей на Земле. Картер, а далее Лесли (развивавший идеи Картера) пришли к такому выводу при помощи байесовской статистики, а Нильсон независимо сделал его, заключив, что любому суждено жить в какой-то случайный период в хронологии человеческого рода, – в том же духе рассуждал и я. У меня нашлись единомышленники.

Вероятно, вы живете в стране, численность населения которой выше медианной. В мире 190 стран, и половина из них – такие, где живет не более 7 миллионов человек. Но поскольку в более густонаселенных странах больше жителей, примерно 97 % всех людей в мире живут в странах с населением выше медианного. Вы родились в стране с населением более 7 миллионов человек? Точно так же, как высока вероятность жить в стране с населением больше медианного, высока и вероятность родиться в такой стране. На самом деле, в наш век Земля более населена, чем когда-либо в истории. Вероятно, вы живете после какого-то события, спровоцировавшего резкий рост населения (например, после изобретения земледелия), но до события, после которого численность населения стремительно упадет. Вероятно, вы живете на пике густонаселенности, когда количество людей превышает медианное значение за век. Такой пик может возникнуть в любой случайный момент человеческой истории. Если вам интересно, сколько людей будет жить после вас, узнайте, сколько жило раньше. Если вы хотите знать, сколь

долгое будущее предстоит человечеству, – обратите внимание, сколько времени человечество уже просуществовало.

Вероятно, вы – представитель разумной цивилизации, численность представителей которой выше медианного значения для других разумных цивилизаций во Вселенной. Причина – та же самая, по которой более высока вероятность жить в густонаселенной стране. Большинство разумных наблюдателей – представители цивилизаций, численность особей в которых выше медианной, и вы, вероятно, один из этих многочисленных наблюдателей, а не из тех немногих, кто представляет цивилизации с численностью ниже медианной. Таким образом, вероятно, что нынешнее население Земли многочисленнее медианной популяции разумных существ во Вселенной. В фантастике все обычно совсем не так: является огромная галактическая цивилизация инопланетян, намеренная напасть на нашу крохотную Землю. Да, здесь есть драматизм – мы как Давид, сталкивающийся с инопланетным Голиафом, – но ситуация не вписывается в теорию вероятности. Вероятно, мы с вами – представители одной из цивилизаций, успешных в плане самовоспроизведения! Высокотехнологичные цивилизации должны отличаться большими популяциями, и мы вправе причислять себя к одной из таких цивилизаций.

В 2015 году Фергюс Симпсон из Университета Барселоны вывел из этого интересное следствие: поскольку мы живем на планете, население которой, вероятно, выше медианного, большинство планет, населенных разумными существами, вероятно, должны быть меньше Земли. Таким образом, при поиске разумной жизни и жизни как таковой логично обращать внимание прежде всего на те планеты, которые меньше Земли.

Кроме того, можно по формуле Коперника с 95-процентным доверительным интервалом спрогнозировать верхний предел средней долговечности таких цивилизаций из нашей Галактики, которые способны вещать в радиодиапазоне. Это значение можно подставить в уравнение Дрейка, которое мы обсуждали в главе 10. Здесь мы исходим из того, что мы, вероятно, не уникальны среди разумных наблюдателей из других цивилизаций, вещающих в радиодиапазоне. Вероятно, мы – представители одной из долгоживущих подобных цивилизаций, поскольку в такой цивилизации со временем должно становиться все больше и больше разумных наблюдателей. Тем не менее среди цивилизаций, вещающих в радиодиапазоне, могут попасться и более долговечные, чем наша, и они тоже – часть выборки, дающей указанный средний результат. Представьте себе сложение цивилизаций, так, чтобы их история образовала одну суммарную хронологию всех цивилизаций. Отсортируйте

радиопередающие цивилизации в порядке возрастания долговечности. Если вы не уникальны, то должны находиться где-то в случайной точке этой хронологии, причем в случайной точке отрезка, относящегося к *Homo sapiens* (соответствующего общей долговечности нашей радиопередающей цивилизации). Мне удалось воспользоваться этой идеей и некоторой нетривиальной алгеброй и с 95-процентной вероятностью спрогнозировать верхний предел средней долговечности радиопередающих цивилизаций: получилось 12 000 лет. Если средняя долговечность в реальности окажется выше, то моя статья от 1993 года, должно быть, была написана необычно рано в истории нашей радиопередающей цивилизации либо необычно рано в хронологии всех радиопередающих цивилизаций. Таким образом, формула Коперника дает нам величину, которую мы можем подставить в формулу Дрейка: L_c < 12 000 лет (с 95-процентной достоверностью). Нил пользовался этой оценкой в главе 10.

Если считать, что разумные виды обычно развиваются до киборгов или генетически модифицируют сами себя, то можно задаться вопросом: а почему я – не разумная машина? Почему я не генномодифицирован?

Если вы считаете, что разумные виды обычно колонизируют Галактику, спросите себя: а почему я не космический первопроходец? В 1950 году Энрико Ферми сформулировал знаменитый вопрос об инопланетянах: где же они все? Почему они еще давным-давно не колонизировали Землю? Принцип Коперника помогает ответить на вопрос Ферми: значительная часть всех разумных наблюдателей по-прежнему должна оставаться на своих родных планетах (иначе вы были бы особенным). Колонизация, должно быть, – нечастое явление. Важно, что это в первую очередь свидетельствует: да, формулой Дрейка можно пользоваться. Оно позволяет оценить количество разумных цивилизаций, возникших на родных планетах независимо друг от друга. Если колонизация происходит нечасто, то мы найдем примерно столько же таких цивилизаций, сколько и обитаемых планет.

Допустим, есть априорное предположение, что обе следующие гипотезы равновероятны:

Г1. Человечество останется на Земле, пока не вымрет.

Г2. В будущем люди колонизируют 1,8 миллиарда жизнепригодных планет в Галактике.

Согласно байесовской статистике, нужно умножать априорные вероятности гипотез Г1 и Г2 на вероятность наблюдения того, что вы

фактически наблюдаете. Согласно гипотезе 1, мы остаемся на Земле, в таком случае вы, человек, со 100-процентной вероятностью обнаружите себя на Земле. Но если людям предстоит колонизировать 1,8 миллиарда планет (то есть при верности гипотезы Г2), то существует вероятность всего 1: 1,8 миллиарда, что вы окажетесь на любой конкретной планете, населенной людьми. Следовательно, даже при исходном допущении, что «остаться на Земле» и «колонизировать Галактику» соотносится как 1: 1, мы учитываем, что в настоящий момент живем на Земле, и по байесовской статистике должны пересчитать шансы как 1: 1,8 миллиарда не в пользу колонизации Галактики. Согласно моей коперниковской аргументации, если вы ничем не примечательны, то существует 1 шанс на 1,8 миллиарда, что вы окажетесь на одной из первых 1/(1,8 миллиарда) планет, населенных людьми, и, следовательно, такой же малый шанс, что нам предстоит колонизировать все эти 1,8 миллиарда планет, если сейчас мы находимся на первой. Тем не менее возможность будущей колонизации хотя бы нескольких планет, в первую очередь Марса, не кажется столь маловероятной и оставляет нам шанс на выживание. Только нужно поторопиться, пока еще существуют космические программы.

Цель пилотируемой космонавтики должна заключаться в повышении наших шансов на выживание путем колонизации космоса. Сделать это можно за разумные деньги. Например, можно было бы отправить на Марс восемь астронавтов (мужчин и женщин), которые могли бы там размножиться и закрепиться, пользуясь местным сырьем. Нужно было бы подобрать группу астронавтов, готовых отправиться на Марс без шанса на возвращение, остаться там, завести детей, внуков. Эти люди стали бы основателями марсианской цивилизации, а не пополнили ряды селебрити, вернувшись на Землю. Таких отчаянных людей найти легко. Стори Масгрейв – астронавт, с которым мы близко знакомы, – говорил, что готов был добровольцем отправиться на Марс в один конец. В группу «Марс-Один» подобралась сотня серьезных кандидатов, желающих стать марсианскими колонистами. Чтобы обеспечить на Марсе биоразнообразие, с собой предполагалось взять замороженные яйца и половые клетки (в таком случае, даже если отправить на Марс всего нескольких астронавтов, у многих людей, родившихся на Земле, могут появиться потомки-марсиане). На Марсе подходящая гравитация (1/3 от земной), есть атмосфера, вода и жизненно необходимые химические соединения – не то что на Луне. Марсианская атмосфера состоит из CO_2, из этого газа можно извлекать кислород для дыхания, а воды очень много в вечной мерзлоте и в

марсианских полярных шапках. Радиация будет вполне переносимой, если расположить колонию на глубине 10 метров и оттуда совершать лишь краткие вылазки на поверхность. Наши предки жили в пещерах – это ждет и первых марсианских колонистов. Орбитальные аппараты уже даже нашли на Марсе несколько неплохих пещерных входов, куда стоит заглянуть.

Я показал, что для развертывания такой колонии на Марсе нам предстоит вывести на орбиту не больше грузов, чем мы уже успели запустить, – это вполне реально. По расчетам Роберта Зубрина, чтобы отправить на Марс восьмерых человек и снабдить их транспортом для экстренного возвращения (которым, надеемся, не придется воспользоваться), потребуется вывести на низкую околоземную орбиту 500 тонн груза. Оттуда эти грузы будут переправлены на Марс, а перед приземлением замедлены методом аэродинамического торможения. По мнению Джерарда О'Нила, для космической колонии требуется всего по 50 тонн груза на человека, чтобы создать «герметичную» биосферу. Чтобы доставить эти 400 тонн на поверхность Марса, на низкую околоземную орбиту придется вывести около 2000 тонн. Следовательно, самодостаточная марсианская колония на восемь человек означает вывод 2500 тонн груза на низкую околоземную орбиту. Для сравнения: ракеты-носители «Сатурн V», использовавшиеся в рамках программы «Аполлон», и космические челноки «Спейс Шаттл» вывели на низкую околоземную орбиту более 10 000 тонн, и это без учета российских и китайских космических кораблей. В настоящее время NASA планирует сконструировать тяжелую ракету-носитель, способную выводить на орбиту 130 тонн груза (ракета-носитель класса Сатурн V). Двадцати запусков хватит для обустройства колонии (для сравнения: в рамках программы «Аполлон» было запущено 18 ракет «Сатурн V»). Одновременно можно собирать четыре такие ракеты, для этого в аэрокосмическом центре им. Кеннеди есть специальное здание для вертикальной сборки. Если на разработку такой ракеты потребуется 10 лет и мы сможем запускать по 10 ракет за каждый 26-месячный цикл пуска, то постройка марсианской колонии будет завершена еще через 9 лет. Если начать сейчас, то через 19 лет у нас будет готовая колония. На момент написания этих строк человеческой космонавтике уже 55 лет; принцип Коперника подсказывает, что существует 50-процентная вероятность, что финансирование космических программ продлится еще 55 лет. Этого достаточно, чтобы обустроить колонию на Марсе. Основание такой колонии имеет смысл. Илон Маск, глава компании Space X, заинтересован в частном финансировании колонизации Марса. Однажды мы вместе с ним стояли на

трибуне на конференции о Марсе, организованной Робертом Зубрином. Я изложил свои соображения, почему человечество попробует колонизировать Марс в ближайшем будущем, а Илон рассказал, как он собирается этим заниматься! Нил описал путь к Марсу в своей книге «Космические хроники» (*Space Chronicles*). Основание колонии на Марсе изменит ход всей мировой истории – на самом деле сама история перестанет быть «одномировой». Недавно на эту тему высказался Стивен Хокинг, отметивший в интервью на сайте bigthink.com: «Думаю, что в долгосрочной перспективе будущее человеческой расы должно продолжаться в космосе. Сложно будет избежать катастрофы на планете Земля в течение ближайшего столетия, не говоря уж о тысячелетии или о миллионе лет. Человечеству не следует держать все яйца в одной корзине либо на одной планете. Давайте надеяться, что не уроним эту корзину прежде, чем успеем вынуть из нее яйца».

Если у каждой пары марсианских колонистов будет в среднем по четверо детей, то марсианская популяция сможет удваиваться каждые 30 лет, а через 600 лет достигнет 8 миллионов (небольшие популяции легко разрастаются – считается, что вся исходная популяция австралийских аборигенов происходит всего от 30 человек, переправившихся на континент на плотах из Индонезии около 50 000 лет назад. К моменту прихода европейцев эта популяция выросла как минимум до 300 000, как максимум – до миллиона человек). Если вы опасаетесь, что финансирование марсианской программы может иссякнуть, то следует планировать как раз самодостаточную колонию. Не нужно отправлять астронавтов на Марс, а затем возвращать их на Землю. Колонизация Марса обеспечит нашему виду два шанса вместо одного, и в долгосрочной перспективе наши шансы на выживание также могут удвоиться. Это будет как подстраховка на случай катастрофы, которая может настигнуть нас на Земле: и от климатических катаклизмов, и от столкновения с астероидом, и от неожиданных эпидемий. Кроме того, таким образом можно удвоить шансы когда-нибудь попасть к альфе Центавра. Колонисты могут закладывать новые колонии. Первые слова на Луне были сказаны по-английски не потому, что Англия отправила астронавтов на Луну, а потому, что Англия основала колонию в Северной Америке и представители этой страны полетели на Луну.

Если осмотреться, то Вселенная сама подскажет нам, что делать. Мы живем на крошечной пылинке в огромной Вселенной. Вселенная словно говорит: расселяйтесь, расширяйте среду обитания, так у вас будет больше шансов выжить. Мы живем на планете, усыпанной костями вымерших животных, а возраст нашего вида минимален по сравнению с возрастом

всей Вселенной. Мы должны расселиться, пока не вымерли. Нашей космонавтике пока примерно полвека, но мы уже можем посылать космические корабли к другим планетам. Ее нужно использовать максимально разумно, пока она еще есть. Решимся ли мы отправиться в путь или отвернемся от Вселенной? Сейчас мы с вами беседуем об этом на Земле – что само по себе служит предостережением, насколько велика вероятность остаться запертыми на этой планете.

Летом 1969 года я побывал не только у Берлинской стены, но и в Стоунхендже. На тот момент Стоунхенджу было примерно 3870 лет. И он все еще там стоит! Еще я ездил во Флориду, специально чтобы посмотреть на запуск ракеты «Сатурн V», на которой Нил Армстронг, Базз Олдрин и Майкл Коллинз отправились на Луну на «Аполлоне-11». К тому моменту ракеты «Сатурн V» летали к Луне уже на протяжении семи месяцев. Еще через 3,5 года такие лунные запуски «Сатурн V» прекратились. Старт ракеты «Сатурн V» вышел запоминающимся (см. мой снимок на рис. 24.4). Ракета поднималась все выше и выше и выглядела при этом как волшебный меч, за которым тянулся куда более длинный хвост огня. Я никогда не видел ничего подобного. Посмотреть на запуск собрались до миллиона человек. Все наблюдали за запуском в полной тишине, но когда ракета скрылась за высокой пеленой перистых облаков, толпа взорвалась всеобщим ликованием. Освоение космоса – вот чем нам следует заняться.

Рис. 24.4. Взлет Аполлона-11. Снимок предоставлен Дж. Ричардом Готтом

Наш разум наделяет нас большим потенциалом, возможностью колонизировать Галактику и превратиться в сверхцивилизацию, но для большинства разумных видов это, должно быть, недостижимо – либо окажется, что мы особенные, поскольку мы разумны, но до сих пор живем всего на одной планете. Источники энергии, имеющиеся в нашем распоряжении, значительно уступают по мощности нашему Солнцу. Мы не очень могучи и существуем недавно. Но мы разумны, уже многое узнали о Вселенной и о законах, которым она подчиняется – как давно она возникла, когда во Вселенной возникли галактики и звезды. Это ошеломительное достижение, историю которого мы вам здесь и рассказали.

Благодарности

Эта книга, а также лекционный курс, который лег в ее основу, появились в результате труда множества людей. Для начала поблагодарим наших коллег из Принстонского университета, от которых мы так много узнали за долгие годы и которые смогли создать такую плодотворную и доброжелательную атмосферу, в которой нам довелось работать. Особенно благодарим профессора Нету Бакал, сформулировавшую исходную идею, на основе которой и сложилось наше трио.

Благодарим наших студентов, в том числе Каллена Блейка (Cullen Blake), Уэса Колли (Wes Colley), Джули Комерфорд (Julie Comerford), Дэниэла Грина (Daniel Grin), Юнь-Шань Ло (Yeong-Shang Loh), Джастина Шефера (Justin Schafer), Джошуа Шрёдера (Joshua Schroeder), Зака Слепяна (Zack Slepian), Искру Стратеву (Iskra Strateva) и Майкла Фогели (Michael Vogeley). Благодарим Рамина Ашрафа (Ramin Ashraf), Сората Тунгкасири (Sorat Tungkasiri), Паулу Бретт (Paula Brett), Софию Кирхакос Стросс (супругу Майкла) и Кэти Грически (Kathy Gryzeski) за помощь в работе, а также Люси Поллард-Готт (супругу Рича), которая вычитала и отредактировала всю книгу. Благодарим Роберта Дж. Вандербея за то, что поделился некоторыми своими астрофотографиями, а также Ли-Синь Ли за помощь с иллюстрациями. Также благодарим Адама Берроуза (Adam Burrows), Криса Чибу (Chris Chyba), Матиаса Залдарриагу (Matias Zaldarriaga), Роберта Дж. Вандербея и Дона Пейджа (Don Page) за ценные замечания.

В Принстонском университете благодарим нашего выпускающего редактора Марка Беллиса (Mark Bellis), нашего корректора Сида Вестморленда (Cyd Westmoreland), а также нашего редактора Ингрид Гнерлих (Ingrid Gnerlich) за ее беспримерную веру и прозорливость.

Майкл Стросс
Нил Деграсс Тайсон
Дж. Ричард Готт

Приложение 1
Вывод формулы $E = mc^2$

Допустим, вы находитесь в лаборатории, где частица медленно движется слева направо со скоростью v гораздо ниже c (то есть $v << c$). Частица подчиняется законам Ньютона, и если она имеет массу m, то, согласно Ньютону, у нее будет импульс $P = mv$, направленный вправо. Частица испускает в противоположных направлениях два фотона (один влево, другой вправо), каждый из которых обладает энергией $E = h\nu_0$.Частица теряет энергию в количестве $\Delta E = 2h\nu_0$, равную той энергии, которую «с точки зрения частицы» уносят два фотона. Эйнштейн показал, что импульс фотона равен его энергии, деленной на скорость света c. С точки зрения частицы фотоны уносят равное количество импульса, но в противоположных направлениях. Поэтому общий импульс двух фотонов «с точки зрения частицы» равен нулю. Частица «считает», что находится в покое (по первому постулату Эйнштейна), и испускает два одинаковых фотона в противоположных направлениях. По соображениям симметрии, если находящаяся в покое частица испускает два равночастотных фотона в противоположных направлениях, то она и остается в покое. Мировая линия частицы остается прямой – скорость ее не меняется (см. рис. 18.4).

Фотон, летящий вправо, в итоге врежется в правую стену лаборатории. Он ударит в стену, и стена немного отскочит вправо. Так действует давление излучения: стена поглощает импульс фотона и под влиянием этого импульса начинает немного сдвигаться вправо. Наблюдатель, сидящий на правой стене, увидит, что в правую стену врезался прилетевший слева фотон и частота этого фотона выше, чем была в момент излучения (сдвинута в синюю часть спектра), поскольку частица движется в сторону правой стены. Это проявление эффекта Доплера. Для сравнения: наблюдатель, сидящий на левой стене, увидит, что летящий влево фотон смещен в красную часть спектра и частота его ниже, чем в момент излучения, поскольку частица удаляется от этого наблюдателя. Более высокочастотный (синий) фотон обладает большим импульсом, чем более низкочастотный (красный). Поэтому толчок в правую стену (с отскоком вправо) будет сильнее, чем толчок в левую стену (с отскоком влево). Два толчка не уравновешиваются, и в целом лаборатория получает импульс вправо. Давайте вычислим, каков этот суммарный толчок.

Время между прохождением гребней волны излученных фотонов (воспринимаемых как волны света), измеренное частицей, равно Δt_0. Время между испусканием двух гребней волны, Δt_0, равно единице, деленной на частоту света 0 с точки зрения частицы. Допустим, частота света – 100 циклов в секунду; например, время между прохождениями соседних гребней волны составляет 1/100 секунды. Тогда $\Delta t_0 = 1/\nu_0$. Пусть v – скорость частицы относительно лаборатории. Часы на частице будут тикать (в системе координат покоя в лаборатории) с частотой $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ по сравнению с часами в лаборатории, об этом мы уже говорили. Но при этих расчетах предполагается, что $v << c$, поэтому мы игнорируем все члены порядка (v^2/c^2), уделяя внимание лишь членам порядка (v/c). (Например, если $v/c = 10^{-4}$, что соответствует 30 км/с, скорости вращения Земли вокруг Солнца, то $v^2/c^2 = 10^{-8}$; этот второй член настолько мал, что им можно пренебречь по сравнению с первым.) Поскольку мы работаем в пределе $v << c$, частота тиканья часов на частице, в принципе, не отличается от частоты тиканья лабораторных часов. Таким образом, интервал времени между ударами часов на частице (Δt_0) и в лаборатории ($\Delta t'$), в принципе, одинаковы, поскольку частица движется так медленно.

Наблюдатель, находящийся в состоянии покоя относительно лаборатории, видит, что между прохождениями первого и второго гребней волны, испущенной частицей, проходит время $\Delta t_0 = \Delta t' = 1/\ 0$. (См. рис. 18.4, где интервал времени показан в виде вертикальной прерывистой линии.) В момент, когда частица испустит вправо следующий гребень волны, он отстанет от первого гребня на расстояние $d = (c - v)\Delta t'$.Оно равно расстоянию, преодолеваемому лучом света за время $\Delta t'$ (то есть $c\Delta t'$) минус расстояние, пройденное частицей (равное $v\Delta t'$). Оба гребня летят вправо со скоростью света c (согласно второму постулату Эйнштейна); следовательно, они летят параллельно, и расстояние между ними остается постоянным $d = (c - v)\ \Delta t'$.Длина световой волны $\lambda_П$, регистрируемая наблюдателем, сидящим на правой стене лаборатории, равна этому расстоянию между гребнями волны, то есть $\lambda_П = (c - v)\ \Delta t'$.Пространственно-временная схема на рис. 18.4 иллюстрирует этот мысленный эксперимент. Расстояние $\lambda_П$ между гребнями волны измеряется в некоторый момент лабораторного времени (по горизонтали на данной пространственно-временной схеме).

Следовательно, временной интервал между прибытием двух гребней волны к правой стене равен $\Delta t_П = \lambda_П/c = (c - v)\ \Delta t'/c$, а наблюдаемая частота

фотона, летящего вправо, составит $\nu_П = 1/\Delta t_П = c/[(c - v)\ \Delta t'] = \nu_0 c/(c - v)$. Теперь при $v << c$ величина $c/(c - v)$ примерно равна $1 + (v/c)$, здесь в v/c остаются лишь члены первого порядка.(Например, если $v/c = 0{,}00001$, $c/(c - v) = 1/0{,}99999 = 1{,}00001$ с высокой точностью – можете проверить на калькуляторе.) Следовательно, наблюдатель, сидящий у правой стены лаборатории, видит, что летящий к нему фотон врезается в стену, имея частоту $\nu_П = \nu 0[1 + (v/c)]$.Он наблюдает более высокую частоту, чем была у фотона в момент излучения, и эта частота больше исходной в $[1 + (v/c)]$ раз в силу доплеровского эффекта, где v – скорость частицы. Это стандартная формула доплеровского эффекта для света, смещенного в синюю часть спектра; этот свет попадает в правую стену лаборатории и был излучен частицей, которая на низкой скорости v летит к стене.

Попадая в правую стену, летевший вправо фотон сообщает ей направленный вправо импульс $h\nu_П/c = h\nu_0[1 + (v/c)]/c$.

Также частица излучает фотон, летящий влево. В итоге он врежется в левую стену. Наблюдатель, сидящий у левой стены лаборатории, видит, что этот фотон, летящий к нему, имеет частоту $\nu_Л = \nu_0[1 - (v/c)]$.Знак скорости в формуле меняется на обратный, поскольку наблюдатель у левой стены видит, как частица удаляется от него со скоростью v.Частота волны с его точки зрения ниже, чем в момент излучения, это объясняется доплеровским эффектом. Следовательно, суммарный направленный вправо импульс, который лаборатория получит от двух фотонов, равен импульсу, который был передан летящим вправо фотоном $h\nu_0[1 + (v/c)]/c$ минус импульс, сообщенный фотоном, летящим влево, $h\nu_0[1 - (v/c)]/c$. Имеем формулу $2h\nu_0(v/c2)$ для общего импульса вправо, который два фотона сообщают лаборатории. Лаборатория приобретает такой общий импульс, поскольку более высокочастотный (голубой) фотон, летящий вправо, ударяет стену сильнее, и этот удар не компенсируется более слабым толчком, который сообщает летящий влево более низкочастотный (красный) фотон. Итак, $2h\nu_0 = \Delta E$ – это всего лишь энергия, испускаемая частицей в виде двух фотонов. Направленный вправо импульс, полученный лабораторией, равен $\Delta E\ v/c^2$.Множитель v/c^2 получается из множителя v/c, обусловленного доплеровским смещением, и множителя $1/c$ в силу соотношения импульса и энергии, которую несут фотоны.

По закону сохранения импульса величина импульса, приобретенного лабораторией, должна быть равна величине импульса, потерянного частицей. Импульс частицы равен mv (поскольку $v << c$, формула Ньютона

для импульса в данном случае точна). Скорость частицы не изменяется, и поэтому потерять часть импульса mv частица может лишь одним способом – потеряв часть массы. Уменьшение ее импульса составляет $v\Delta m$, где Δm – масса, утраченная частицей.

Приравняв $\Delta E\ v/c^2 = v\Delta m$, находим, что $\Delta E/c^2 = \Delta m$. Невысокая скорость v нашей частицы сокращается! Поскольку $v << c$, ответ не зависит от v. Умножив обе части формулы на c^2, получим $\Delta E = \Delta mc^2$. Частица теряет массу. Количество утраченной массы Δm, умноженное на c^2, дает количество энергии, унесенной фотонами ΔE. Убираем знаки «дельта» (Δ) с обеих сторон тождества и получаем $E = mc^2$. Энергия, отдаваемая двумя фотонами, равна произведению массы, которую утрачивает частица, на скорость света в квадрате c^2. Теряя массу, частица испускает некоторое количество энергии, определяемое по формуле $E = mc^2$. Во множестве книг объясняется важность этой формулы и рассказывается, как она устроена, но там не пишут, как выводится эта формула. Теперь мы вам об этом рассказали.

Приложение 2
Бекенштейн, энтропия черных дыр и информация

На современных шестидюймовых[48] жестких дисках можно хранить примерно по 5 терабайт, или 4×10^{13} бит, информации. Сколько бит информации, в принципе, возможно записать на шестидюймовый жесткий диск? Во-первых, поскольку это мысленный эксперимент, вообразим, что наш жесткий диск сферический – так мы сможем вложить в этот объем максимум информации. Наш жесткий диск получится размером примерно с грейпфрут, его радиус составит 7,5 см. Бекенштейн показал, что черная дыра обладает конечной энтропией, пропорциональной площади ее горизонта событий. В итоге оказалось, что энтропия горизонта черной дыры (S) в точности равна 1/4 площади горизонта событий, если измерить эту площадь в планковских единицах в квадрате (в конечном итоге точное значение вычислил Хокинг). В планковских единицах площадь поверхности черной дыры радиусом 7,5 см составляет $4\pi(7{,}5\text{ см}/1{,}6 \times 10^{-33}\text{ см})^2 = 2{,}76 \times 10^{68}$. Четверть от этого значения составит энтропия $S = 6{,}9 \times 10^{67}$. Конкретное значение энтропии (возрастания неупорядоченности) соответствует конкретной мере уничтожения информации. Количество битов этой информации, соответствующее энтропии S, составляет $S/\ln 2$. Натуральный логарифм от 2 (обозначенный в этой формуле «ln 2») равен 0,69. Здесь присутствует двойка, так как один бит информации – это один ответ на вопрос «да/нет», то есть вопрос, предполагающий два варианта ответа. (Например, игра «Да или нет» с 20 вопросами дает 20 битов информации.) Если я скажу вам, что задумал число от 1 до 2^{20}(около миллиона), то, пытаясь его угадать, вы первым делом должны спросить: «Оно во второй половине этого интервала?» Узнав, в какой оно части, продолжайте делить этот диапазон пополам, и через 20 вопросов узнаете, какое число я загадал. Следовательно, возникновение черной дыры радиусом 7,5 см – это повышение неупорядоченности во Вселенной, равное уничтожению 10^{68} бит информации. Есть $_2 10^{68}$ различных способов создать такую черную дыру, взяв для нее 10^{68} бит информации, и, как только черная дыра сформируется, вся эта информация о ее составе будет потеряна. Если на вашем шестидюймовом диске записано более 1068 битов

информации, и вы станете подвергать его гравитационному коллапсу, сжимая, пока он не превратится в микроскопическую черную дыру, то вся эта информация будет потеряна. Впрочем, вы не сможете создать микроскопическую черную дыру, поскольку при черная дыра, при образовании которой теряется более 10^{68} битов информации, должна иметь диаметр больше 6 дюймов. Противоречие. Что же произойдет на самом деле, если мы попытаемся впихнуть все больше и больше информации на жесткий диск с фиксированным радиусом 7,5 см? Его масса будет расти и расти, пока не наступит момент, когда на нем окажется 10^{68} бит информации, а масса диска в 8,4 раза превысит массу Земли и он сколлапсирует, превратившись в черную дыру. Следовательно, 10^{68} бит информации ($1{,}16 \times 10^{58}$гигабайт) – предельное количество информации, которое можно сохранить на шестидюймовом жестком диске.

Список литературы

Abbott, E.A. *Flatland*. New York: Dover, 1992.

Bienen, H.S., and N. van de Walle. *Of Time and Power*. Stanford, CA: Stanford University Press, 1991.

Brown, M. *How I Killed Pluto and Why It Had It Coming*. New York: Spiegel & Grau/Random House, 2010. (Перевод: Майк Браун, Как я убил Плутон и почему это было неизбежно, М.: Карьера Пресс, 2012.)

Ferris, T. *The Whole Shebang*. New York: Simon and Schuster, 1997.

Feynman, R. *The Character of Physical Law*. Cambridge, MA: MIT Press, 1994. (Перевод: Ричард Фейнман, Характер физических законов, М.: АСТ, 2016.)

Gamow, G. *One, Two, Three… Infinity*. New York: Dover, 1947.

Goldberg, D. *The Universe in the Rearview Mirror*. Boston: Dutton/Penguin, 2013.

Goldberg, D., and J. Blomquist. *A User's Guide to the Universe*. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.

Gott, J. Richard. *Time Travel in Einstein's Universe*. Boston: Houghton Mifflin, 2001.

Gott, J. Richard. *The Cosmic Web*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2016.

Gott, J. Richard, and R.J. Vanderbei. *Sizing Up the Universe*. Washington, DC: National Geographic, 2010.

Gould, S.J. *Wonderful Life*. New York: W.W. Norton, 1989.

Greene, B. *The Elegant Universe*. New York: Vintage Books, 1999. (Перевод: Брайан Грин, Элегантная Вселенная, М.: Либроком, 2017.)

Hawking, S.W. *A Brief History of Time*. New York: Bantam Books, 1988. (Перевод: Стивен Хокинг, Краткая история времени, М.: АСТ, 2017.)

Kaku, M. *Hyperspace*. New York: Doubleday, 1994. (Перевод: Митио Каку, Гиперпространство, М.: Альпина нон-фикшн, 2017.)

Lemonick, M.D. *The Light at the Edge of the Universe*. New York: Villard Books/Random House, 1993.

Lemonick, M.D. *The Georgian Star*. New York: W.W. Norton, 2009.

Lemonick, M.D. *Mirror Earth*. New York: Walker & Company, 2012.

Leslie, J. *The End of the World*. London: Routledge, 1996.

Misner, C.W., Thorne, K.S., and J.A. Wheeler. *Gravitation*. San Francisco: Freeman, 1973. (Перевод: Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж., Гравитация, в 3-х

т. М.: Мир, 1977.)

Novikov, I.D. *The River of Time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. (Русскоязычный оригинал: Новиков И., Куда течет река времени? М.: Молодая гвардия, 1990.)

Ostriker, J.P., and S. Mitton. *Heart of Darkness*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2013.

Peebles, P.J.E., Page, L.A., Jr., and R.B. Partridge. *Finding the Big Bang*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

Pickover, C.A. *Time: A Traveler's Guide*. New York: Oxford University Press, 1998.

Rees, M. *Our Cosmic Habitat*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2001. (Перевод: Мартин Рис, Наша космическая обитель. М.: Институт компьютерных исследований, 2002.)

Rees, M. (ed.). *Universe*. Revised edition. New York: DK Publishing, 2012.

Sagan, C. *Cosmos*. New York: Random House, 1980. (Перевод: Карл Саган, Космос. СПб.: Амфора, 2013.)

Shu, F. *The Physical Universe*. Sausalito, CA: University Science Books, 1982.

Taylor, E.F., and Wheeler, J.A. *Spacetime Physics*. San Francisco: W.H. Freeman, 1992. (Перевод более раннего издания: Тейлор Э., Уилер Дж. Физика пространства-времени. М.: Мир, 1971.)

Thorne, K.S. *Black Holes and Time Warps*. New York: Norton, 1994. (Перевод: Кип Торн, Черные дыры и складки времени. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 2009.)

Tyson, N. deG. *Death by Black Hole*. New York: W.W. Norton, 2007. (Перевод: Нил Деграсс Тайсон, Смерть в черной дыре. М.: АСТ, 2016.)

Tyson, N. deG. *The Pluto Files*. New York: W.W. Norton, 2009.

Tyson, N. deG. *Space Chronicles*. New York: W.W. Norton, 2012.

Tyson, N. deG., and D. Goldsmith. *Origins*. New York: W.W. Norton, 2004.

Tyson, N. deG., C.T.-C. Liu, and R. Irion. *One Universe*. New York: John Henry Press, 2000.

Vilenkin, A. *Many Worlds in One*. New York: Hill and Wang/Farrar, Straus and Giroux, 2006. (Перевод: Алекс Виленкин, Мир многих миров. М.: Астрель, Corpus, 2011.)

Wells, H.G. *The Time Machine* (1895), reprinted in The Complete Science Fiction Treasury of H.G. Wells. New York: Avenel Books, 1978. (Перевод: Герберт Уэллс, Машина времени. СПб.: Северо-Запад, 2018.)

Zubrin, R.M. *The Case for Mars*. New York: Free Press, 1996. (Перевод: Роберт Зубрин, Курс на Марс. М.: Эксмо, 2017.

notes

Примечания

1

Если быть точным, в мегабайте 2^{20} = 1 048 576 байт, а в гигабайте 2^{30} = 1 073 741 824 байт. Но вообще эти величины округляются примерно до миллиона и до миллиарда. – *Примеч. авт*.

2

То есть во Вселенной 10^{81} атомов. Чтобы представить *гуголплекс, надо на каждом атоме нарисовать 10^{19} нулей. – Примеч. науч. ред.*

3

Для этих фаз в ходу также названия *молодая луна* и *старая луна*. – *Примеч. науч. ред*.

4

Для этой фазы иногда используется название «прибывающая луна». – *Примеч. науч. ред.*

5

Строго говоря, описываемая здесь величина в астрономии называется блеском. Яркость же в строгом смысле – это количество света, отнесенное к телесному углу, по котором виден источник. Так понимаемая яркость не зависит от расстояния: например, диск Солнца на Плутоне такой же яркий, как на Земле, только размер его намного меньше, а потому меньше и блеск. Однако по соображениям простоты изложения в книге слово «яркость» используется в смысле блеска. – *Примеч. науч. ред.*

6

По-видимому, здесь неточность. Вся жизнь Солнца после схождения с главной последовательности продлится менее 2 млрд лет. Из них на этап горения гелия придется около 100 млн лет. – *Примеч. науч. ред.*

7

Не совсем ясно, на каком основании делается это утверждение. Известен целый ряд комет с почти параболическими орбитами, афелии которых до входа во внутренние области Солнечной системы находились примерно на тех расстояниях, где предположительно располагается Облако Оорта. – *Примеч. науч. ред.*

8

Например, комета Хейла – Боппа, около 35 километров в поперечнике, была открыта всего за два года до того, как максимально приблизилась к Солнцу. Если бы она угодила в Землю, то произошел бы взрыв мощностью 4 миллиарда мегатонн в тротиловом эквиваленте, что в 60 миллионов раз сильнее мощнейшего в истории взрыва водородной бомбы. – *Примеч. авт*.

9

Койпер считал, что малые планеты, если и возникли вблизи орбиты Плутона, должны были сместиться в очень отдаленные области. Существование пояса Койпера было доказано в 1980 году уругвайским астрономом Хулио Анхель Фернандесом. – *Примеч. пер*.

10

Шумейкеров было двое: Юджин и его жена Катарина. – *Примеч. пер*.

11

В англоязычной литературе обитаемую область часто называют «зоной Златовласки». Это название отсылает к английской сказке «Златовласка и три медведя», мы знаем ее под названием «Три медведя». – *Примеч. пер.*

12

Хотя импактная (то есть связанная с ударом астероида) теория вымирания динозавров популярна среди астрономов и широкой публики, палеонтологи относятся к ней довольно скептически. – *Примеч. науч. ред.*

13

В своей книге «Жизнь как она есть» (*Life Itself*) Фрэнсис Крик указывает, что фактически многоклеточная жизнь развивалась всего несколько сотен миллионов лет, а как быстро может произойти скачок от одноклеточной жизни к многоклеточной и в самом ли деле для этого необходимы миллиарды лет – мы пока не знаем. – *Примеч. науч. ред*.

14

Альбедо – отражательная способность. – *Примеч. науч. ред.*

15

Согласно некоторым источникам, такое представление ошибочно, например мозг колибри весит 1/12 от ее тела. – *Примеч. пер.*

16

Именно таков сюжет романа Стивена Кинга «Противостояние», в более поздней редакции – «Исход». – *Примеч. пер.*

17

Может быть, сценариста тоже стоит освободить прямо в зале суда? Сначала Джоди говорит, что только в нашей Галактике 400 миллиардов звезд, а в конце упоминает уже миллионы цивилизаций. А где – не уточняет, только ли в нашей Галактике, либо во Вселенной вообще. Проверим такой вариант. В видимой части Вселенной 130 миллиардов галактик (Джоди ищет инопланетян, и область поиска ограничена видимой частью Вселенной). В таком случае следует умножить 0,0000004 цивилизации на 130 миллиардов – и получится 52 тысячи в видимой части Вселенной. Таким образом, 52 тысячи, но не миллионы. Так что даже такой вариант не годится. – *Примеч. авт*.

18

«Класс М» для планет земного типа с океанами и кислородной атмосферой появился в фантастическом сериале «Звездный путь». Однако в 2011 году в университете Аресибо (Пуэрто-Рико) была предложена научная термическая классификация потенциально обитаемых экзопланет, в которой класс М (мезопланеты) соответствует средней температуре поверхности от 0 до 50 °С. – *Примеч. пер.*

19

Фантастический двигатель для прыжков через гиперпространство. – *Примеч. пер*.

20

По числу атомов. По массе гелия примерно 23 %, а водорода – 75 %.– *Примеч. науч. ред.*

21

Изотропность (или изотропия) – одинаковость по всем пространственным направлениям. Излучение изотропно, если его характеристики не зависят от того, в каком направлении смотреть. Также можно понимать изотропность, как однородность на всему небу. – *Примеч. науч. ред.*

22

WIMPs – Weakly Interacting Massive Particle (слабо взаимодействующие массивные частицы). – *Примеч. науч. ред.*

23

Анизотропия – отклонение от изотропности. – *Примеч. науч. ред.*

24

Серия самых значимых скачек в США – «Кентукки-дерби» (в Луисвилле, штат Кентукки), «Прикнесс Стэйкс» (в Балтиморе, штат Мэриленд) и «Белмонт Стэйкс» (в парке в Elmont, Нью-Йорк). – *Примеч. науч. ред*.

25

Философ Карл Поппер выдвинул критерии научности, согласно которым важной чертой научной теории является ее потенциальная опровержимость. – *Примеч. авт*.

26

Я наблюдаю светочасы астронавта в том виде, как они показаны на рис. 17.1.В общем случае астронавт движется мимо меня со скоростью v.Астронавт движется слева направо, и в том же направлении, на мой взгляд, движутся его часы. Свет пролетает по диагонали 30 см, а ракета за то же время пролетает слева направо на v/c.За это время свет успевает пройти по вертикали на $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$. Дело в том, что прямоугольный треугольник, состоящий из диагонали-гипотенузы с длиной 1, горизонтального катета с длиной v/c и вертикального катета с длиной $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, удовлетворяет теореме Пифагора. Квадрат $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ равен $[1 - (v^2/c^2)]$, а сумма этой величины и (v^2/c^2) дает 1^2.Пифагор одобряет. За то время, пока луч света в моих часах продвинется на 30 см вверх, луч света в светочасах астронавта пройдет всего лишь $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ от 30 см. За то время, пока я постарею на 10 лет, астронавт постареет на 10 умножить $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ лет. – *Примеч. авт*.

27

$\sqrt{1 - (v^2/c^2)} = \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$

28

J.Richard Gott, “Will We Travel Back (or Forward) in Time?” *Time Magazine*, April 10, 2000, 68–70.

29

На самом деле предпоследней. – *Примеч. пер*.

30

Тензор кривизны Римана $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ в четырех измерениях содержит 256 компонент. Каждый из этих четырех индексов (один верхний и три нижних) – α, β, γ и δ – может принимать одно из четырех значений, соответствующих одному из четырех измерений пространства-времени (*t*, *x*, *y* и *z*). Получается 4 × 4 × 4 × 4 = 256 компонент. – *Примеч. авт*.

31

$T\mu\nu$ – это тензор энергии-импульса, описывающий свойства материи в конкретной точке пространства-времени: плотность массы-энергии, давление, плотность, поток энергии и поток импульса. Параметр $g_{\mu\nu}$, с которым мы уже сталкивались ранее (в плоском пространстве-времени он задается формулой $ds^2 = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$), описывает, как измеряются расстояния в пространстве и промежутки времени. $R_{\mu\nu}$ и R можно вычислить по компонентам риманова тензора кривизны. У тензоров в уравнениях Эйнштейна по два индекса, каждый из которых может принимать любое из четырех значений. Таким образом, получается $4 \times 4 = 16$ уравнений. Десять из этих уравнений независимы. – *Примеч. авт.*

32

Из лекции, прочитанной в университете Глазго 20 июня 1933 года. Опубликовано в работе Эйнштейна *The Origins of the Theory of Relativity*, в оригинале цитируется по *Mein Weltbild* (Amsterdam: Querido Verlag, 1934), 138; и Ideas and Opinions (репринтное издание; New York: Broadway Books, 1995), 289–290.

33

Прозрачный намек на песню Hotel California. – *Примеч. пер*.

34

Из личной беседы с Доном Пейджем, учеником Хокинга. Он также рассказывает об этом в “Hawking Radiation and Black Hole Thermodynamics” Don N.Page, Alberta University, September 2004.Published in *New Journal of Physics* 7 (2005): 203, ALBERTA-THY-18-04 DOI: 10.1088/1367-2630/7/1/203, e-Print: hep-th/0409024 | PDF.Этот рассказ согласуется с данными из книги самого Хокинга «Краткая история времени», с.99–105.

35

Перевод Ильи Ратнера. В оригинале этот лимерик звучит так: There was a young lady of Wight // Who traveled much faster than light.// She departed one day, // In a relative way, // And arrived on the previous night. – *Примеч. науч. ред.*

36

Мы с Марком Олпертом исследовали, как во Флатландии будет действовать общая теория относительности. Мы обнаружили, что пространство вокруг точечной массы будет иметь коническую геометрию, а отдаленные объекты во Флатландии не будут притягиваться друг к другу, поскольку пространство там является локально плоским (то есть из листа бумаги можно изготовить конус, вырезав сегмент и склеив его края). Такое исследование Флатландии в конечном итоге вдохновило меня поработать над космическими струнами. Чтобы получить точное решение для космической струны, оказалось достаточно добавить вертикальную координату к решению, найденному для точечной массы во Флатландии. В данном случае такое исследование вымышленного мира натолкнуло нас на некоторые решения, представляющие интерес в реальном мире. Поскольку точечные массы во Флатландии не испытывают гравитационного притяжения друг к другу, в таком мире сложнее протекала бы агрегация массы, необходимая для образования планет. – *Примеч. авт*.

37

В 1984 году А.Дьюдни развил эту идею в своей книге «Планиверсум». В 2007 году на экраны вышел анимационный фильм по книге «Флатландия» с Мартином Шином и Кристен Белл в главных ролях, которые озвучили Артура Сквера (Квадрат) и его дочь Гекс (Шестиугольник). Когда я учился на старших курсах в Гарварде, один из моих наставников, Томас Бэнчофф, добавил на DVD специальные математические комментарии, которые были записаны на DVD отдельной дорожкой. – *Примеч. авт*.

38

По уточненным данным, полученным рентгеновской обсерваторией «Чандра» в 2011 г., масса Лебедь X-1 составляет 14,8 солнечной. – *Примеч. пер*.

39

В моей статье, опубликованной в 1982 году в журнале *Nature*, я написал: «Наша Вселенная – это один из обычных вакуумных пузырей». – *Примеч. авт*.

40

В той самой статье, написанной по мотивам исследований Сидни Коулмана о формировании пузырьков, я обозначил квантовое туннелирование как процесс, в результате которого должны возникать пузырьковые вселенные. «Следовательно, можно предположить, что наша Вселенная образовалась в результате квантового туннелирования». – *Примеч. авт*.

41

Статья Хокинга называлась «Формирование нерегулярностей в одиночной пузырьковой инфляционной вселенной», в ней были ссылки на работы Линде, Стейнхардта и Альбрехта, а также на мои. События того года описаны в книге *Physics News in 1982*, опубликованной Американским институтом физики. На обложке этой книги использовалась ключевая схема из моей статьи. – *Примеч. авт.*

42

Эта тема подробно раскрыта в моей книге *Cosmic Web* (2016). – *Примеч. авт.*

43

Обозначения соответствуют английским названиям кварков: up, down, strange, charm, beauty, truth.Для двух последних есть альтернативные названия bottom и top, но в переводе на русский они путаются с верхним и нижним кварками, и потому этих названий избегают. – *Примеч. науч. ред.*

44

Все три сценария, $w > -1$, $w = -1$ и $w < -1$, а также их следствия, я еще подробнее рассмотрел в книге *The Cosmic Web*. – *Примеч. авт*.

45

Эти данные я опубликовал в журнале *Nature* 27 мая 1993 года в статье под названием Implications of the Copernican Principle for our Future Prospects. – *Примеч. авт.*

46

Насколько вероятно, что наш разумный род (*Homo Sapiens* и его разумные потомки) просуществует вечно? Сейчас нашему роду около 200 тысяч лет. Это очень мало по сравнению с возрастом Вселенной, 1/65 000.По мере взросления нашего вида отношение его возраста к возрасту Вселенной должно стремиться к 1; если наши разумные потомки просуществуют вечно, то большинство наблюдателей обнаружит, что возраст их вида примерно такой же, как и возраст Вселенной. Вы такого не наблюдаете, и в этом вы особенны. Эту идею можно выразить количественно. Представьте себе двумерную систему координат, где по оси ординат отложен возраст Вселенной, при котором началась наша родословная в качестве разумного вида, а по оси абсцисс – наблюдаемый нами возраст Вселенной. Следовательно, каждая точка на плоскости – это возможная позиция наблюдателя. Но есть и ограничения. Оси x и y положительны (поэтому наш обзор ограничен верхней правой четвертью всей плоскости). Поскольку наблюдения должны происходить уже после того, как началась история разумного вида, истинно утверждение $x > y$.Поэтому зона наблюдений ограничена еще сильнее: речь идет о половине вышеупомянутой четверти или о 1/8 всей плоскости, а именно о восточном и северо-восточном октанте плоскости. Можно представить себе этот регион как 45-градусный лепесток, исходящий от начала координат до бесконечности, поскольку мы предполагаем, что наши разумные потомки просуществуют вечно. Наша точка наблюдения (с доступными нам значениями x и y) может находиться где угодно в пределах этого 45-градусного лепестка. Если ваше наблюдение полностью заурядно, то должна существовать вероятность всего 1/45, что точка, в которой вы находитесь, окажется, например, в пределах 1° от ограничивающей диагональной линии $x = y$.Но на самом деле вы еще ближе к этой диагональной линии. Вы наблюдаете $x = (1 + [1/65\ 000])\ y$.Эта точка (x, y), отложенная от начала координат, находится всего в 0,00044° от верхнего края (линии $x = y$). При условии заурядности наблюдения вероятность оказаться настолько близко к краю составляет $P = 0{,}00044°/45° = 10–5$.Следовательно, если нашим разумным потомкам суждено существовать вечно, а наши наблюдения ничем не примечательны, то будет исключительно маловероятно (примерно 10–5), что возраст нашей разумной линии составит всего 1/65 000 от общего возраста Вселенной или

менее. По принципу Коперника, исключительно маловероятно (P = 10–5), что вы окажетесь в ситуации, когда ваше местоположение окажется особенным в соотношении 1/100 000 (здесь речь идет об эпизоде из родословной разумного вида, которому суждено просуществовать вечно). Следовательно, принцип Коперника, согласующийся со здравым смыслом, сообщает, что крайне маловероятно (P = 10–5), что наши разумные потомки могут просуществовать вечно. В конце концов, формула Коперника (с 95-процентным доверительным интервалом) прогнозирует, когда наступит такой конец. – *Примеч. авт*.

Формула Коперника проверяема. Например, на момент публикации моей статьи на Бродвее шло 44 пьесы и мюзикла. Обычно каждая пьеса оставалась в репертуаре достаточно недолго; так, «Марисоль», которая шла уже 7 дней, была снята из репертуара спустя 10 дней. Это согласуется с моим прогнозом в пределах коэффициента 39.Формула не менее успешно работала и с долгоиграющими пьесами. Знаменитый мюзикл «Фантастикс», который к моменту публикации статьи шел 12 077 дней, закрылся через 3153 дня, опять же в пределах коэффициента 39.В целом из всех закрывшихся пьес и мюзиклов, присутствовавших в моем исходном списке, я угадал 42 и насчет двух ситуация пока не определилась. Даже если я ошибусь с этими двумя, то все равно укладываюсь в доверительный интервал 95 %.

На тот же момент у власти находились 313 государственных лидеров – глав государств и председателей правительств независимых стран. Большинство из них уже сложили полномочия; если никто не останется у власти в возрасте старше 100 лет, то формула сработает на 94 % (что исключительно близко к 95 %). Генри Бинен и Николас ван дер Валле в своей книге *Of Time and Power* (по результатам подробного статистического анализа 2256 мировых лидеров) заключили: «Срок,

долго еще он пробудет у власти. Из всех проанализированных параметров именно этот обладает максимальной прогностической силой». проведенный данным лидером у власти, – очень хороший индикатор того, как

30 сентября 1993 года в статье, вышедшей в журнале *Nature*, П.Т.Ландсберг, Дж. Н. Девинн и К.П.Плиз воспользовались моей формулой, чтобы спрогнозировать, как долго у власти в Британии продержатся консерваторы. С доверительным интервалом 95 % они спрогнозировали, что, учитывая текущий срок их правления, 14 лет, они пробудут у власти еще как минимум 4,3 месяца и не более 546 лет. Консервативное правительство сложило портфели через 3,6 года, в соответствии с прогнозом.

Я воспользовался статистическими таблицами ООН и рассчитал, что если бы в 1993 году каждый землянин попытался спрогнозировать срок собственной жизни по моей формуле, то для 96 % этих людей формула дала бы верный результат.

Философы Брэдли Монтонд и Брайан Кирленд в 2006 году отстаивали мой основной тезис в своей статье, вышедшей в журнале *The Philosophical Monthly*.Они доказывали, что моя формула подходит для расчета продолжительности любого процесса, не имеющего временных ограничений, либо когда временные ограничения невозможно эмпирически определить. Любую вероятностную проблему можно изложить в байесовской формулировке. Байесовский вывод описывает, как пересматривать имеющиеся убеждения по мере поступления новых данных. Моя формула Коперника функционально аналогична так называемому *байесовскому выводу на основании неопределенной априорной информации* (также этот феномен называется *публичной априорной информацией*, поскольку она изначально позиционируется как общедоступная). Затем можно пересмотреть априорные оценки, учтя уже достигнутую долговечность. Такая априорная оценка объективна, любой порядок долговечности с ее помощью взвешивается в равной степени успешно. Если бы у нас не было статистических данных по представителям разумного вида (способным задавать подобные вопросы), то это был бы максимум, который мы могли бы сделать, – и получили бы в таком случае результаты, в точности согласующиеся с моей формулой Коперника. Любому разумному наблюдателю по силам ее применить, и вы в данном отношении совершенно не уникальны в ряду других разумных наблюдателей. – *Примеч. авт*.

48

Диаметр пластин в современных жестких дисках составляет 3,5 или, чаще, 2,5 дюйма. – *Примеч. науч. ред.*