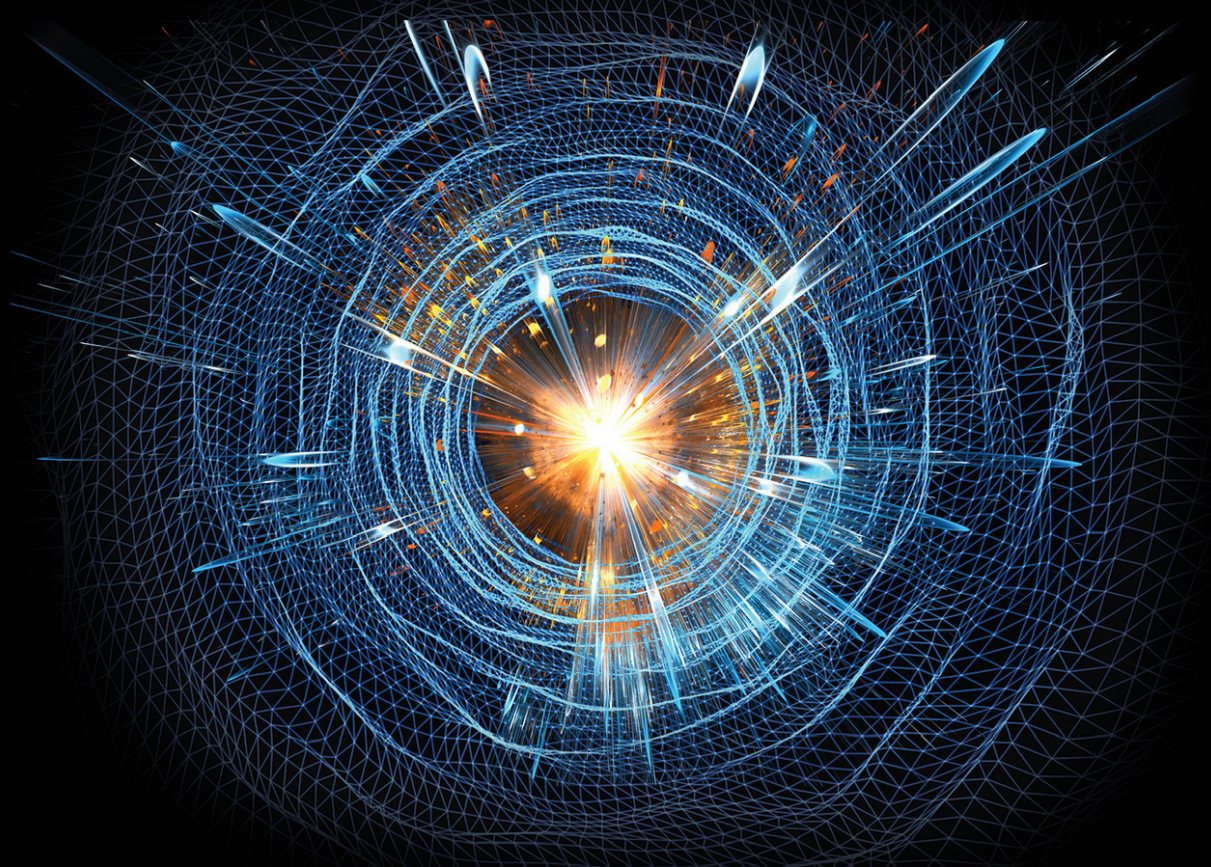


СТИВЕН ХОКИНГ



ВСЕЛЕННАЯ СТИВЕНА ХОКИНГА

ИСТОРИЯ МАКРОКОСМОСА, ИСТОРИЯ ЧЕЛОВЕКА



Мир Стивена Хокинга

Стивен Хокинг

**Вселенная Стивена
Хокинга (сборник)**

«Издательство АСТ»

1980, 1996, 2013

УДК 524.8
ББК 22.68

Хокинг С. У.

Вселенная Стивена Хокинга (сборник) / С. У. Хокинг —
«Издательство АСТ», 1980, 1996, 2013 — (Мир Стивена Хокинга)

ISBN 978-5-17-102285-3

Под этой обложкой собраны работы Стивена Хокинга, которые дают наиболее полное представление о его жизни, работе, взглядах на науку и Вселенную: «Краткая история времени». «Моя краткая история» и отдельные лекции из сборника «Черные дыры и молодые вселенные».

УДК 524.8
ББК 22.68

ISBN 978-5-17-102285-3

© Хокинг С. У., 1980, 1996, 2013
© Издательство АСТ, 1980, 1996, 2013

Содержание

Краткая история времени	6
Предисловие	6
Глава первая. Наша картина Вселенной	8
Глава вторая. Пространство и время	16
Глава третья. Расширяющаяся вселенная	31
Глава четвертая. Принцип неопределенности	43
Глава пятая. Элементарные частицы и силы природы	49
Конец ознакомительного фрагмента.	56

Стивен Хокинг

Вселенная Стивена Хокинга

(сборник)

Stephen Hawking

A BRIEF HISTORY OF TIME: FROM THE BIG BANG TO BLACK HOLES BLACK
HOLES AND BABY UNIVERSES AND OTHER ESSAYS MY BRIEF HISTORY

© Stephen Hawking, 1980, 1996, 2013

© ООО "Издательство АСТ", 2018 (оформление, перевод на русский язык)

* * *

Краткая история времени

Предисловие

Я не писал предисловия к первому изданию «Краткой истории времени». Это сделал Карл Саган. Вместо этого я добавил короткий раздел под названием «Благодарности», где мне посоветовали выразить всем признательность. Правда, некоторые из благотворительных фондов, оказавших мне поддержку, были не очень рады тому, что я их упомянул, – заявок у них стало намного больше.

Я думаю, что никто – ни издательство, ни мой агент, ни даже я сам – не ожидали, что книга будет пользоваться таким успехом. Она продержалась в списке бестселлеров лондонской газеты *Sunday Times* целых 237 недель – это больше, чем любая другая книга (естественно, не считая Библии и произведений Шекспира). Она была переведена примерно на сорок языков и разошлась огромным тиражом – на каждые 750 жителей Земли, мужчин, женщин и детей, приходится примерно один экземпляр. Как заметил Натан Майрволд из фирмы *Microsoft* (это мой бывший аспирант), я продал больше книг по физике, чем Мадонна – книг о сексе.

Успех «Краткой истории времени» означает, что людей весьма интересуют фундаментальные вопросы – о том, откуда мы взялись, и почему Вселенная такова, какой мы ее знаем.

Я воспользовался представившейся мне возможностью дополнить книгу более новыми наблюдательными данными и теоретическими результатами, которые были получены уже после выхода первого издания (1 апреля 1988 года, в День дурака). Я добавил новую главу о кротовых норах и путешествиях во времени. Похоже, общая теория относительности Эйнштейна допускает возможность создания и поддержания кротовых нор – небольших туннелей, связывающих разные области пространства-времени. В этом случае мы могли бы использовать их для быстрого перемещения по Галактике или для путешествий назад во времени. Разумеется, мы пока не встречали ни одного пришельца из будущего (или, может быть, все же встречали?), но я попробую предположить, каким может быть объяснение тому.

Я также расскажу о достигнутом в последнее время прогрессе в поиске «дуальностей», или соответствий между на первый взгляд различными физическими теориями. Эти соответствия являются серьезным свидетельством в пользу существования единой физической теории. Но они также говорят о том, что эту теорию, возможно, нельзя сформулировать непротиворечивым, фундаментальным образом. Вместо этого в разных ситуациях приходится довольствоваться различными «отражениями» основополагающей теории. Точно так же мы не можем отобразить всю земную поверхность в подробностях на одной карте и вынуждены использовать разные карты для разных областей. Это стало бы революцией в наших представлениях о возможности объединения законов природы. Однако она никоим образом не затронула бы самого главного: Вселенная подчиняется набору рациональных законов, которые мы в состоянии открыть и постичь.

Что касается наблюдательного аспекта, то здесь, безусловно, важнейшим достижением стало измерение флуктуаций реликтового излучения в рамках проекта *COBE* (англ. *Cosmic Background Explorer* – «Исследователь космического фонового излучения»)¹ и других. Эти флуктуации, по сути, являются «печатью» творения. Речь об очень малых неоднородностях в ранней Вселенной, в остальном вполне однородной. Впоследствии они превратились в галактики, звезды и прочие структуры, которые мы наблюдаем через телескоп. Формы флуктуаций

¹ Впервые флуктуации, или анизотропия, реликтового микроволнового излучения были обнаружены советским проектом «Реликт». – Прим. науч. ред.

согласуются с предсказаниями модели Вселенной, не имеющей границ в воображаемом временном направлении. Но, чтобы предпочесть предлагаемую модель другим возможным объяснениям флуктуаций реликтового излучения, потребуются новые наблюдения. Через несколько лет станет ясно, можно ли считать нашу Вселенную полностью замкнутой, без начала и конца.

Стивен Хокинг

Глава первая. Наша картина Вселенной

Однажды известный ученый (говорят, это был Бертран Рассел) читал публичную лекцию по астрономии. Он рассказывал, как Земля движется по орбите вокруг Солнца и как Солнце, в свою очередь, движется по орбите вокруг центра огромного скопления звезд, называемого нашей Галактикой. Когда лекция закончилась, маленькая пожилая женщина в дальнем ряду аудитории встала и произнесла: «Всё, что тут говорили, – полная ерунда. Мир – плоская тарелка на спине гигантской черепахи». Ученый снисходительно улыбнулся и спросил: «На чем же стоит та черепаха?» «Вы ведь очень умный молодой человек, очень умный, – ответила дама. – Черепаха стоит на другой черепахе, та – на следующей, и так до бесконечности!»

Большинство сочтет нелепой попытку выдать нашу Вселенную за бесконечно высокую башню из черепашек. Но отчего мы так уверены, что наше представление о мире лучше? Что же нам в самом деле известно о Вселенной и откуда мы всё это знаем? Как возникла Вселенная? Что ждет ее в будущем? Было ли у Вселенной начало, а если было, то что было до него? Какова природа времени? Закончится ли оно когда-нибудь? Можно ли двигаться во времени вспять? Ответы на некоторые из этих давних вопросов дают недавние прорывы в физике, которым мы, в частности, обязаны появлению фантастических новых технологий. Когда-нибудь мы сочтем новые знания такими же очевидными, как то, что Земля обращается вокруг Солнца. А может быть, такими же абсурдными, как представление о башне из черепашек. Только время (чем бы оно ни было) покажет.

Давным-давно, за 340 лет до нашей эры, греческий философ Аристотель написал трактат «О небе». В нем он выдвинул два убедительных доказательства того, что Земля имеет форму шара и совсем не является плоской, как тарелка. Во-первых, он понял, что причина лунных затмений – прохождение Земли между Солнцем и Луной. Отбрасываемая Землей на Луну тень всегда имеет округлую форму, и это возможно, только если Земля также округлая. Если бы Земля имела форму плоского диска, то тень, как правило, имела бы форму эллипса; круглой она была бы только тогда, когда Солнце во время затмения располагалось бы точно под центром диска. Во-вторых, древние греки знали из опыта своих путешествий, что на юге Полярная звезда расположена ближе к горизонту, чем при наблюдении в местностях, расположенных севернее. (Поскольку Полярная звезда расположена над Северным полюсом, то наблюдатель на Северном полюсе видит ее прямо над головой, а наблюдатель в районе экватора – над самым горизонтом.) Более того, Аристотель, исходя из разности видимого положения Полярной звезды при наблюдениях в Египте и Греции, смог оценить длину окружности Земли в 400 000 стадиев. Мы не знаем, чему в точности был равен один стадий, но если предположить, что он составлял около 180 метров, то оценка Аристотеля примерно в два раза больше принятого в настоящее время значения. У греков был еще и третий аргумент в пользу круглой формы Земли: как иначе объяснить, почему при приближении корабля к берегу сначала показываются лишь его паруса, а только потом корпус?

Аристотель считал Землю неподвижной, а также полагал, что Солнце, Луна, планеты и звезды обращаются по круговым орбитам вокруг Земли. Он руководствовался мистическими соображениями: Земля, по Аристотелю, является центром Вселенной, а движение по кругу наиболее совершенно. Во II веке нашей эры Птолемей построил на основе этой идеи всеобъемлющую космологическую модель. В центре Вселенной находилась Земля, окруженная восемью вложенными друг в друга вращающимися сферами, и на этих сферах располагались Луна, Солнце, звезды и известные в то время пять планет – Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн (рис. 1.1). Каждая планета двигалась относительно своей сферы по малому кругу – для того, чтобы описать весьма сложные траектории этих светил на небе. На самой внешней сфере были закреплены звезды, и поэтому взаимные положения звезд оставались неизмен-

ными, конфигурация звезд вращалась на небе как единое целое. Представления о том, что расположено за пределами самой внешней сферы, оставались весьма расплывчатыми, но это заведомо находилось за пределами наблюдаемой для человечества части Вселенной.

Модель Птолемея позволяла довольно точно предсказывать положение светил на небе. Но чтобы добиться согласия предсказаний с наблюдениями, Птолемею пришлось предположить, что расстояние от Луны до Земли в разное время могло отличаться в два раза. А это означало, что видимый размер Луны иногда должен был быть в два раза больше привычного! Птолемей признавал этот недостаток своей системы, что тем не менее не помешало почти единогласному признанию его картины мира. Христианская церковь приняла Птолемею систему, поскольку сочла ее не противоречащей Священному Писанию: за пределами сферы неподвижных звезд оставалось достаточно места для рая и ада.

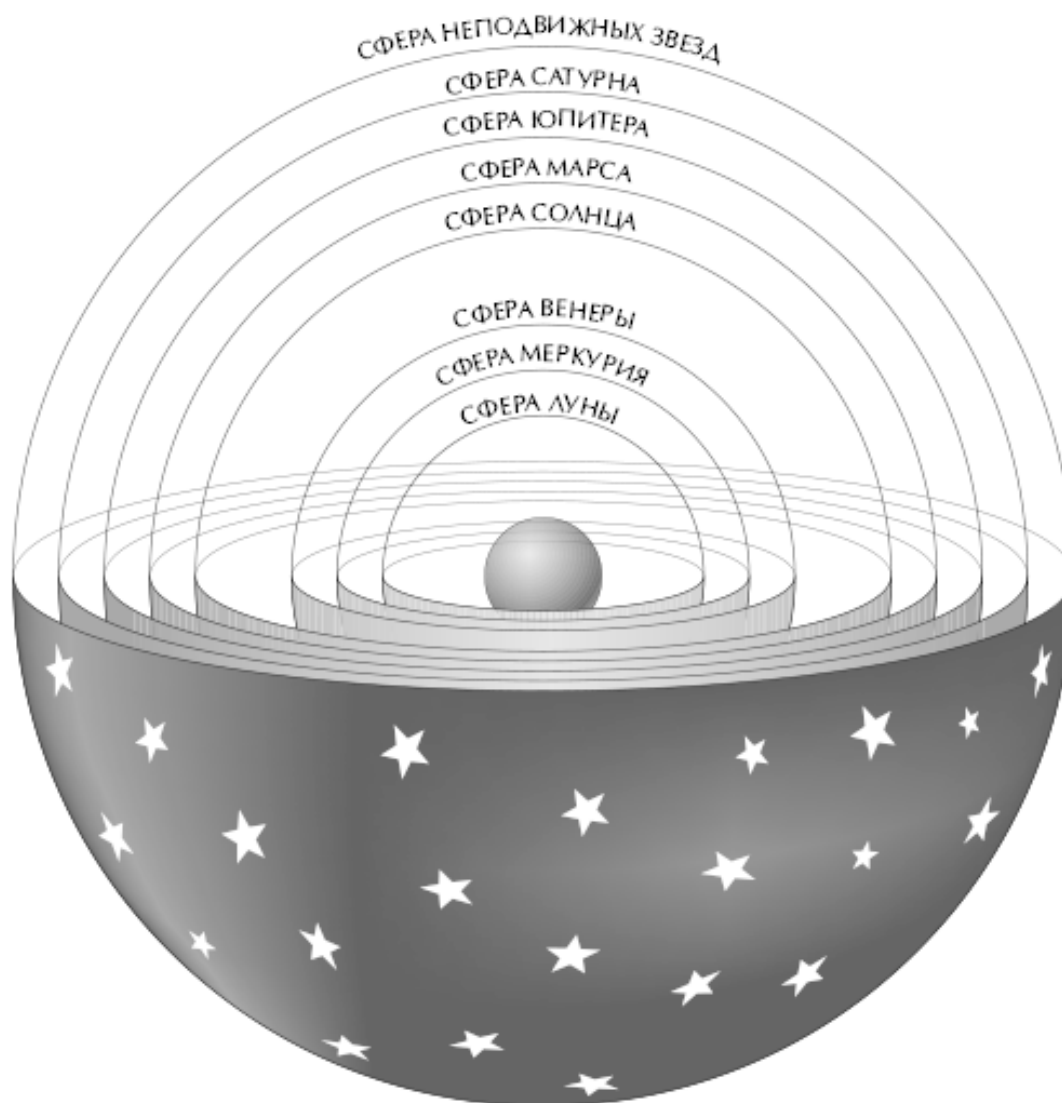


Рис. 1.1

Но в 1514 году польский священник Николай Коперник предложил более простую модель. (Правда, вначале, опасаясь быть обвиненным церковью в ереси, Коперник распространял свои космологические идеи анонимно.) Коперник предположил, что Солнце неподвижно и расположено в центре, а Земля и планеты движутся вокруг него по круговым орбитам. понадобилось почти столетие, чтобы эту идею восприняли всерьез. Одними из первых в пользу

теории Коперника стали публично высказываться двое ученых-астрономов – немец Иоганн Кеплер и итальянец Галилео Галилей, несмотря на то, что предсказываемые этой теорией траектории небесных тел не совпадали в точности с наблюдаемыми. Окончательный удар по системе мира Аристотеля и Птолемея нанес 1609 год – тогда Галилей начал наблюдать ночное небо через только что изобретенный телескоп². Взглянув на планету Юпитер, Галилей обнаружил несколько обращающихся вокруг него небольших спутников. Отсюда следовало, что не все небесные тела обращаются вокруг Земли, как считали Аристотель с Птолемеем. (Можно было, конечно, продолжать считать Землю неподвижной и расположенной в центре Вселенной, полагая, что спутники Юпитера движутся вокруг Земли по исключительно запутанным траекториям так, что это похоже на их обращение вокруг Юпитера. Но все же теория Коперника была намного проще.) Примерно в то же время Кеплер уточнил теорию Коперника, предположив, что планеты движутся не по круговым орбитам, а по эллиптическим (то есть вытянутым), благодаря чему удалось добиться согласия предсказаний теории с наблюдениями.

Правда, Кеплер рассматривал эллипсы лишь как математический трюк, и притом весьма одиозный, потому что эллипсы – менее совершенные фигуры, чем окружности. Кеплер обнаружил, почти случайно, что эллиптические орбиты хорошо описывают наблюдения, но при этом никак не мог согласовать предположение об эллиптических орбитах со своей идеей о магнитных силах как причине движения планет вокруг Солнца. Причину движения планет вокруг Солнца значительно позже, в 1687 году, раскрыл сэр Исаак Ньютон в трактате «Математические начала натуральной философии» – пожалуй, важнейшей из когда-либо опубликованных работ по физике. В этом труде Ньютон не только выдвинул теорию, описывающую движение тел в пространстве и во времени, но и разработал сложный математический аппарат, необходимый для описания этого движения. Кроме того, Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения, согласно которому всякое тело во Вселенной притягивается к любому другому телу с силой, которая тем больше, чем больше массы тел и чем меньше расстояние между взаимодействующими телами. Это та самая сила, которая заставляет предметы падать на землю. (История о том, что на мысль о законе всемирного тяготения Ньютона навело упавшее на его голову яблоко, скорее всего, просто выдумка. Ньютон говорил лишь, что эта идея пришла к нему, когда он находился «в созерцательном настроении» и был «под впечатлением от падения яблока».) Ньютон показал, что согласно сформулированному им закону под действием тяготения Луна должна двигаться по эллиптической орбите вокруг Земли, а Земля и планеты – по эллиптическим орбитам вокруг Солнца.

Модель Коперника исключала необходимость в Птолемеевых сферах, а с ними – и в предположении о наличии у Вселенной некоей естественной внешней границы. Поскольку у «неподвижных» звезд не обнаруживалось никакого движения, кроме общего суточного движения небосвода, вызванного вращением Земли вокруг своей оси, то было естественно предположить, что это такие же тела, как наше Солнце, только расположенные гораздо дальше.

Ньютон понял, что согласно его теории тяготения звезды должны притягивать друг друга и поэтому, по-видимому, не могут оставаться неподвижными. Почему же они не сблизились и не скопились в одном месте? В своем письме другому выдающемуся мыслителю своего времени, Ричарду Бентли, написанном в 1691 году, Ньютон утверждал, что они будут сблизаться и скапливаться только в том случае, если число звезд, сосредоточенных в ограниченной области пространства, конечно. А если число звезд бесконечно и распределены они более или менее равномерно в бесконечном пространстве, то этого не произойдет из-за отсутствия какой бы то ни было явной центральной точки, в которую могли бы «провалиться» звезды.

² Телескоп как зрительную трубу первым изобрел голландский очковый мастер Иоганн Липперсгей в 1608 году, но Галилей первым направил телескоп на небо в 1609 году и использовал его для астрономических наблюдений. – *Прим. перев.*

Это один из примеров ловушек, которые встречаются при рассуждениях о бесконечности. В бесконечной Вселенной любая ее точка может рассматриваться как ее центр, потому что по каждую сторону от нее находится бесконечное число звезд. Правильный подход (к которому пришли гораздо позже) – решение задачи в конечном случае, когда звезды падают друг на друга, и исследование того, как результат меняется при добавлении в конфигурацию звезд, расположенных за пределами рассматриваемой области и распределенных более или менее равномерно. Согласно закону Ньютона, в среднем дополнительные звезды в совокупности не должны оказывать никакого влияния на первоначальные звезды, и поэтому эти звезды исходной конфигурации должны все так же быстро падать друг на друга. Так что сколько звезд ни добавляй, они все равно будут падать друг на друга. Теперь мы знаем, что невозможно получить бесконечную стационарную модель Вселенной, в которой сила гравитации имеет исключительно «притягивающий» характер.

Об интеллектуальной атмосфере до начала XX века многое говорит тот факт, что никому тогда не пришел в голову сценарий, согласно которому Вселенная может сжиматься или расширяться. Общепринятой была концепция Вселенной, либо существовавшей всегда в неизменном виде, либо сотворенной в некоторый момент в прошлом – в том виде, в каком мы ее наблюдаем сейчас. Это могло, в частности, быть следствием того, что люди склонны верить в вечные истины. Стоит вспомнить также, что величайшее утешение дает мысль о том, что, хотя мы все стареем и умираем, Вселенная вечна и неизменна.

Даже ученые, понимавшие, что согласно ньютоновской теории тяготения Вселенная не может быть статичной, не осмеливались предположить, что она может расширяться. Вместо этого они пытались скорректировать теорию так, чтобы гравитационная сила на очень больших расстояниях становилась отталкивающей. Такое предположение не меняло существенно предсказанные движения планет, но позволяло бесконечно большому числу звезд оставаться в состоянии равновесия: силы притяжения со стороны близких звезд уравнивались силами отталкивания более далеких звезд. Сейчас же считается, что такое равновесное состояние должно быть неустойчивым: стоит звездам в какой-либо области чуть больше приблизиться друг к другу, как их взаимное притяжение усилится и превзойдет силы отталкивания, в результате чего звезды продолжат падать друг на друга. С другой стороны, стоит звездам оказаться лишь слегка дальше друг от друга, как силы отталкивания возьмут верх над силами притяжения и звезды разлетятся.

Другое возражение против концепции бесконечной статичной Вселенной обычно связывают с именем немецкого философа Генриха Ольберса, который опубликовал свои рассуждения по этому поводу в 1823 году. В действительности на эту проблему обращали внимание многие современники Ньютона, и статья Ольберса была отнюдь не первой, где приводились веские доводы против такой концепции. Однако она была первой, получившей широкое признание. Дело в том, что в бесконечной статичной Вселенной почти любой луч зрения должен упираться в поверхность какой-нибудь звезды, и поэтому все небо должно светиться так же ярко, как Солнце, причем даже ночью. Контраргумент Ольберса состоял в том, что свет далеких звезд должен ослабляться из-за поглощения веществом, находящимся между нами и этими звездами. Но тогда это вещество разогрелось бы и светилось так же ярко, как и сами звезды. Избежать вывода о том, что яркость всего неба сравнима с яркостью Солнца, можно, только предположив, что звезды не светились вечно, а «зажглись» некоторое определенное время назад. В этом случае поглощающее вещество не успело бы нагреться или свет далеких звезд не успел бы достичь нас. Таким образом, мы приходим к вопросу о причине, по которой зажглись звезды.

Конечно, люди обсуждали происхождение Вселенной задолго до этого. Во многих ранних космологических представлениях, а также в иудейской, христианской и мусульманской картинах мира Вселенная возникла в определенное и не очень далекое время в прошлом. Одним из

аргументов в пользу такого начала было ощущение необходимости некоей «первопричины», которая бы объясняла существование Вселенной. (В пределах самой Вселенной любое происходящее в ней событие объясняется как следствие другого, более раннего события; существование же самой Вселенной можно таким образом объяснить, только предположив, что у нее было некое начало.) Другой аргумент был высказан Аврелием Августином в труде «О граде Божьем». Он отметил, что цивилизация развивается и что мы помним, кто совершил то или иное деяние или изобрел тот или иной механизм. Следовательно, человек, а возможно, и Вселенная не могли существовать очень долгое время. Блаженный Августин считал, в соответствии с Книгой Бытия, что Вселенная была сотворена примерно за 5000 лет до Рождества Христова. (Интересно, что это близко к эпохе окончания последнего Ледникового периода, – около 10 000 лет до нашей эры, – которую археологи считают началом возникновения цивилизации.)

Аристотелю, а также большинству древнегреческих философов, наоборот, не нравилась идея о сотворении мира, потому что она исходила из божественного вмешательства. Они считали, что человеческий род и мир существовали всегда и будут существовать вечно. Мыслители древности осмыслили и вышеупомянутый довод о прогрессе цивилизации и парировали его: они заявили, что человеческий род периодически возвращался к стадии начала цивилизации под действием потоков и других стихийных бедствий.

Вопросы о том, было ли у Вселенной начало во времени и ограничена ли она в пространстве, также поднимал философ Иммануил Кант в своем монументальном (правда, весьма сложном для понимания) труде «Критика чистого разума», опубликованном в 1781 году. Кант называл эти вопросы антиномиями (то есть противоречиями) чистого разума, потому что чувствовал, что есть одинаково убедительные доводы в пользу как тезиса – то есть того, что у Вселенной было начало, – так и антитезиса – то есть того, что Вселенная существовала всегда. В доказательство тезиса Кант приводит такие рассуждения: если бы у Вселенной не было начала, то любому событию должно было предшествовать бесконечное время, что, по мнению философа, абсурдно. В пользу антитезиса выдвигалось то соображение, что если бы у Вселенной было начало, то до него должно было пройти бесконечное время и непонятно, почему же Вселенная возникла в какой бы то ни было конкретный момент времени. В сущности, кантовские обоснования тезиса и антитезиса почти что идентичны. В обоих случаях в основе рассуждений лежит неявное предположение философа о том, что время бесконечно продолжается в прошлое независимо от того, существовала ли Вселенная всегда. Как мы увидим, понятие времени не имеет смысла до рождения Вселенной. Первым это отметил Блаженный Августин. Его спросили: «Что делал Бог до того, как создал мир?», и Августин не стал утверждать, что Бог готовил ад для тех, кто задает такие вопросы. Вместо этого он постулировал, что время – это свойство сотворенного Богом мира и что до начала Вселенной времени не существовало.

Когда большинство людей считали Вселенную в целом статичной и неизменной, вопрос о наличии у нее начала относился скорее к сфере метафизики или теологии. Наблюдаемую картину мира можно было с одинаковым успехом объяснить как в рамках теории о том, что Вселенная существовала всегда, так и на основе предположения, что она была приведена в движение в какое-то конкретное время, но таким образом, что сохраняется видимость, будто она существует вечно. Но в 1929 году Эдвин Хаббл сделал фундаментальное открытие: он обратил внимание на то, что далекие галактики, где бы они ни находились на небе, всегда удаляются от нас с большими скоростями, [пропорциональными расстоянию до них]³. Другими словами, Вселенная расширяется. Это значит, что в прошлом объекты во Вселенной были ближе друг к другу, чем сейчас. И похоже, что в некий момент времени – где-то 10–20 миллиардов лет назад – все, что есть во Вселенной, находилось в точности в одном месте, и следова-

³ Здесь и далее в квадратных скобках помещаются замечания переводчика, уточняющие авторский текст. – *Прим. изд.*

тельно, плотность Вселенной была бесконечной. Это открытие вывело вопрос о начале Вселенной в сферу науки.

Из хаббловских наблюдений следовало, что в некий момент времени в прошлом – так называемый момент Большого взрыва – Вселенная была бесконечно малой и бесконечно плотной. В таких условиях перестают действовать все научные законы и, следовательно, становится невозможно предсказывать какие-либо будущие события. Никакие происшествия, имевшие место до этого момента, не могли бы повлиять на то, что творится в настоящее время. Существованием таких событий можно пренебречь, потому что они не могут иметь никаких наблюдаемых последствий. Можно сказать, что время началось в момент Большого взрыва, поскольку предшествовавшие моменты времени в принципе нельзя помыслить и зафиксировать. Такое начало времени существенно отличается от того, что рассматривалось раньше. В неменяющейся Вселенной начало во времени – это нечто, спровоцированное неким существом, находящимся вне Вселенной, то есть нет никакой физической необходимости в ее зарождении. Можно представить, что Бог сотворил Вселенную практически в любой момент в прошлом. С другой стороны, если Вселенная расширяется, то для ее начала вполне могут существовать физические основания. Можно все так же считать, что Бог сотворил Вселенную в момент Большого взрыва или позднее – чтобы это выглядело так, будто произошел Большой взрыв, – но предполагать, что Вселенная была создана до Большого взрыва, бессмысленно. Расширяющаяся Вселенная не исключает присутствия творца, но накладывает определенные ограничения на то, когда он мог сделать свое дело.

Прежде чем говорить о природе Вселенной и обсуждать, было ли у нее начало и есть ли у нее конец, следует четко представлять себе, что такое научные теории. Я буду придерживаться упрощенного представления о том, что теория есть просто модель Вселенной или какой-либо ее части и набор правил, связывающих параметры этой модели с нашими наблюдениями. Она существует только в нашем сознании и никак не существует в реальности (что бы это ни значило). Теория считается хорошей, если она удовлетворяет двум требованиям. Во-первых, она должна правильно описывать большой класс наблюдений на основе модели с небольшим числом произвольных элементов. Во-вторых, она должна позволять с достаточной определенностью предсказывать результаты будущих наблюдений. Например, Аристотель верил в теорию Эмпедокла, согласно которой всё в мире состоит из четырех стихий: земли, воздуха, огня и воды. Это была довольно простая теория, но она не позволяла делать какие-либо точные предсказания. С другой стороны, теория тяготения Ньютона основана на еще более простой модели, в которой тела притягиваются друг другу с силой, пропорциональной величине, называемой массой, и обратно пропорциональной квадрату расстояния между телами. И при этом теория Ньютона позволяет с очень высокой точностью предсказывать движение Солнца, Луны и планет.

Любая физическая теория по природе своей – временная в том смысле, что это всего лишь гипотеза, которую невозможно доказать. Сколько бы экспериментов ни подтверждало эту теорию, никогда нельзя быть уверенным, что следующий результат не будет ей противоречить. С другой стороны, для опровержения теории достаточно единственного наблюдения, результаты которого противоречат ее предсказаниям. Как отметил философ науки Карл Поппер, хорошая теория – та, что позволяет делать множество предсказаний, которые в принципе могут быть опровергнуты или, как это называет Поппер, фальсифицированы наблюдением. С каждым новым экспериментом, результаты которого согласуются с предсказаниями теории, степень нашего доверия к ней повышается, а сама теория укрепляется. Однако первое же противоречащее теории наблюдение является основанием отвергнуть или существенно изменить ее.

Во всяком случае, так должно быть в идеале, хотя, конечно, всегда можно поставить под сомнение квалификацию наблюдателя или экспериментатора.

На практике новая теория часто представляет собой расширение предыдущей. Например, очень точные наблюдения планеты Меркурий выявили небольшие расхождения между наблюдаемым движением и предсказаниями ньютоновской теории тяготения. Движение планеты, рассчитанное согласно эйнштейновской общей теории относительности, слегка отличалось от того, что предсказывала ньютоновская теория. Согласие предсказанного теорией Эйнштейна движения Меркурия с наблюдениями и отсутствие такого согласия с ньютоновской теорией стали двумя ключевыми подтверждениями новой концепции. Тем не менее мы до сих пор пользуемся ньютоновской теорией для большинства практических задач, потому что в ситуациях, с которыми нам обычно приходится сталкиваться, ее предсказания отличаются от предсказаний общей теории относительности очень незначительно. (К тому же ньютоновская теория куда проще теории Эйнштейна!)

Конечная цель науки состоит в создании единой теории для описания всей Вселенной. Но в реальности подход большинства ученых состоит в разделении проблемы на две части. Во-первых, есть законы, управляющие тем, как Вселенная меняется со временем. (Если мы знаем состояние Вселенной в определенный момент времени, то такие физические законы позволяют нам определить, как она будет выглядеть в любой другой момент.) Второй вопрос – это начальное состояние Вселенной. Некоторые считают, что наука должна заниматься только первой проблемой, а вопрос о начальном состоянии скорее относится к компетенции метафизики или религии. Они считают, что Бог, будучи всемогущим, мог создать Вселенную любым желаемым образом. Может быть, это и так, но тогда Бог мог также заставить Вселенную развиваться совершенно произвольным образом. Однако похоже, что Богу было угодно, чтобы Вселенная развивалась в соответствии с четко определенными законами. И поэтому представляется вполне разумным предположить, что начальное состояние Вселенной тоже подчинялось четко определенным законам.

Создать теорию, описывающую сразу всю Вселенную, оказалось очень трудным делом. Вместо этого ученые разделили проблему на множество частей и построили множество частных теорий. Каждая из них описывает и предсказывает ограниченный класс наблюдений, пренебрегая влиянием других факторов или представляя их в виде простых наборов чисел. Вполне возможно, что этот подход в корне неверен. Если во Вселенной все фундаментальным образом взаимозависимо, то получить полное решение, исследуя проблему фрагментарно в отрыве от целого, было бы невозможно. Тем не менее до сих пор именно этот подход обеспечивал прогресс науки. Классическим примером снова может служить теория тяготения Ньютона, согласно которой сила взаимного притяжения тел зависит только от присущей каждому из них числовой характеристики – его массы – и совершенно не зависит от того, из чего состоят эти тела. Таким образом, орбиты Солнца и планет можно рассчитывать, не вдаваясь в подробности об их составе и внутреннем строении⁴.

Сейчас для описания Вселенной используют две основные частные теории – общую теорию относительности и квантовую механику. Это два великих интеллектуальных достижения первой половины XX века. Общая теория относительности описывает силу тяготения и крупномасштабную структуру Вселенной, то есть ее строение на масштабах от нескольких километров до миллиона миллионов миллионов миллионов (единица с двадцатью четырьмя нулями) километров – размера наблюдаемой Вселенной. Квантовая механика же, напротив, имеет дело с явлениями на чрезвычайно малых масштабах, такими как миллионная часть миллионной

⁴ Это не совсем так. Внутренним строением гравитирующих тел можно пренебречь, только если распределение плотности в них сферически симметрично (то есть зависит только от расстояния до центра тела). В случае планет и Солнца все обстоит, строго говоря, иначе – эти тела как минимум слегка сплюснуты у полюсов. Например, сплюснутость Солнца – одна из причин прецессии перигелия Меркурия. У планет земной группы бывают и другие неоднородности распределения плотности. Исследования гравитационного поля Земли и других небесных тел составляют предмет отдельной области науки – гравиметрии. – *Прим. перев.*

доли сантиметра. Как известно, эти две теории – к величайшему сожалению – несовместимы друг с другом, и поэтому по крайней мере одна из них не может быть правильной. Одним из главных направлений исследований в физике сегодня и главной темой этой книги является разработка новой теории, которая бы объединила в себе оба частных случая, – квантовой теории гравитации. Такой теории пока еще нет, и, быть может, мы еще далеки от ее создания, но нам уже известны многие из свойств, которыми она должна обладать. И, как будет видно в последующих главах, нам уже известно довольно много ее неизбежных предсказаний.

Так что, если исходить из того, что Вселенная устроена не произвольным образом, а подчиняется определенным законам, необходимо в конце концов объединить частные теории в одну всеобъемлющую, которая сможет описать все во Вселенной. Но поиск такой полной единой теории связан с фундаментальным парадоксом. Описанное выше представление о научных теориях предполагает, что мы являемся разумными существами, которые вольны наблюдать Вселенную так, как нам заблагорассудится, и делать логические выводы из увиденного. В таком случае у нас есть основания полагать, что рано или поздно мы сможем осознать законы, которым подчиняется наша Вселенная. Но если бы полная объединенная теория действительно существовала, она, очевидно, также определяла бы и наши действия. И тогда она определяла бы исход нашего поиска! Так почему же из нее должно следовать, что мы на основании полученных данных придем к правильным выводам? Может ли это означать, что мы с равной степенью вероятности придем к ошибочным выводам? Или вовсе не сможем ничего заключить?

Единственный способ решить эту проблему я вижу в дарвиновском принципе естественного отбора. Идея заключается в том, что особи в любой популяции самовоспроизводящихся организмов будут неизбежно различаться по генетическому материалу и воспитанию. А это значит, что некоторые особи будут чаще, чем другие, делать правильные выводы об окружающем их мире и действовать соответствующим образом. С высокой степенью вероятности именно они будут выживать и воспроизводиться, поэтому их манера поведения и образ мыслей станут преобладающими. Конечно, в прошлом интеллект и научные достижения не раз становились главным фактором выживания. Не совсем ясно, так ли это до сих пор, ведь наши недавние открытия вполне способны стереть нас с лица Земли. Но даже если этого не произойдет, единая теория может и не добавить нам шансов в борьбе за выживание. Однако если Вселенная эволюционирует согласно неким законам, то стоит ожидать, что полученные нами в ходе естественного отбора умственные способности поспособствуют поискам всеобъемлющей единой теории и не выведут нас на ложный путь.

Поскольку уже имеющихся частных теорий достаточно для точных предсказаний во всех ситуациях, кроме самых экстремальных, поиск всеобщей теории Вселенной трудно оправдать чисто практическими соображениями. (Заметим однако, что аналогичные доводы можно было привести и в отношении теории относительности, и квантовой механики, а ведь благодаря этим теориям мы овладели ядерной энергией и совершили революцию в микроэлектронике.) Так что от построения полной единой теории особого проку для нашего выживания как вида может и не быть, да и на нашем образе жизни это может никак не сказаться. Но ведь уже на заре цивилизации люди не желали довольствоваться картиной мира, в котором события и явления не связаны между собой и необъяснимы. Они стремились к пониманию лежащего в основе мироздания порядка. И сегодня нам хочется понять, почему мы здесь и откуда мы родом. Исконное стремление человечества к знаниям – достаточное основание для продолжения поисков, и наша цель – полное описание Вселенной, в которой мы живем, не больше и не меньше.

Глава вторая. Пространство и время

Современные представления о движении тел восходят к учениям Галилея и Ньютона. До того люди верили Аристотелю. Он постулировал, что естественное состояние тела – состояние покоя и что тело движется, только если его принуждает к тому сила или импульс. Из этого следовало, что более тяжелое тело должно падать быстрее, чем легкое, поскольку оно испытывает более сильное притяжение, которое влечет его к Земле.

Кроме того, в аристотелевской традиции считалось, что все управляющие Вселенной законы можно вывести чисто умозрительным путем, не обращаясь к наблюдениям. Так, в частности, никто до Галилея не считал нужным проверить, действительно ли тела разного веса падают с разной скоростью. Считают, что Галилей доказал ложность системы Аристотеля, бросая разнообразные предметы с падающей Пизанской башни в Италии. В действительности же все было, скорее всего, не так... Но Галилей проделал другой, эквивалентный эксперимент: он пускал шары разного веса по ровной наклонной поверхности. Эта ситуация аналогична той, когда тяжелые тела падают вертикально, но движение по наклонной поверхности проще наблюдать из-за меньших скоростей. Измерения Галилея показали, что скорость любого тела увеличивается с постоянным темпом независимо от веса. Например, если вы отпустите мяч на наклонной плоскости с уклоном в один метр на каждые десять метров, то через одну секунду мяч будет двигаться вниз по склону со скоростью около одного метра в секунду, через две секунды – со скоростью два метра в секунду и т. д., вне зависимости от веса мяча. Конечно, свинцовый груз падает быстрее, чем перо, но лишь потому, что сопротивление воздуха тормозит перо. Если вы сбросите два тела, которые не испытывают большого сопротивления воздуха, например два разных свинцовых груза, то они будут падать с одинаковой скоростью. На Луне, где воздух не мешает предметам перемещаться, астронавт Дэвид Р. Скотт выполнил эксперимент с пером и свинцовым грузом и обнаружил, что они достигли поверхности одновременно.

Ньютон использовал измерения Галилея в качестве основы для своих законов движения. В опытах Галилея, когда тело скатывалось вниз по наклонной плоскости, на него всегда воздействовала одна и та же сила (его вес), результатом чего было постоянное ускорение тела. Отсюда следовало, что в реальности воздействие силы на тело всегда приводит к изменению скорости его движения, а не только к его перемещению, как считалось ранее. Это также означало, что всякий раз, когда на тело не воздействует какая-либо сила, оно продолжает двигаться по прямой с постоянной скоростью. Эта идея была впервые ясно сформулирована в 1687 году в «Математических началах» Ньютона. Она стала известна как первый закон Ньютона. То, что происходит с телом, когда на него действует сила, определяется вторым законом Ньютона: тело ускоряется (то есть его скорость изменяется) со скоростью, пропорциональной приложенной силе. (Например, в два раза большая сила приводит к аналогичному росту ускорения.) Ускорение тем меньше, чем больше масса (или количество материи) тела. (Одно и то же усилие, действующее на тело, масса которого в два раза больше, произведет в два раза меньшее ускорение.) Привычный пример – это автомобиль: чем мощнее двигатель, тем больше ускорение, но чем тяжелее автомобиль, тем меньше ускорение при том же двигателе. Ньютон дополнил сформулированные им законы движения открытым им же законом всемирного тяготения, который гласит, что любое тело притягивается к любому другому телу с силой, пропорциональной массе каждого из тел. Таким образом, сила взаимного притяжения двух тел удвоится, если удвоить массу одного из тел (например тела А). Это вполне ожидаемо, потому что тело А можно представить состоящим из двух тел исходной массы. Каждое из этих тел должно притягивать тело В с первоначальной силой, и, таким образом, общая сила притяжения тел А и В будет в два раза больше первоначальной силы. И если масса одного из тел в два, а масса второго тела – в три раза больше соответствующей первоначальной массы, то сила взаимного притяжения окажется

в шесть раз больше первоначальной. Теперь понятно, почему все тела падают с одинаковой скоростью: тело, весящее в два раза больше, испытывает в два раза большую силу тяготения. Но его масса в два раза больше, и следовательно, согласно второму закону Ньютона, эти два эффекта полностью компенсируют друг друга, и поэтому ускорение будет одинаковым во всех случаях.

Закон тяготения Ньютона также гласит, что, чем дальше друг от друга тела, тем меньше сила их взаимного притяжения. Согласно этому закону сила тяготения звезды составляет в точности одну четверть силы тяготения такой же звезды на расстоянии вдвое меньше. Этот закон очень точно предсказывает орбиты Земли, Луны и планет. Если бы сила притяжения звезды уменьшалась с расстоянием медленнее или быстрее, то орбиты планет не были бы эллиптическими. Планеты бы двигались по спирали, приближаясь к Солнцу или удаляясь от него.

Существенное отличие идей Аристотеля с одной стороны и Галилея и Ньютона – с другой состоит в том, что Аристотель считал предпочтительным состояние покоя. Именно в нем должно находиться любое тело, не возмущаемое какой-либо силой или импульсом. В частности, Аристотель считал, что Земля находится в состоянии покоя. Но из законов Ньютона следует, что единого стандарта покоя не существует. Можно с одинаковым основанием сказать, что тело *A* находится в состоянии покоя, а тело *B* движется с постоянной скоростью относительно тела *A*, или же что тело *B* находится в состоянии покоя, а движется тело *A*. Например, если на время пренебречь вращением Земли и ее движением по орбите вокруг Солнца, то можно считать, что Земля находится в состоянии покоя, а поезд на ее поверхности движется на север со скоростью сто пятьдесят километров в час. Но можно также считать поезд находящимся в состоянии покоя, а Землю движущейся на юг со скоростью сто пятьдесят километров в час. При проведении опытов с движущимися телами в поезде все законы Ньютона тоже выполняются. Если сыграть в настольный теннис в поезде, то окажется, что мячик ведет себя точно так же, как при игре в пинг-понг на столе, стоящем на земле рядом с путями. Поэтому нельзя с полной уверенностью утверждать, что движется: Земля или поезд.

Отсутствие абсолютного стандарта покоя означало, что невозможно определить, случились ли произошедшие в разное время два события в одном и том же месте в пространстве. Например, предположим, что наш шарик для пинг-понга в поезде отскакивает вверх и падает вниз, ударяясь о стол дважды в одном и том же месте с интервалом в одну секунду. Наблюдателю, который находится у железнодорожной колеи, будет казаться, что расстояние между двумя отскоками составляет около 40 метров, потому что именно это расстояние поезд пройдет за означенное время. Следовательно, отсутствие абсолютной системы отсчета означает – вопреки представлениям Аристотеля – невозможность соотнести событие с абсолютным положением в пространстве. Пространственные координаты событий и расстояние между ними будут разными для человека, едущего в поезде, и наблюдателя, стоящего рядом с железнодорожными путями, и при этом нет никаких оснований предпочесть наблюдения одного наблюдателя другому.

Ньютона очень беспокоило отсутствие абсолютного положения или, как он формулировал, абсолютного пространства, поскольку это противоречило его идее об абсолютном Боге. Ученый отказывался признавать отсутствие абсолютного пространства, несмотря на то, что оно вытекало из сформулированных им законов. Многие ожесточенно критиковали его за иррациональную веру, и, пожалуй, самым суровым его критиком был епископ Беркли – философ, считавший все материальные объекты, а также пространство и время всего лишь иллюзией. Когда знаменитому доктору Джонсону рассказали о взглядах Беркли, он закричал: «Я отвергаю это!» – и ударил ногой большой камень.

Аристотель и Ньютон верили в существование абсолютного времени. То есть они считали, что можно однозначно измерить промежуток времени между двумя событиями. То есть это значение будет безусловным и не будет зависеть от того, кто его измеряет. Конечно, при

условии, что наблюдатель использует хорошие часы. В их представлении время было полностью отделено от пространства и независимо от него. Большинство людей считают это само собой разумеющимся, хотя нам пришлось пересмотреть взгляды на пространство и время. Привычные представления о них прекрасно работают, если речь идет о сравнительно медленных объектах, например яблоках и планетах. В то же время они оказываются совершенно неприменимыми к объектам, которые движутся со скоростью, близкой к скорости света или равной ей.

Датский астроном Оле Кристиенсен Рёмер в 1676 году впервые установил, что свет распространяется с конечной, хотя и очень большой скоростью. Он обнаружил, что спутники Юпитера исчезают из поля зрения за диском планеты через разные интервалы времени, а не идентичные, как этого следовало ожидать, если бы они двигались равномерно. Расстояние между Юпитером и Землей меняется по мере движения этих планет вокруг Солнца. Рёмер обнаружил, что затмения спутников Юпитером наблюдаются тем позже, чем дальше Юпитер находится от Земли, и сделал вывод, что причина в том, что свету от спутников приходится преодолевать большее расстояние, чтобы достичь нас. Правда, рассчитанные им изменения расстояния от Земли до Юпитера были не очень точными, а потому он оценил скорость света примерно в 220 000 километров в секунду – против современного значения в 300 000 километров в секунду. И тем не менее результат Рёмера, которому удалось не только доказать конечность скорости света, но и измерить ее, был замечательным достижением, особенно учитывая, что оно явилось за 11 лет до выхода в свет «Математических начал» Ньютона.

Полноценная теория распространения света была создана только в 1865 году, когда британский физик Джеймс Клерк Максвелл смог объединить частные теории электрических и магнитных сил. Из уравнений Максвелла следовала возможность существования волнообразных возмущений электромагнитного поля, а также то, что эти возмущения должны распространяться с постоянной скоростью подобно волнам на поверхности пруда. Волны с длиной (то есть расстоянием между двумя последовательными гребнями) более одного метра сейчас называют радиоволнами. Сегодня мы знаем, что более короткие волны называют СВЧ-волнами (несколько сантиметров) или инфракрасным излучением (если длина волны составляет более одной десятитысячной сантиметра). Длина волн видимого света составляет от сорока до восьмидесяти миллионных сантиметра. Излучение с еще меньшими длинами волн известно как ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение.

Из теории Максвелла следовало, что радиоволны и волны видимого света должны распространяться с определенной фиксированной скоростью. Но теория Ньютона рассталась с представлением об абсолютном покое, и поэтому, если свет распространяется с фиксированной скоростью, надо указать, относительно чего следует измерять эту скорость. Поэтому выдвинули предположение о существовании некоей субстанции, названной эфиром, которая пронизывает все вокруг и даже вакуум «пустого» пространства. Считалось, что волны света распространяются в эфире подобно тому, как звуковые волны распространяются в воздухе, и следовательно, скорость волн света надо измерять относительно эфира. При этом, с точки зрения разных наблюдателей, движущихся относительно эфира, воспринимаемый ими свет распространяется с разной скоростью, но скорость распространения света относительно эфира всегда постоянна. В частности, по мере движения Земли вокруг Солнца через эфир скорость света, измеренная в направлении движения Земли сквозь эфир (то есть когда мы движемся в направлении источника света), должна быть выше, чем скорость света в направлении, перпендикулярном движению (то есть когда мы не движемся к источнику).

В 1887 году Альберт Майкельсон, впоследствии первый американский лауреат Нобелевской премии по физике совместно с Эдвардом Морли выполнили в Кейсовской школе прикладных наук (ныне Университет Кейс Вестерн Резерв) в Кливленде очень тонкий экспери-

мент. Они сравнили скорость света в направлении движения Земли и в перпендикулярном направлении. К их великому удивлению, скорости в обоих направлениях в точности совпали!

С 1887-го по 1905 год было предпринято несколько попыток объяснить результат эксперимента Майкельсона и Морли. Наиболее известной из них была попытка голландского физика Хендрика Лоренца, который предположил, что при движении сквозь эфир объекты сокращаются в направлении движения, а ход часов замедляется. Но в своей знаменитой статье, опубликованной в 1905 году, никому тогда не известный клерк швейцарского патентного бюро Альберт Эйнштейн заметил, что необходимость в самой идее эфира отпадает, если отказаться от представления об абсолютном времени. Выдающийся французский математик Анри Пуанкаре высказал похожую идею спустя несколько недель после Эйнштейна. Аргументы Эйнштейна оказались более физическими, чем соображения Пуанкаре, который рассматривал проблему с чисто математической точки зрения. Слава за открытие новой теории досталась Эйнштейну, но не забыт и важный вклад Пуанкаре в ее создание.

Фундаментальным постулатом эйнштейновской теории относительности было утверждение, что законы науки должны быть одинаковыми для любого свободно движущегося наблюдателя независимо от его скорости. Это было справедливо и для законов движения Ньютона, но Эйнштейн распространил эту идею на теорию Максвелла и скорость света: все наблюдатели должны измерять одно и то же значение скорости света независимо от того, как быстро они движутся. Эта простая идея имела ряд замечательных следствий. Пожалуй, наиболее известными из них оказались а) эквивалентность массы и энергии, заключенная в знаменитом уравнении $E = mc^2$ (где E – это энергия, m – масса, а c – скорость света), и б) закон, согласно которому ничто не может двигаться быстрее света. Эквивалентность массы и энергии означает, что связанная с движением объекта энергия увеличивает его массу. Другими словами, чем быстрее движется объект, тем труднее дается дальнейшее увеличение его скорости. В реальности этот эффект существен только для объектов, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Например, масса объекта, движущегося со скоростью в 10 % скорости света, больше обычной всего лишь на 0,5 %, в то время как при скорости в 90 % скорости света масса объекта оказывается более чем в два раза больше его нормальной массы. По мере приближения скорости объекта к скорости света масса объекта возрастает все быстрее, и поэтому для дополнительного ускорения требуется все больше энергии. Согласно теории относительности объект никогда не сможет достичь скорости света, потому что с приближением к ней его масса будет стремиться к бесконечности, и следовательно, согласно принципу эквивалентности массы и энергии для разгона до скорости света потребуется бесконечная энергия. Именно по этой причине любой рядовой объект обречен вечно двигаться медленнее, чем свет. Только свет или другие волны, не имеющие собственной массы, могут двигаться столь стремительно.

Не менее замечателен вклад теории относительности в характер наших представлений о пространстве и времени: она произвела настоящую революцию. По Ньютону, если послать импульс света из одного места в другое, то время, за которое этот импульс достигнет цели, будет одним и тем же с точки зрения разных наблюдателей, потому что оно абсолютно, а вот пройденное светом расстояние, согласно измерениям разных наблюдателей, будет различаться (потому что пространство не является абсолютным). Поскольку скорость света равна пройденному светом расстоянию, деленному на затраченное время, то значения скорости света, измеренные разными наблюдателями, будут различаться. С другой стороны, в теории относительности все наблюдатели должны получить одинаковое значение скорости света. При этом пройденное светом расстояние будет разным для разных наблюдателей, и следовательно, измерения разных наблюдателей должны дать разные значения затраченного светом времени. Затраченное светом время равно пройденному светом расстоянию (которое оказывается разным для разных наблюдателей), деленному на скорость света (которая одинакова для всех наблюдателей). Другими словами, теория относительности положила конец идее абсолютного

времени! Она постулировала, что мера времени у каждого наблюдателя, задаваемая его часами, своя, и даже если разные наблюдатели используют совершенно одинаковые часы, они необязательно получают одинаковые значения для измеряемого интервала времени.

Каждый наблюдатель может использовать радар для определения места и времени того или иного события. Для этого наблюдатель отправляет радиоимпульс или импульс света и измеряет время приема частично отраженного импульса. Временем события считается середина интервала между отправлением исходного импульса и приемом отраженного импульса; расстояние до события определяется как половина времени, затраченного на ожидание приема отраженного импульса, умноженная на скорость света. (Под событием подразумевается нечто, произошедшее в некой точке пространства в некоторый момент времени.) Суть этого описания иллюстрирует рисунок 2.1, это пример пространственно-временной диаграммы. Прибегнув к помощи радара, движущиеся относительно друг друга наблюдатели приписывают одному и тому же событию разные время и положения. Измерения ни одного из наблюдателей нельзя считать более правильными, чем измерения какого бы то ни было другого наблюдателя, но все измерения взаимосвязаны. Любой наблюдатель может точно вычислить время и положение, которые припишет данному событию любой другой наблюдатель, при условии, что ему известна относительная скорость этого наблюдателя.

В настоящее время этот метод используется для точного измерения расстояний, потому что время мы умеем измерять точнее, чем длину. Действительно, ведь метр определяется как расстояние, которое свет проходит за 0,000000003335640952 секунды по цезиевым часам. (Это число выбрано, чтобы обеспечить соответствие историческому определению метра как расстояния между двумя метками на платиновом эталоне, который хранится в Париже.) С таким же успехом можно использовать и более удобную единицу длины под названием «световая секунда». Она определяется просто как расстояние, которое свет проходит за одну секунду. В теории относительности расстояния определяются через время и скорость света, и отсюда непосредственно следует, что каждый наблюдатель будет измерять одну и ту же скорость света (эта скорость по определению равна 1 метру в 0,000000003335640952 секунды). При этом нет необходимости вводить понятие эфира, присутствие которого, как показал опыт Майкельсона и Морли, все равно невозможно обнаружить. Но теория относительности требует от нас радикального пересмотра наших представлений о пространстве и времени. Приходится признать, что время не является полностью отделенным и независимым от пространства: они образуют единый объект под названием пространство-время.

Наш повседневный опыт говорит нам, что положение точки в пространстве можно описать тремя числами, или координатами. Например, мы можем сказать о точке в комнате, что она расположена в семи метрах от одной стены, трех метрах от другой стены и на высоте пяти метров над полом. Или, например, можно сказать, что некая точка расположена на определенной широте и долготе и на определенной высоте над уровнем моря. Мы можем использовать любые три подходящих координаты, хотя, конечно, в каждом конкретном случае их практическая применимость ограничена. Например, не очень-то удобно определять положение Луны, указав расстояние в километрах к северу и к западу от площади Пикадилли, а высоту – в метрах над уровнем моря. Положение Луны лучше описывать через ее расстояния от Солнца и от плоскости орбит планет, угол между линией, соединяющей Луну и Солнце, и линией, соединяющей Солнце с близкой к нему звездой, например Альфой Центавра. Но такие координаты не очень годятся для описания положения Солнца в нашей Галактике или положения нашей Галактики в местной группе галактик. В сущности, всю Вселенную можно описать как набор перекрывающихся друг друга областей, в каждой из которых для определения положения заданной точки можно использовать свою систему из трех координат.

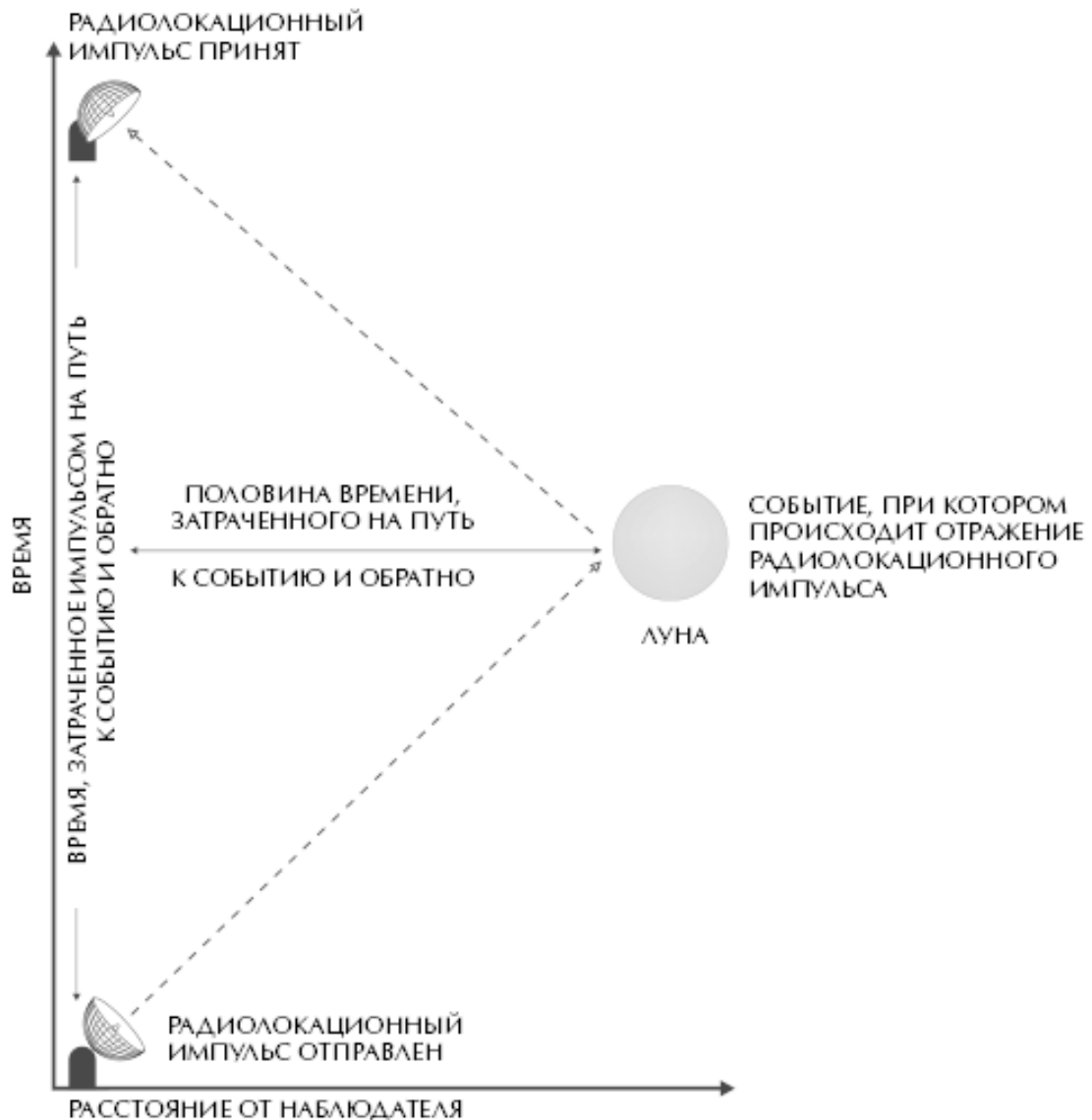


Рис. 2.1. По оси ординат отложено время, а по оси абсцисс – расстояние от наблюдателя. Вертикальная линия слева отображает путь наблюдателя в пространстве и времени, а диагональные линии – пути лучей света от события

Событие – это нечто, что происходит в определенной точке пространства в определенное время. То есть событие может быть описано *четырьмя* числами, или координатами. И в данном случае выбор координат также произволен: можно использовать любой набор из трех надежных пространственных координат и любой меры времени. Но теория относительности рассматривает пространственные и временные координаты как равноправные – как и любые две пространственные координаты. Можно, например, выбрать новый набор координат, в котором, скажем, первая пространственная координата представляет собой некую комбинацию первой и второй пространственных координат исходного набора. Так, вместо определения положения точки на Земле в километрах к северу и километрах к западу от площади Пикадилли можно взять километры к северо-востоку и северо-западу от той же площади. Точно так же мы можем перейти к использованию новой временной координаты, равной исходному времени (в секундах) плюс расстояние (в световых секундах) к северу от площади Пикадилли.

Четыре координаты события удобно представить себе как координаты точки в четырехмерном пространстве под названием «пространство-время». Четырехмерное простран-

ство вообразить невозможно... я с большим трудом представляю себе даже трехмерное! При этом графически изображать двумерные пространства, такие как поверхность Земли, совсем нетрудно. (Поверхность Земли двумерна, потому что положение любой точки на ней можно задать с помощью двух координат – широты и долготы.) На моих графиках, как правило, время увеличивается кверху, а одно из пространственных измерений откладывается по горизонтальной оси. Остальными двумя пространственными измерениями пренебрегаем или – в некоторых случаях – изображаем их в виде перспективы. (Это так называемые пространственно-временные диаграммы – вроде той, что изображена на рисунке 2.1.) Например, на рисунке 2.2 время в годах отложено вдоль вертикальной оси и увеличивается снизу вверх, а расстояние в милях⁵ вдоль линии, соединяющей Солнце и Альфу Центавра, отложено по горизонтальной оси. Траектории Солнца и Альфы Центавра в пространстве-времени изображены в виде вертикальных линий слева и справа от графика. Луч света от Солнца движется по диагонали, и ему требуется четыре года, чтобы пройти путь от Солнца до Альфы Центавра.

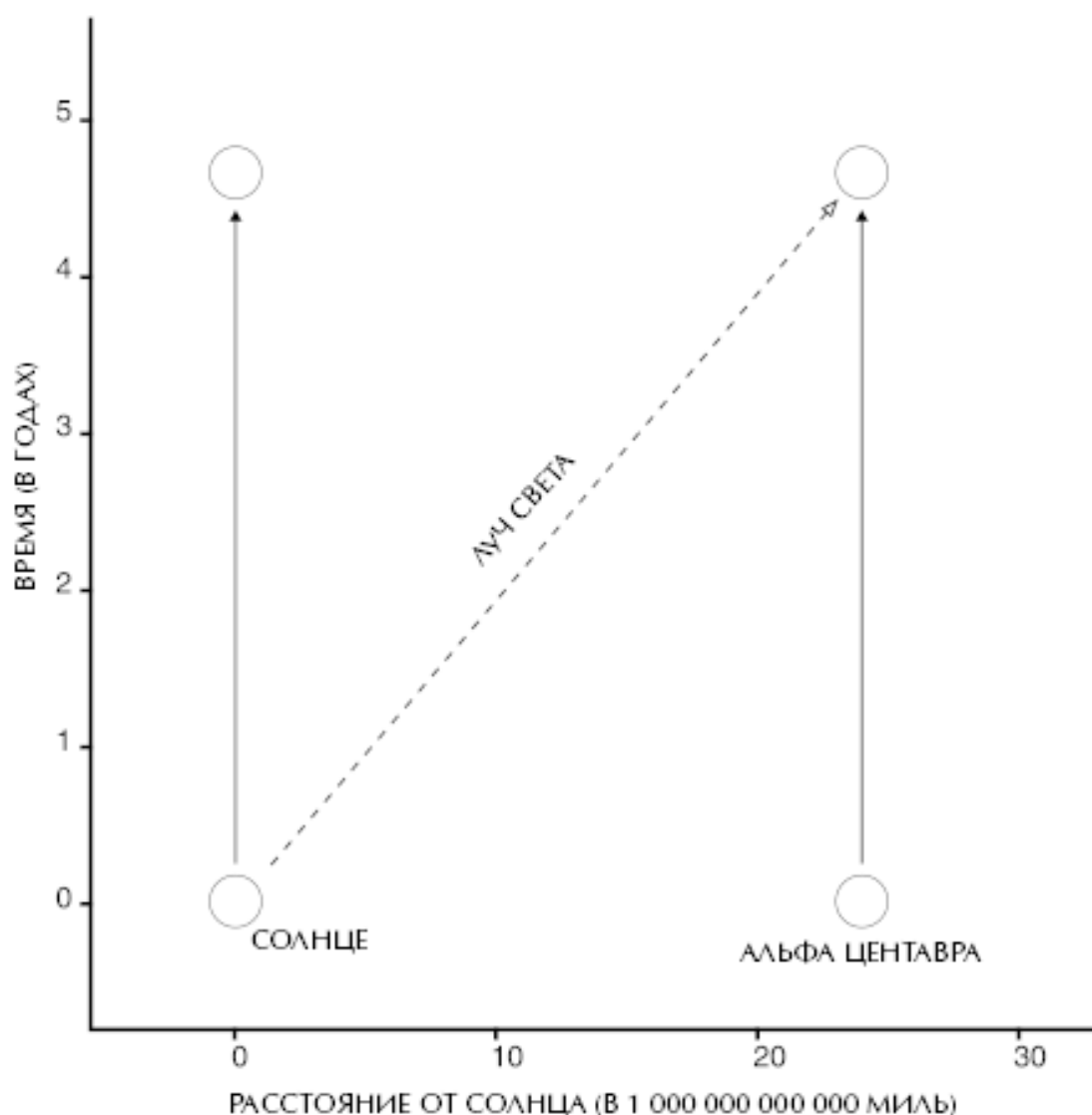


Рис. 2.2

⁵ 1 миля = 1,60934 километра.

Как мы уже знаем, из уравнений Максвелла следует, что скорость света должна быть всегда одной и той же независимо от скорости источника света, и этот вывод был подтвержден точными измерениями. Отсюда следует, что если импульс света испущен в определенное время и в определенной точке пространства, то со временем он должен распространиться в виде световой сферы, чьи размер и положение не зависят от скорости источника. Через одну миллионную долю секунды свет расширится до сферы радиусом 300 метров, через две миллионных доли секунды радиус сферы составит 600 метров, и т. д. Это напоминает круги, которые расходятся по воде, если в пруд бросить камень. По мере того как проходит время, круг этот расширяется. Если положить друг на друга снимки круга, полученные в разное время, они примут вид конуса, вершина которого совпадает с местом и временем, которые соответствуют месту и времени попадания камня в воду (рис. 2.3). Аналогичным образом распространяющийся от события свет образует (трехмерный) конус в (четырёхмерном) пространстве-времени. Этот конус называется световым конусом будущего для этого события. Точно так же можно изобразить и другой конус, называемый световым конусом прошлого, который представляет собой множество событий, световой импульс от которых в принципе мог достичь данного события (рис. 2.4).

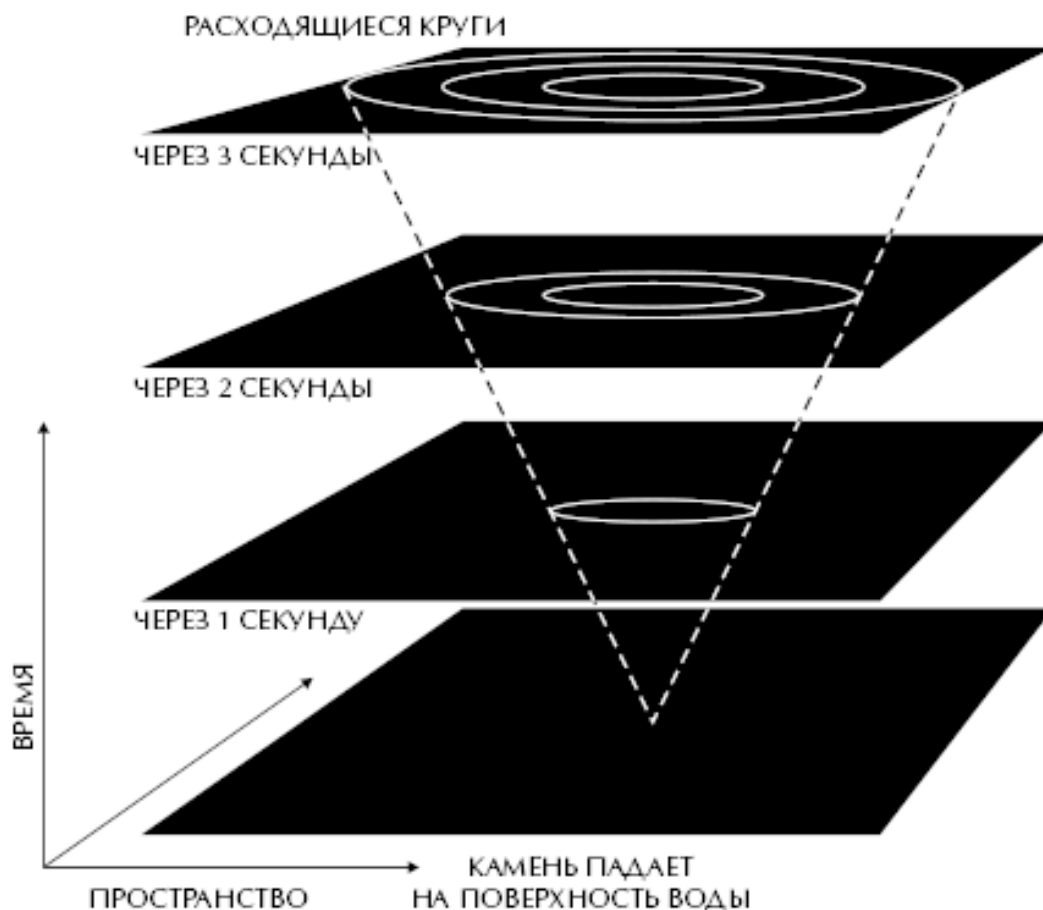


Рис. 2.3

Любое заданное событие P разделяет события Вселенной на три класса. События, до которых из события P можно «добраться» посредством частицы или волны, движущейся со скоростью меньше скорости света или равной ей, называются будущим события P . Они располагаются на излученной событием P расширяющейся световой сфере или внутри этой сферы.

Следовательно, на пространственно-временной диаграмме эти события находятся внутри светового конуса будущего для события P или на этом конусе. Событие P может повлиять только на те события, которые находятся в его световом конусе будущего, потому что ничто не может двигаться быстрее света. Аналогично прошлое события P определяется как множество всех событий, из которых можно достичь события P , перемещаясь со скоростью меньше скорости света или равной ей. Это тот набор событий, который может повлиять на то, что происходит в P . События, которые не относятся ни к прошлому, ни к будущему события P , называются абсолютно удаленными от события P (рис. 2.5). То, что происходит при этих событиях, никак не может повлиять на событие P , а событие P , в свою очередь, никак не может повлиять на эти события. Например, если Солнце прямо сейчас погаснет, то это никак не повлияет на события, происходящие в настоящий момент на Земле, потому что эти события будут абсолютно удаленными от «выключения» Солнца (рис. 2.6). Мы узнаем об этом только через восемь минут – столько требуется свету, чтобы преодолеть расстояние от Солнца до нас. Только тогда земные события окажутся внутри светового конуса будущего для события, при котором погасло Солнце. Точно так же мы не знаем, что происходит в настоящий момент на больших расстояниях во Вселенной: свет, который доходит до нас из далеких галактик, покинул их миллионы лет назад. В случае самого далекого из наблюдаемых объектов свет, который мы видим, покинул его восемь тысяч миллионов лет назад. Так вот: глядя на Вселенную, мы видим ее такой, какой она была в прошлом.

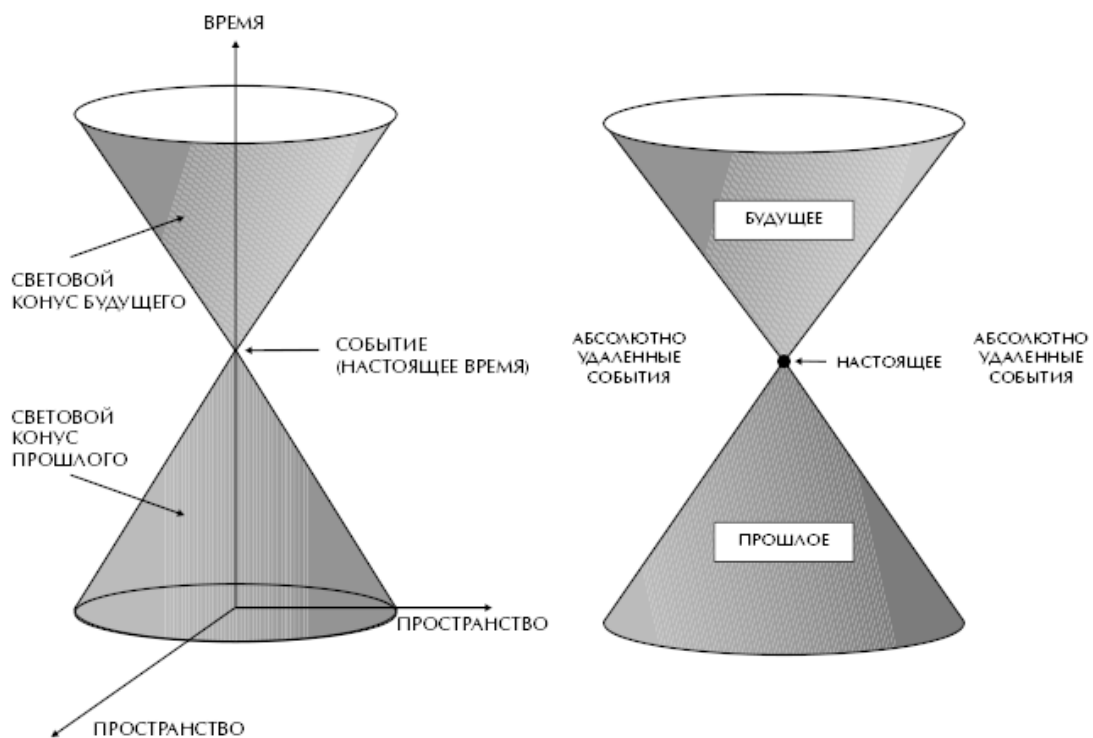


Рис. 2.4 и 2.5

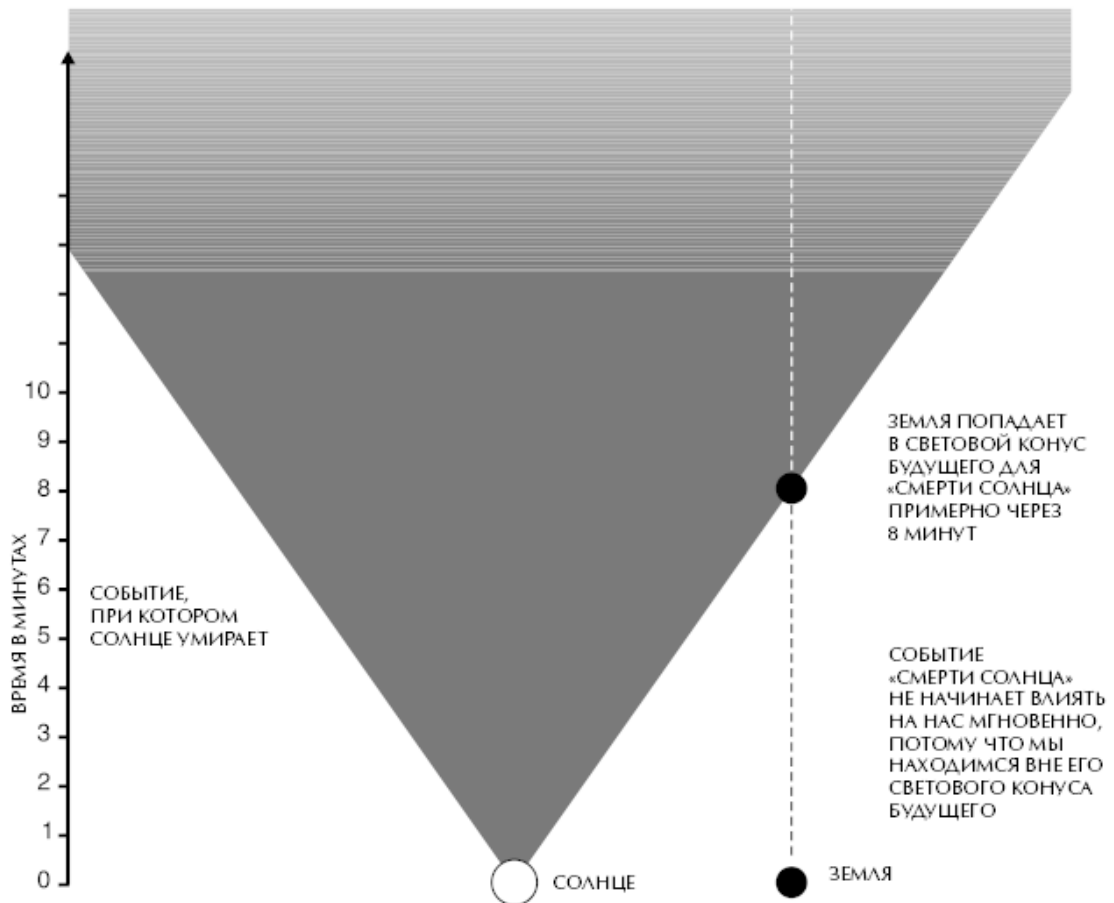


Рис. 2.6

Если пренебречь влиянием тяготения, – как это сделали Эйнштейн и Пуанкаре в 1905 году, – то мы получим то, что называют специальной теорией относительности. Для каждого события в пространстве-времени можно построить световой конус (множество всех лучей света в пространстве-времени, которые могут излучаться при рассматриваемом событии), и, поскольку скорость света одинакова для всех событий и во всех направлениях, все световые конусы одинаковы и направлены в одну и ту же сторону. Теория также говорит, что ничто не может перемещаться быстрее света. Это значит, что траектория любого объекта в пространстве и времени имеет вид линии, расположенной внутри светового конуса (рис. 2.7). Специальная теория относительности успешно объяснила, почему для всех наблюдателей скорость света одинакова (как показал опыт Майкельсона и Морли), и описала, что происходит, когда объект движется со скоростью, близкой к скорости света. Но она противоречила ньютоновской теории тяготения, которая гласит, что тела притягиваются друг к другу с силой, зависящей от расстояния между ними. Это означает, что если сдвинуть одно из тел, то в то же мгновение изменится сила, действующая на второе тело. Или, другими словами, гравитационное воздействие должно распространяться с бесконечно большой скоростью, а не со скоростью меньше скорости света или равной ей, как того требует специальная теория относительности. Между 1908 и 1914 годом Эйнштейн предпринял ряд неудачных попыток построить теорию тяготения, совместимую со специальной теорией относительности. Наконец, в 1915 году он предложил теорию, которая теперь известна как общая теория относительности.

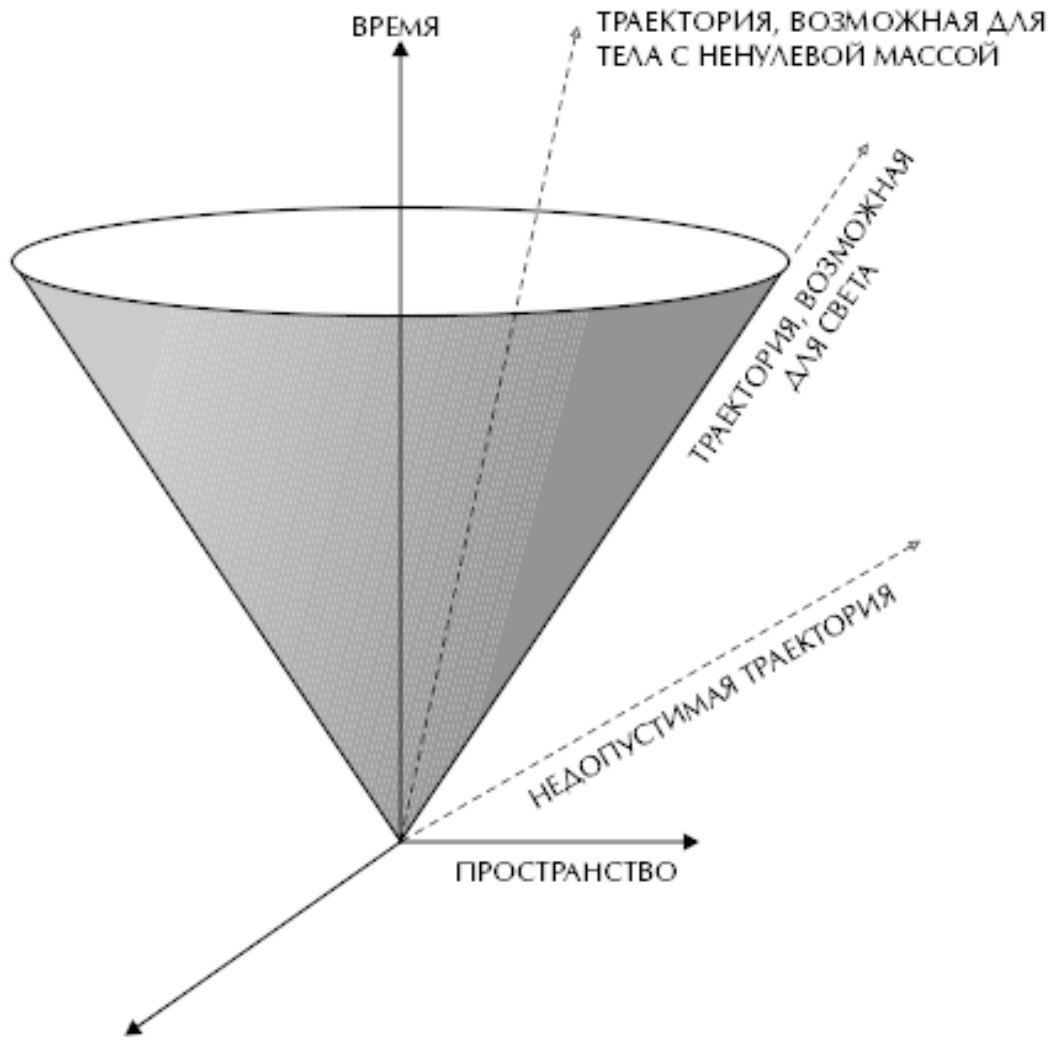


Рис. 2.7

Эйнштейн сделал революционное предположение: тяготение существенно отличается от других сил и есть следствие того, что, вопреки привычным представлениям, пространство-время не является плоским: оно искривлено, или деформировано, распределенными в нем массой и энергией. Тела, например Земля, движутся по криволинейным орбитам, не потому что их принуждает к этому сила тяготения, а потому что такие орбиты представляют собой кратчайший путь в искривленном пространстве. Это так называемая геодезическая линия – ближайший аналог прямого пути в плоском пространстве. Геодезическая линия – это кратчайший (или самый длинный) путь между двумя соседними точками. Например, поверхность Земли представляет собой двумерное искривленное пространство. Геодезическая на поверхности Земли – это дуга большого круга и это кратчайший путь от одной точки до другой (рис. 2.8). Поскольку геодезическая – кратчайший путь между двумя аэропортами, то именно такой маршрут предлагает пилоту навигатор. В общей теории относительности тела всегда движутся вдоль прямых линий в четырехмерном пространстве-времени, но для нас в нашем трехмерном пространстве все выглядит как движение по искривленным траекториям. (Это как смотреть на самолет, пролетающий над холмистой местностью. Хотя самолет летит по прямой линии в трехмерном пространстве, его тень на двумерной поверхности перемещается по искривленной траектории.)

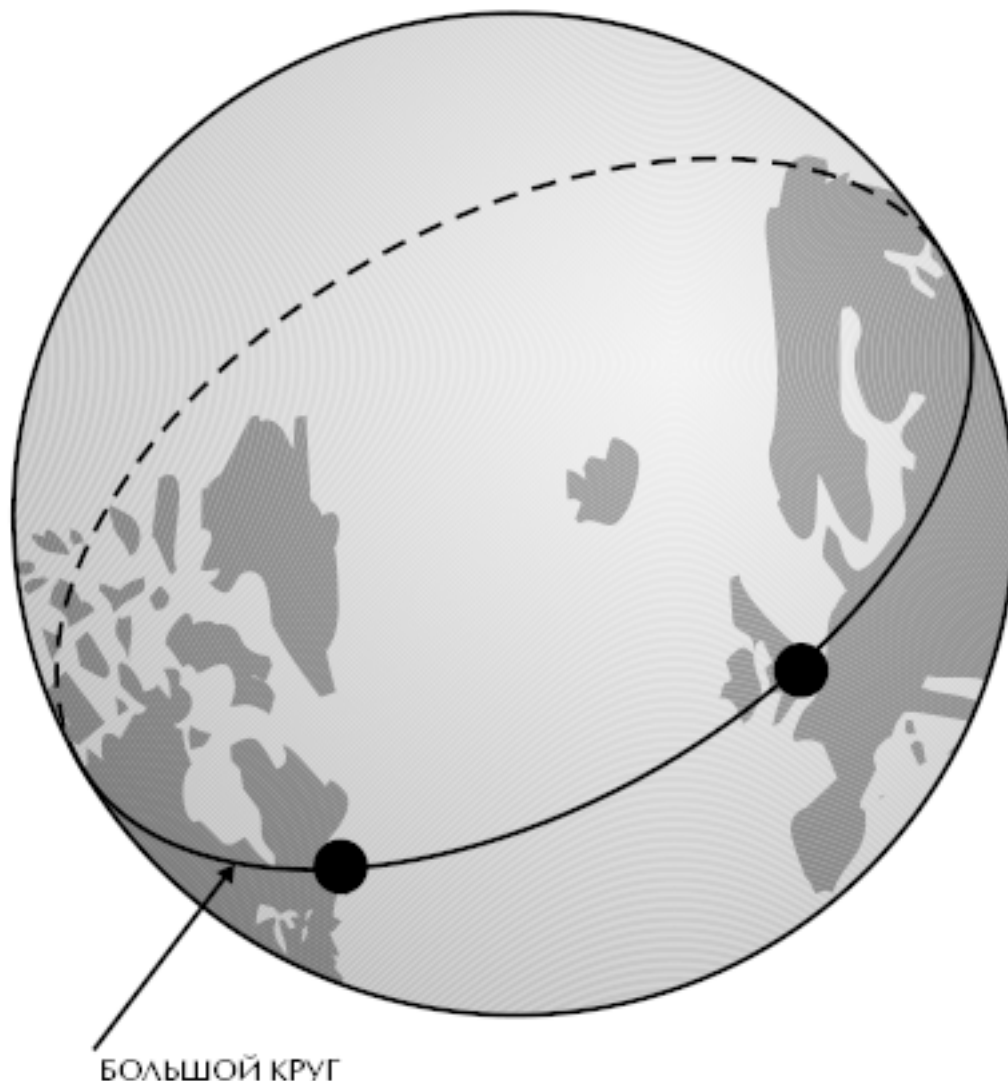


Рис. 2.8

Под действием массы Солнца пространство-время искривляется так, что, хотя в четырехмерном пространстве-времени Земля движется по прямой, для нас, находящихся в трехмерном пространстве, она выглядит движущейся по почти круговой орбите.

На самом деле планетные орбиты, предсказываемые общей теорией относительности, почти не отличаются от орбит, вычисляемых в рамках ньютоновской теории тяготения. Но в случае Меркурия, который, будучи ближайшей к Солнцу планетой, больше всего ощущает сильные гравитационные эффекты и к тому же движется по довольно вытянутой эллиптической орбите, общая теория относительности предсказывает, что большая ось эллипса должна поворачиваться вокруг Солнца со скоростью около одного градуса в десять тысяч лет. Несмотря на незначительность этого эффекта, он был обнаружен задолго до 1915 года и стал одним из первых подтверждений теории Эйнштейна. В последнее время радиолокационными методами удалось измерить еще меньшие отклонения орбит других планет от орбит, рассчитанных с помощью ньютоновской теории, и эти отклонения оказались такими, как предсказывает общая теория относительности.

Лучи света тоже должны распространяться вдоль геодезических в пространстве-времени. Отметим еще раз, что из-за кривизны пространства свет не распространяется по прямым линиям и, следовательно, согласно общей теории относительности, гравитационные поля

должны изгибать лучи света. Например, теория предсказывает, что под действием массы Солнца световые конусы вблизи него должны слегка искривляться в направлении светила. Это значит, что проходящий вблизи Солнца свет от далекой звезды немного отклоняется, из-за чего земной наблюдатель видит звезду в другом месте на небе (рис. 2.9). Конечно, если бы свет от звезды всегда проходил вблизи Солнца, то мы не могли бы сказать, отклоняется ли он или звезда находится именно там, где мы ее видим. Но Земля движется вокруг Солнца, и поэтому в разное время вблизи него оказываются разные звезды, свет которых отклоняется полем тяготения светила, из-за чего меняется их видимое положение на фоне других звезд.

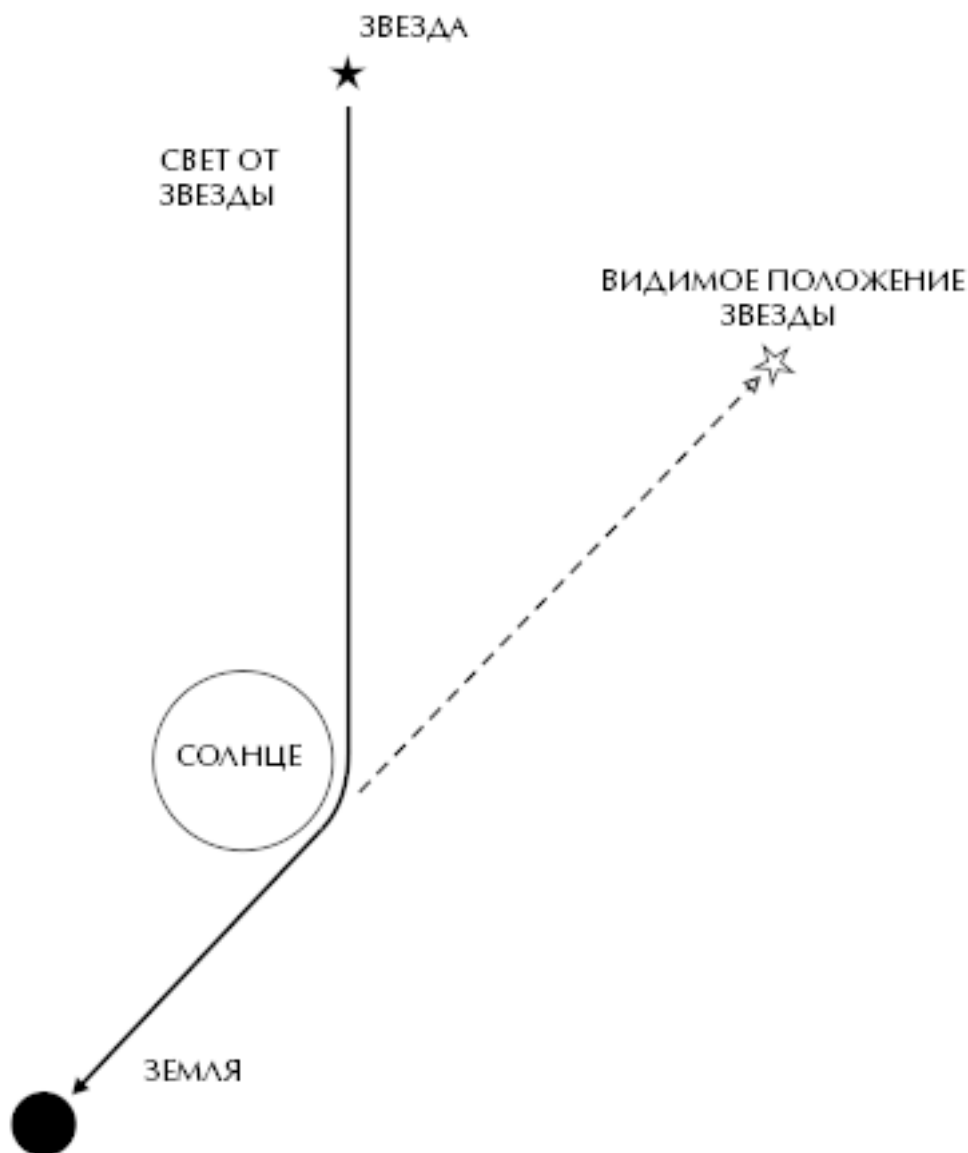


Рис. 2.9

Эффект этот обычно очень трудно обнаружить из-за яркого света Солнца, не позволяющего наблюдать близкие к нему звезды. Но такая возможность появляется во время солнечных затмений, когда Солнце оказывается закрыто Луной. Предсказанное Эйнштейном отклонение света не удалось проверить сразу, в 1915 году, из-за начавшейся годом ранее Первой мировой войны. Только в 1919 году британская экспедиция, наблюдавшая затмение с побережья Западной Африки, смогла убедиться, что Солнце действительно отклоняет свет, как это

предсказывает теория Эйнштейна. В этом доказательстве немецкой теории британскими учеными видели великий акт примирения между двумя странами после войны. Ирония состоит в том, что выполненный позднее анализ сделанных в ходе экспедиции фотографий показал, что ошибки в измерениях были такими же весомыми, как и сам измеряемый эффект. Так что данные наблюдений – следствие счастливой случайности. Сыграло роль еще и то, что ученым было заведомо известно, какой результат они хотели получить, что не редкость в научных исследованиях. Правда, отклонение света было достоверно подтверждено рядом последующих наблюдений.

Согласно другому предсказанию общей теории относительности вблизи массивных тел, таких, например, как Земля, течение времени должно замедляться. Это является следствием соотношения между энергией света и его частотой (то есть числом световых волн в секунду): чем больше энергия, тем выше частота. Когда свет распространяется вверх в поле притяжения Земли, он теряет энергию и, следовательно, частота его волн снижается. (Это значит, что промежуток времени между двумя последовательными гребнями волны увеличивается.) Наблюдателю, смотрящему с большой высоты, все, что происходит внизу, должно казаться замедленным. Это предсказание проверили в 1962 году при помощи пары очень точных часов, установленных в верхней и нижней части водонапорной башни. Нижние часы, расположенные ближе к Земле, шли медленнее, в точности как предсказывала общая теория относительности. С появлением очень точных навигационных систем, работающих на основе сигналов со спутников, разница в показаниях часов на разной высоте над Землей приобрела практическое значение. Пренебрегая предсказаниями общей теории относительности, можно ошибиться в определении положения на несколько километров!

Законы движения Ньютона похоронили идею об абсолютном положении в пространстве. Теория относительности покончила с абсолютным временем. Возьмем двоих близнецов. Предположим, что один из них отправляется жить на вершину горы, а другой остается на уровне моря. Первый близнец будет взрослеть и стареть быстрее, чем второй. Таким образом, если они снова встретятся, один из них окажется старше другого. В этом случае разница в возрасте будет очень малой. Но она будет куда больше, если один из близнецов отправится в долгое путешествие на космическом корабле, разогнавшись почти до скорости света. Когда он вернется, то окажется много моложе близнеца, оставшегося на Земле. Это так называемый парадокс близнецов, но парадоксален он только в том случае, если вы подсознательно верите в идею абсолютного времени. В теории относительности нет единого абсолютного времени: для каждого наблюдателя время течет по-своему, и его ход зависит от того, где наблюдатель находится и с какой скоростью движется.

До 1915 года пространство и время считали ареной, где разворачиваются события, которые на эту арену никак не влияют. Это было справедливо и в контексте специальной теории относительности. Тела двигались, на них действовали силы притяжения или отталкивания, но при этом пространство и время оставались не затронутыми телами и силами. Казалось естественным, что пространство и время существовали и будут существовать всегда.

Но в общей теории относительности все обстоит иначе. Пространство и время в рамках этой теории являются динамическими величинами: движение тела или действие силы влияют на кривизну пространства-времени, а структура пространства-времени в свою очередь влияет на движение тел и действие сил. Пространство и время не только влияют на все происходящее во Вселенной, но и сами подвержены влиянию происходящих во Вселенной событий. Мы не можем говорить о событиях во Вселенной вне понятий пространства и времени, и точно так же в общей теории относительности не имеет смысла говорить о пространстве и времени вне Вселенной.

В последовавшие десятилетия новое понимание пространства и времени революционным образом изменило наши взгляды на Вселенную. На смену прежнему представлению

о неизменной в целом Вселенной, которая могла существовать всегда и может продолжать существовать вечно, пришло понятие динамической расширяющейся Вселенной, которая, как казалось, возникла в определенный момент в прошлом и может завершить свое существование в определенный момент в будущем. Этой революции посвящена следующая глава.

Эта перемена также стала отправной точкой для моих исследований в теоретической физике спустя много лет. Мы с Роджером Пенроузом показали, что из общей теории относительности Эйнштейна следует, что у Вселенной должны быть начало и, возможно, конец.

Глава третья. Расширяющаяся вселенная

Если взглянуть на небо в ясную безлунную ночь, то самые яркие объекты, которые вы увидите, – это, скорее всего, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Кроме того, на небе будет много звезд вроде нашего Солнца, расположенных куда дальше него. Правда, некоторые из этих «неподвижных» звезд слегка смещаются относительно друг друга по мере движения Земли по орбите вокруг Солнца – они в действительности совсем не неподвижны! А все потому, что сравнительно близки. По мере движения нашей планеты вокруг Солнца мы видим эти относительно близкие звезды с разных ракурсов на фоне более далеких звезд. Это весьма благоприятное обстоятельство, поскольку описанный эффект позволяет непосредственно измерять расстояния до них: чем ближе звезда, тем активнее она «движется» в нашем представлении. Проксима Центавра, ближайшая к нам звезда, находится на расстоянии около четырех световых лет (свет от нее добирается до нас примерно за четыре года), или 40 миллионов миллионов километров, от Земли. Большинство других видимых невооруженным глазом звезд удалены от нас на сотни световых лет. Для сравнения: Солнце отстоит от нашей планеты всего лишь на восемь световых минут! Видимые нам звезды рассыпаны по всему небу, но при этом хорошо заметно, что основная их масса сконцентрирована в полосе, известной как Млечный Путь. Уже в 1750 году некоторые астрономы предлагали объяснение для вида Млечного Пути: согласно их предположению, большинство видимых на небе звезд могли образовывать единую дискообразную структуру, – то есть то, что мы сейчас называем спиральной галактикой. Подтверждение эта гипотеза получила лишь спустя несколько десятилетий, когда астроном сэр Уильям Гершель, премного потрудившись, составил каталог⁶ положений огромного числа звезд и расстояний до них. Но такое представление стало общепринятым лишь в начале XX века.

Современная картина Вселенной возникла совсем недавно – в 1924 году, когда американский астроном Эдвин Хаббл показал, что наша Галактика Млечный Путь – не единственная во Вселенной. Хаббл, в сущности, доказал существование множества других галактик, разделенных огромными объемами пустого пространства⁷. Для этого ему потребовалось определить расстояния от Земли до других галактик. Но галактики так далеки, что, в отличие от близких звезд, выглядят совершенно неподвижными. Поэтому Хабблу пришлось прибегнуть для определения расстояния к косвенным методам. Так, видимый блеск звезды зависит от двух факторов: от того, сколько света звезда излучает за единицу времени (то есть ее светимости), и от того, насколько она удалена от нас (то есть от расстояния до Земли). Мы можем вычислить светимости близких звезд по их видимому блеску и расстоянию. И наоборот, если бы мы знали светимости звезд в других галактиках, то могли бы определить расстояния до этих звезд, измеряя их видимый блеск. Хаббл обратил внимание, что близкие звезды определенного типа, для которых удастся определить расстояния, всегда имеют одну и ту же светимость, и предположил, что если найти в далекой галактике звезды таких типов, то можно принять их светимость равной светимости аналогичных звезд в солнечной окрестности и на этой основе рассчитать расстояние до галактики. Если расстояния, получаемые таким образом по нескольким звездам

⁶ Гершель не составлял «каталог огромного числа звезд». Речь идет об исследовании распределения звезд в пространстве в разных направлениях на небе путем подсчетов числа звезд разного блеска в 1083 площадках по всему небу. Исследование этого распределения позволило Гершелю сделать вывод о наличии у звездной вселенной структуры, и тем он опровергнул представление о равномерном распределении звезд в пространстве, а также о том, что Солнце является частью огромной, но конечной по своим размерам звездной системы – нашей Галактики. – *Прим. перев.*

⁷ Первым, кто предположил, что некоторые туманности, видимые на небе, могут быть отдельными галактиками, был немецкий философ Иммануил Кант. Эту мысль он высказал в своем трактате, опубликованном в 1755 году. Первое надежное доказательство того, что туманность Андромеды не является частью Млечного Пути, а представляет собой другую галактику, получено эстонским астрономом Эрнстом Эпиком, который в 1918 году определил расстояние до туманности. Хаббл первым стал массово определять расстояния до галактик. – *Прим. перев.*

конкретной галактики, окажутся примерно одинаковыми, то такую оценку вполне можно считать заслуживающей доверия.

Хаббл таким образом определил расстояния до девяти разных галактик. Теперь мы знаем, что Млечный Путь – наша Галактика – это всего лишь одна из сотен миллиардов галактик, доступных взору современных телескопов, а галактика, в свою очередь, состоит из сотен миллиардов звезд. На рисунке 3.1 изображена спиральная галактика, которая выглядит примерно как наша для наблюдателя, обитающего в совершенно другой области Вселенной. Мы живем в медленно вращающейся галактике поперечником около 100 000 световых лет. Звезды в спиральных рукавах совершают один оборот вокруг галактического центра примерно за несколько сотен миллионов лет. Наше Солнце – заурядная, средних размеров желтая звезда, расположенная неподалеку от внутренней кромки одного из спиральных рукавов. Мы проделали большой путь со времен Аристотеля и Птолемея, которые считали Землю центром Вселенной!

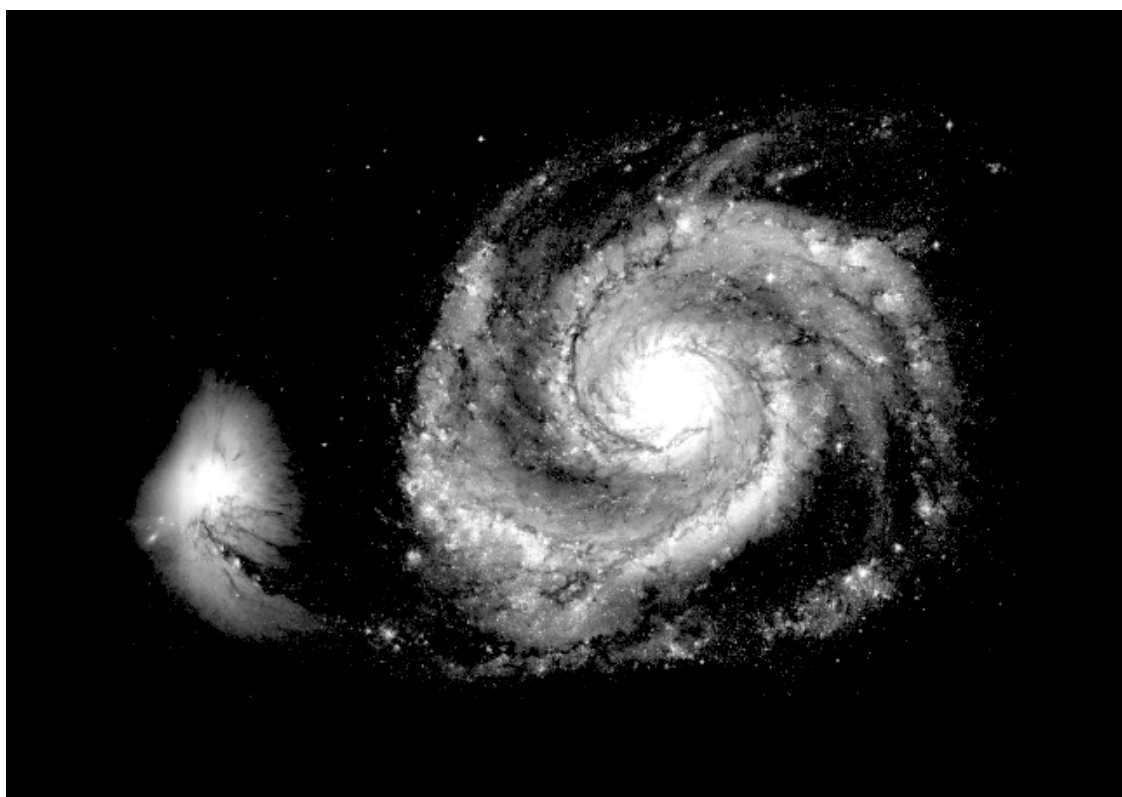


Рис. 3.1

Звезды так далеки, что кажутся всего лишь светящимися точками. Мы не в состоянии различить их размер и форму. Но как мы можем различать звезды разных типов? У огромного большинства звезд существует только одна характерная особенность, которую мы можем наблюдать: цвет их излучения. Ньютон обнаружил, что если солнечный свет пропустить через треугольную призму из стекла, то он расщепляется на составляющие его цвета (спектр), совсем как в радуге. Направив телескоп на звезду или галактику, можно наблюдать спектр излучения этого объекта. Спектры звезд различаются, но соотношение яркостей различных цветов всегда соответствует соотношению яркостей цветов в излучении раскаленного тела. (Излучаемый любым непрозрачным раскаленным объектом свет всегда имеет характерный спектр, который зависит только от его температуры, – это тепловой спектр. Это значит, что по спектру излучения звезды можно определить ее температуру.) Более того, некоторые цвета в спектре звезды отсутствуют, и набор этих цветов разный у разных звезд. Поскольку мы знаем, что каждый

химический элемент поглощает характерный для него набор цветов, то, сравнив набор цветов, которые отсутствуют в спектре звезды, можно точно определить, какие элементы присутствуют в ее атмосфере.

В 20-х годах XX века астрономы начали исследовать спектры звезд в других галактиках и обнаружили одну странность: в спектрах этих звезд отсутствовали те же характерные наборы цветов, что и в спектрах звезд нашей Галактики. Более того, все эти цвета оказывались смещенными на одну и ту же относительную величину в красную сторону спектра. Чтобы осознать следствия этого факта, потребуется разобраться в том, что представляет собой эффект Доплера. Как мы знаем, видимый свет состоит из колебаний, или волн, электромагнитного поля. Длина волны (то есть расстояние между двумя последовательными гребнями) видимого света чрезвычайно мала и составляет от четырех до семи десятимиллионных метра. Человеческий глаз воспринимает свет волн разной длины как разные цвета – самый «длинноволновой» свет находится на красном конце спектра, самый «коротковолновой» – на синем.

Теперь представьте себе источник света – например звезду, – расположенный на постоянном расстоянии от нас и излучающий световые волны постоянной длины. Очевидно, что в этом случае длина волны, которую мы воспринимаем, в точности равна длине волны, которую звезда излучает (гравитационное поле галактики недостаточно сильное, чтобы оказать на нее существенное влияние). А теперь представим себе, что этот источник света начинает двигаться к нам. В момент, когда он излучает очередной гребень волны, источник оказывается ближе к нам, и поэтому расстояние между гребнями будет меньше, чем когда свет излучала неподвижная звезда. Это значит, что принимаемые нами волны будут короче, чем в случае неподвижной звезды. Соответственно, если источник света удаляется от нас, то принимаемые волны от этого источника окажутся длиннее. Отсюда следует, что спектры удаляющихся звезд смещены в красную сторону спектра (красное смещение), а спектры объектов, движущихся к нам, смещены в голубую сторону. С этим соотношением длины и скоростью волны, называемым эффектом Доплера, мы сталкиваемся и в повседневной жизни. Прислушайтесь, когда автомобиль проносится мимо вас по дороге: пока он приближается, звук его двигателя, или сигнала, выше (что соответствует меньшей длине волны и более высокой частоте звуковых волн), а после того как автомобиль проедет мимо и станет удаляться, – ниже. Аналогично ведут себя свет и радиоволны. И действительно, дорожные службы используют эффект Доплера для определения скорости автомобиля, измеряя длину волны отраженных от него радиопульсов.

Доказав существование других галактик, Хаббл занялся определением расстояний до них и наблюдением их спектров. В то время считали, что галактики движутся совершенно случайным образом, а потому ожидали обнаружить примерно одинаковое количество галактик с голубым и красным смещением спектров. Ко всеобщему удивлению, оказалось, что спектры большинства галактик смещены в красную сторону: почти все они удалялись от нас! Еще более удивительной оказалась научная публикация Хаббла 1929 года: величины красного смещения в спектрах галактик не распределены случайно, а прямо пропорциональны расстоянию галактики от нас. Иными словами, чем дальше от нас галактика, тем быстрее она от нас удаляется! Это означало, что, вопреки господствовавшим тогда представлениям, Вселенная не может быть стационарной и что в действительности она расширяется, а расстояния между галактиками со временем увеличиваются.

Открытие расширения Вселенной стало одной из величайших интеллектуальных революций XX века. Оглядываясь назад, невольно удивляешься, что никто не подумал об этом раньше. Ньютон и другие ученые были вполне подкованны, чтобы сделать вывод о том, что стационарная Вселенная неизбежно начала бы сжиматься под действием собственного тяготения. Но представим себе, что Вселенная расширяется. Если бы Вселенная расширялась с небольшой скоростью, то сила тяготения рано или поздно остановила бы ее расширение, и Вселенная начала бы сжиматься. Однако если бы Вселенная расширялась со скоростью, превышающей

некоторое предельное значение, то сила тяготения никогда не смогла бы остановить это расширение, и оно продолжалось бы вечно. Это немного напоминает запуск ракеты с поверхности Земли: если скорость ракеты недостаточно велика, то сила тяготения в какой-то момент остановит ее движение, а после заставит ее упасть обратно на землю. С другой стороны, если скорость ракеты больше определенного критического значения (около 11 километров в секунду), то сила тяготения нашей планеты уже никогда не сможет заставить ее вернуться, и ракета продолжит удаляться от Земли. Такое поведение Вселенной вполне можно было предсказать в рамках ньютоновской теории тяготения и в XIX, и в XVIII столетии, и даже в конце XVII. Но вера в стационарную Вселенную была столь прочна, что оставалась незыблемой вплоть до начала XX века. Даже Эйнштейн, сформулировав общую теорию относительности в 1915 году, был настолько уверен в стационарности космоса, что скорректировал уравнения теории: он ввел дополнительный коэффициент, который назвал космологической постоянной, чтобы обеспечить Вселенной неподвижность. Эйнштейн заявил новую силу – «антигравитацию», – которая, в отличие от других сил, не имеет какого-то определенного источника, но встроена в саму структуру пространства-времени. Эйнштейн утверждал, что пространству-времени присуще внутреннее стремление расширяться, и оно может полностью уравновесить взаимное притяжение всего вещества во Вселенной, в результате чего сама Вселенная остается стационарной. Только один человек, похоже, был готов принять общую теорию относительности в ее первоизданном виде: пока Эйнштейн и другие физики искали способ избежать неизбежной нестационарности в рамках общей теории относительности, российский физик и математик Александр Фридман предпочел эту нестационарность объяснить.

Фридман выдвинул две очень простые гипотезы о свойствах Вселенной. Во-первых, он предположил, что Вселенная одинакова во всех направлениях и, во-вторых, что это справедливо для любого наблюдателя в любой точке. Исходя всего лишь из этих двух предположений, Фридман показал, что Вселенная не должна быть стационарной. То есть еще в 1922 году, за несколько лет до открытия Эдвина Хаббла, Фридман предсказал именно то, что Хаббл впоследствии обнаружил!

Конечно же, предположение о том, что Вселенная совершенно одинакова во всех направлениях, не совсем верно. Например, как мы уже отметили, другие звезды в нашей Галактике образуют хорошо заметную светлую полосу, пересекающую ночное небо, – ее мы называем Млечным Путем. Но если взглянуть на далекие галактики, то окажется, что их число примерно одинаково в любом направлении. Таким образом, Вселенная выглядит практически одинаково во всех направлениях, только если рассматривать ее на большем масштабе по сравнению с расстояниями между галактиками и пренебречь различиями на меньших масштабах. Долгое время равномерное распределение звезд⁸ во Вселенной считалось достаточным обоснованием гипотезы Фридмана как грубого приближения к реальной Вселенной. Но позднее, благодаря счастливой случайности было открыто еще одно свойство Вселенной, замечательно согласующееся с предположением Фридмана.

В 1965 году Арно Пензиас и Роберт Уилсон, американские физики из компании *Bell Telephone Laboratories* в Нью-Джерси, тестировали очень чувствительный микроволновой приемник. (Напомним, что микроволновое излучение – это электромагнитные волны – так же, как и свет, – но длина волны составляет примерно один сантиметр.) Пензиасу и Уилсону не давало покоя то, что приемник регистрировал большую интенсивность шума, чем ожидалось. Было непохоже, что шум приходил с какого бы то ни было определенного направления. Пензиас и Уилсон исследовали приемник и обнаружили там птичий помет. Они проверили прибор на предмет других возможных неполадок, но вскоре исключили их как возможные источ-

⁸ По-видимому, имеется в виду крупномасштабное распределение вещества, ведь распределение звезд в пространстве весьма неоднородно – большая их часть сосредоточена в звездных системах, называемых галактиками. – *Прим. перев.*

ники ошибок. Они знали, что любой шум атмосферного происхождения должен быть сильнее вблизи горизонта, чем в вертикальном направлении, потому что в первом случае лучи света [и радиосигналы] проходят через большую толщу воздуха, чем лучи и сигналы, приходящие прямо сверху. Избыточный шум оставался неизменным независимо от того, куда был направлен приемник, и следовательно, его источник должен находиться *вне атмосферы*. Шум этот оставался неизменным днем и ночью и в течение всего года, несмотря на вращение Земли вокруг оси и ее движение по орбите вокруг Солнца. Отсюда следовало, что источник излучения находится *за пределами* Солнечной системы и даже за пределами нашей Галактики. В противном случае его интенсивность должна была меняться со временем, ведь из-за движения Земли направление приемника тоже менялось.

Раз мы знаем, что излучение на пути к Земле пересекло значительную часть наблюдаемой Вселенной и при этом его интенсивность одинакова во всех направлениях, то и сама Вселенная должна быть одинаковой во всех направлениях, как минимум на больших масштабах. Теперь мы уже знаем, что колебания интенсивности шума в разных направлениях очень малы, так что Пензиас и Уилсон, сами того не зная, натолкнулись на удивительно надежное подтверждение первой гипотезы Фридмана. Но поскольку Вселенная все же не совсем одинакова во всех направлениях и верно это только в среднем и на больших масштабах, то и интенсивность микроволнового излучения тоже не может быть абсолютно одинаковой во всех направлениях, и должны наблюдаться небольшие вариации по небу. Эти вариации впервые были обнаружены в 1992 году благодаря наблюдениям спутника *COBE*, и их величина оказалась приблизительно равна одной сотысячной доле⁹. В главе 8 мы узнаем, что, несмотря на малый шаг, эти вариации очень важны.

Почти в то же время, когда Пензиас и Уилсон исследовали шум приемника, два других американских физика – Боб Дике и Джим Пиблс, работавшие в расположенном поблизости Принстонском университете, – тоже заинтересовались микроволновым излучением. Они занялись гипотезой, высказанной Георгием Гамовым, студентом Александра Фридмана. Согласно этой гипотезе ранняя Вселенная должна была светиться и быть очень горячей и плотной. Дике и Пиблс полагали, что мы должны быть в состоянии увидеть свет ранней Вселенной, поскольку он как раз теперь должен дойти до нас из самых дальних далей. Однако из-за расширения Вселенной этот свет должен был подвергнуться значительному красному смещению, а потому воспринимался бы как микроволновое излучение, а не видимый свет. Дике и Пиблс как раз готовились к поискам этого излучения, когда Пензиас и Уилсон узнали об их работе и поняли, что уже нашли его. Пензиас и Уилсон получили за это Нобелевскую премию 1978 года (что, конечно, несколько несправедливо по отношению к Дике и Пиблсу, не говоря уже о Гамове).

На первый взгляд может показаться, будто все эти данные, свидетельствующие о том, что Вселенная одинакова во всех направлениях, означают, что мы занимаем особое место во Вселенной. В частности, может возникнуть впечатление, что раз практически все наблюдаемые нами галактики удаляются от нас, то мы находимся в самом центре. Однако есть и другое объяснение: Вселенная выглядит совершенно одинаково во всех направлениях независимо от того, в какой галактике находится наблюдатель. Это, как мы только что видели, предпо-

⁹ Анизотропия микроволнового реликтового излучения была открыта в 1992 году с помощью советского космического аппарата серии «Прогноз». Эксперимент назывался «Реликт». Рабочая группа в составе руководителя эксперимента И. А. Струкова, а также Д. П. Скулачева, А. А. Брюханова и М. В. Сажина в январе 1992 года на научном семинаре в ГАИШ МГУ сообщила об обнаружении анизотропии. Одновременно с этим в научный журнал «Письма в Астрономический журнал» отправили статью на русском языке, а в журнал *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* – на английском. Публикация статьи в последнем журнале была задержана. В конце апреля 1992 года Дж. Смут, научный руководитель проекта *DMR*, установленного на космическом аппарате *COBE*, объявил на специальной пресс-конференции об открытии анизотропии реликтового излучения. Репортеры посвятили этому событию огромное количество статей в средствах массовой информации, назвав радиокарты *COBE* «ликом Господа Бога». За свою работу Дж. Смут был впоследствии удостоен Нобелевской премии. Однако первыми «лик Господа Бога» увидели все-таки советские ученые. – *Прим. науч. ред.*

лагает вторая гипотеза Фридмана. Нет никаких научных данных, которые бы подтверждали или опровергали ее. Сегодня мы склонны верить этой гипотезе хотя бы из скромности: было бы совершенно удивительно, если бы Вселенная выглядела одинаково во всех направлениях только с нашего наблюдательного пункта и ни с какого другого! Во фридмановской модели Вселенной все галактики удаляются друг от друга. Процесс прекрасно иллюстрирует постепенно раздувающийся воздушный шарик со множеством нарисованных на нем точек. По мере растягивания шарика расстояние между любыми двумя точками увеличивается, но при этом ни про одну из них нельзя сказать, что она является центром расширения. Более того, чем дальше расположены точки на поверхности шарика, тем быстрее они удаляются друг от друга. Аналогично в модели Фридмана скорость взаимного удаления двух галактик пропорциональна расстоянию между ними. Таким образом, эта модель предсказывает, что красное смещение галактик должно быть прямо пропорционально их расстоянию от нас, в точности как показал Хаббл. Несмотря на то что модель оказалась удачной и позволила предсказать результат наблюдений Хаббла, на Западе работа Фридмана оставалась неизвестной до 1935 года, то есть до тех пор, пока аналогичные модели не разработали американский физик Говард Робертсон и британский математик Артур Уолкер, отреагировав на открытие Хабблом равномерного расширения Вселенной.

Хотя Фридман описал только одну модель Вселенной, удовлетворяющую требованиям двух его фундаментальных гипотез, возможны три таких модели. В модели первого типа (фридмановской) Вселенная расширяется достаточно медленно, а потому под действием гравитационного притяжения между галактиками это расширение замедляется и рано или поздно останавливается. После галактики начинают двигаться вспять, навстречу друг другу, и Вселенная сжимается. На рисунке 3.2 показан график зависимости расстояния между соседними галактиками от времени. В начальный момент это расстояние равно нулю, потом оно растет, достигает максимума и затем уменьшается до нуля. В решении второго типа Вселенная расширяется настолько быстро, что взаимное притяжение галактик не в состоянии когда-либо остановить расширение, хотя и несколько замедляет его. Зависимость расстояния между двумя соседними галактиками в этой модели показана на рисунке 3.3. В начальный момент расстояние равно нулю, после чего галактики разбегаются с равномерной скоростью. Наконец, есть третий тип решения, когда Вселенная расширяется как раз с такой скоростью, которая не даст ей начать сжиматься. В этом случае расстояние между галактиками (рис. 3.4) тоже равно нулю в начальный момент, после чего вечно увеличивается. Правда, скорость расхождения галактик все уменьшается, хотя и никогда не достигает нуля.

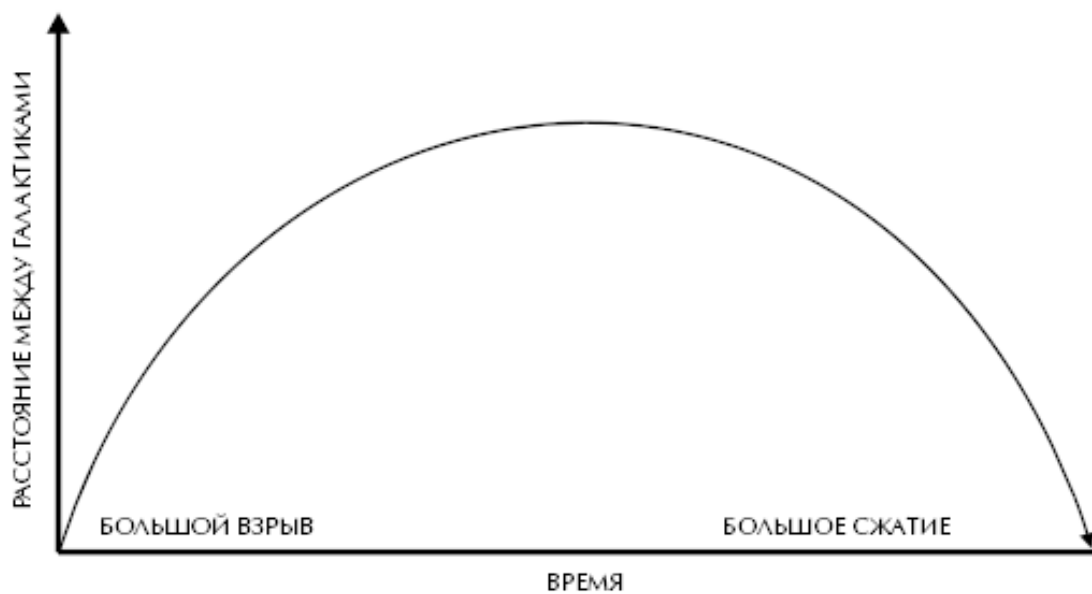


Рис. 3.2

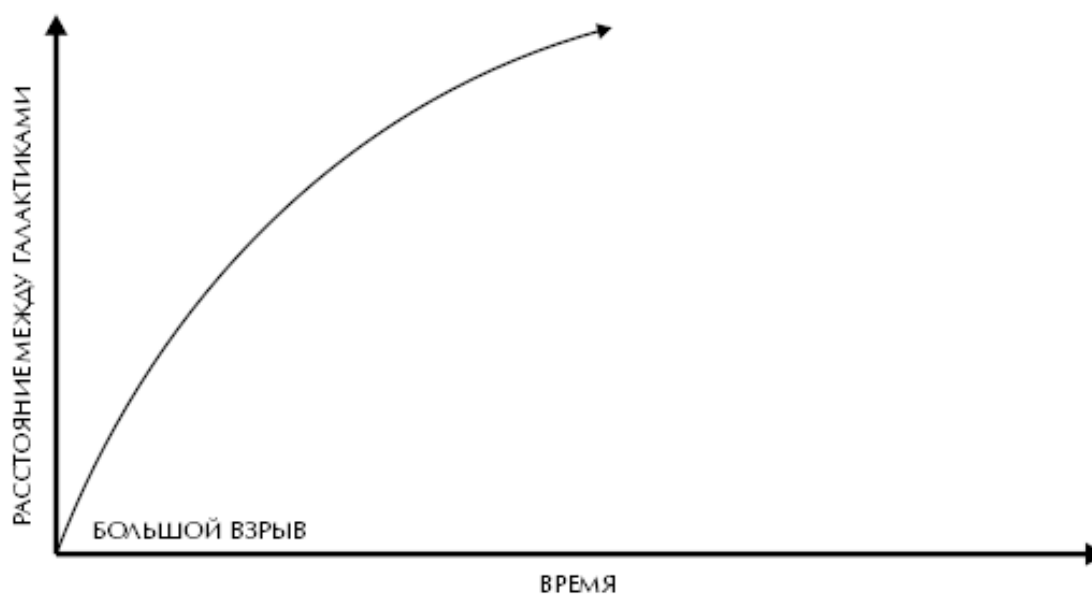


Рис. 3.3

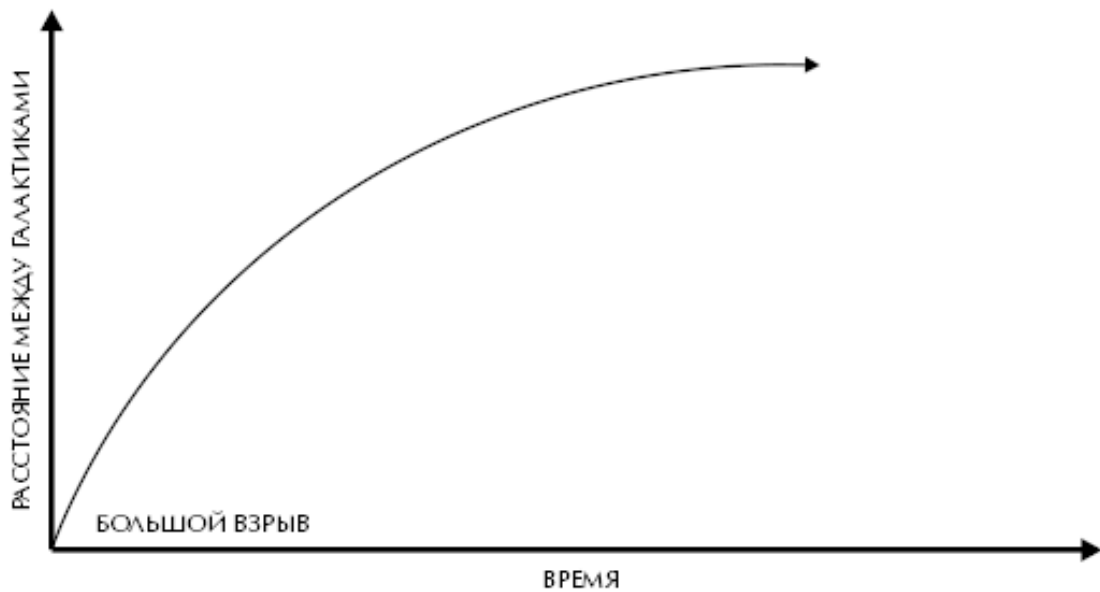


Рис. 3.4

Замечательное свойство модели Фридмана (модели первого типа) состоит в том, что Вселенная в ней не является бесконечной в пространстве, но при этом пространство не имеет границ. Тяготение в этой модели настолько сильно, что пространство оказывается замкнутым само на себя наподобие поверхности Земли. Двигаясь в определенном направлении по поверхности Земли, вы никогда не наткнетесь на непреодолимый барьер, не сорветесь с края, а просто рано или поздно вернетесь в то место, с которого начали свой путь. В модели Фридмана пространство напоминает поверхность нашей планеты, но имеет три измерения – вместо двух. В четвертом измерении – времени – модель тоже конечна, но скорее напоминает отрезок с двумя границами – началом и концом. Как мы увидим далее, сочетание общей теории относительности с принципом неопределенности квантовой механики делает возможной модель, где и пространство, и время конечны и притом не имеют границ.

Идея кругосветного путешествия по Вселенной с возвращением в исходный пункт – замечательный сюжет для научной фантастики. Однако на практике ее едва ли удастся реализовать: есть математические свидетельства, что Вселенная успеет схлопнуться до нулевого размера еще до возвращения путешественника. Чтобы успеть вернуться в отправную точку до конца Вселенной, придется двигаться быстрее света, а это невозможно!

В модели Фридмана первого типа, которая сначала расширяется, а потом схлопывается, пространство замкнуто само на себя, подобно поверхности Земли. Поэтому оно имеет конечную протяженность. В модели Вселенной второго типа, которая расширяется вечно, пространство искривлено иначе и напоминает седло. И в этом случае пространство бесконечно. Наконец, в модели Фридмана третьего типа, скорость расширения в которой равна некоему критическому значению, пространство плоское (и поэтому также бесконечно).

Какая же из моделей Фридмана описывает нашу Вселенную? Сменится ли расширение однажды сжатием или будет продолжаться вечно? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно знать современную скорость расширения Вселенной и современное значение ее средней плотности. Если плотность меньше определенного критического значения, определяемого скоростью расширения, гравитационное притяжение будет слишком слабым и не сможет остановить расширение. Если плотность превышает критическое значение [определяемое скоростью расширения], то сила тяготения вещества во Вселенной рано или поздно остановит расширение, заставив Вселенную сжаться.

Скорость расширения в настоящий момент можно определить, измерив скорости удаления от нас других галактик – с помощью эффекта Доплера. Эти скорости можно измерить весьма точно, а вот в расстояниях до галактик мы не так уверены, потому что установить их можно только косвенными методами. Так что на данный момент мы знаем лишь, что скорость расширения Вселенной составляет от 5 до 10 % за миллиард лет. Наши знания о современной средней плотности Вселенной еще менее точны. Если учесть массу всех видимых звезд в нашей и других галактиках, то полученная средняя плотность окажется менее одной сотой величины, необходимой, чтобы остановить расширение Вселенной, даже если принять наименьшую оценку скорости расширения.

Наша и другие галактики, по-видимому, содержат большое количество темного вещества, которое невозможно увидеть непосредственно, но о существовании которого мы знаем по гравитационному воздействию на орбиты звезд в галактиках. Кроме того, большинство галактик находятся в скоплениях, и аналогичные соображения позволяют сделать вывод о наличии еще большего количества темного вещества в межгалактическом пространстве скоплений, поскольку оно влияет на движение галактик. С учетом массы темного вещества средняя плотность оказывается равной примерно одной десятой величины, необходимой, чтобы остановить расширение Вселенной. Но могут быть и другие, до сих пор не обнаруженные формы вещества, распределенные почти равномерно по всей Вселенной, и их учет может дополнительно увеличить среднюю плотность, которая достигнет критического значения, необходимого, чтобы остановить расширение. Однако имеющиеся данные свидетельствуют, что Вселенная, скорее всего, будет расширяться вечно. При этом наверняка мы можем сказать лишь то, что даже если Вселенной суждено снова сжаться, это произойдет не раньше, чем через десять миллиардов лет, – потому что она расширялась в течение такого времени, и это как минимум. Не следует зря об этом беспокоиться: к тому времени человечество вымрет вместе с погасшим Солнцем, если только мы не успеем колонизовать области за пределами Солнечной системы¹⁰!

Общее свойство всех фридмановских моделей в том, что в некоторый момент времени в прошлом (между 10 и 20 миллиардами лет назад) расстояния между соседними галактиками должны были быть равны нулю. В тот момент, который мы называем Большим взрывом, плотность Вселенной и кривизна пространства-времени должны были быть бесконечными. Поскольку математика не может оперировать бесконечными числами¹¹, общая теория относительности (на которой основаны модели Фридмана) предсказывает существование точки во Вселенной, где сама теория уже не имеет силы. Это пример того, что математики называют сингулярностью. В сущности, все наши научные теории исходят из предположения, что пространство-время «гладкое» и почти плоское, и поэтому они теряют смысл внутри сингулярности Большого взрыва, где кривизна пространства-времени бесконечна. А значит, если до Большого взрыва и имели место какие бы то ни было события, то на их основе ничего нельзя сказать о последовавшей эволюции системы, потому что в момент Большого взрыва система перестает быть предсказуемой.

Соответственно, если бы мы знали – а мы знаем – только то, что происходило после Большого взрыва, мы не могли бы определить, что происходило до него. Насколько нам известно, события, случившиеся до Большого взрыва, не могут иметь для нас никаких последствий, а потому не могут быть частью какой бы то ни было научной модели Вселенной. Поэтому их придется исключить, приняв постулат о том, что время началось с Большого взрыва.

¹⁰ Согласно актуальным наблюдательным данным, наша Вселенная состоит из обычного (барионного) вещества (4 %), темной материи (23 %) и темной энергии (73 %). Последняя, действуя как силы отталкивания, приводит к современному ускоренному расширению нашей Вселенной. – *Прим. науч. ред.*

¹¹ Вообще говоря, в математике есть средства представления бесконечных чисел и выполнения некоторых операций над ними (например, так называемые трансфинитные числа). Правда, они не подходят для рассматриваемой задачи. – *Прим. перев.*

Идея о том, что у времени было начало, многим не нравится, потому что отсылает к идее о вмешательстве божества. (С другой стороны, Католическая церковь ухватилась за модель Большого взрыва и в 1951 году официально объявила, что она соответствует Библии). В связи с этим было предпринято несколько попыток избежать вывода о Большом взрыве. Наиболее широкую поддержку получила стационарная теория. Она была предложена в 1948 году двумя учеными, бежавшими из оккупированной нацистами Австрии, – это были Герман Бонди и Томас Голд, которые во время войны вместе с британцем Фредом Хойлом работали над созданием радара. Идея была в том, что по мере разбегания галактик в пространстве между ними из постоянно образующегося нового вещества возникают новые галактики. Таким образом, Вселенная выглядела бы одинаково в любой момент времени в любой точке пространства. Чтобы оправдать теорию стационарной Вселенной, потребовалось подправить общую теорию относительности: нужно было сохранить возможность непрерывного рождения вещества. Но требуемая скорость возникновения нового вещества оказалась настолько малой (около одной элементарной частицы на один кубический километр в год), что это предположение никак не противоречило экспериментальным данным. Предложенная гипотеза была хорошей научной теорией в том смысле, что мы раскрыли в первой главе: она была простой, и на ее основе можно было сделать определенные предсказания, которые проверялись наблюдениями. Одно из таких предсказаний состояло в том, что число галактик или других подобных объектов в любом заданном объеме пространства должно быть одинаковым в любой точке Вселенной и в любой момент времени. В конце 50-х и начале 60-х годов прошлого века группа астрономов под руководством Мартина Райла (который также вместе с Бонди, Голдом и Хойлом во время войны работал над созданием радара) готовила в Кембридже обзор космических радиоисточников. Ученые показали, что большинство этих радиоисточников должны находиться за пределами нашей галактики (многие из них были отождествлены с другими галактиками), а также что число слабых источников намного превосходит число ярких. Исследователи предположили, что более слабые источники расположены дальше более ярких, и сделали вывод, что на небольших расстояниях число источников в единице объема меньше, чем на далеких расстояниях. Это могло означать, что мы находимся в центре большой области Вселенной с относительно невысокой плотностью источников. Или же в прошлом, когда радиоволны направились в нашу сторону, число источников в единице объема было больше, чем в настоящее время. Любое из этих предположений противоречило предсказаниям теории стационарной Вселенной. Более того, открытие микроволнового фонового реликтового излучения Пензиасом и Уилсоном в 1965 году тоже свидетельствовало о том, что в прошлом Вселенная была куда плотнее, чем сейчас. Поэтому от теории стационарной Вселенной пришлось отказаться.

Другая попытка избежать вывода о Большом взрыве и, следовательно, о начале времен была предпринята советскими учеными – Евгением Лифшицем и Исааком Халатниковым – в 1963 году. Они предположили, что Большой взрыв – это лишь частная особенность исключительно фридмановских моделей, которые в конце концов являются всего лишь приближенным описанием реальной Вселенной. Быть может, из всех моделей, более или менее похожих на реальную Вселенную, только фридмановские имеют сингулярность Большого взрыва. В моделях Фридмана все галактики разлетаются в точности друг от друга, и потому неудивительно, что в некий момент времени в прошлом они все находились в одном месте. В реальной же Вселенной галактики не удаляются в точности по радиусу друг от друга, у них есть и небольшие поперечные скорости. Поэтому в реальности они не должны были когда-то находиться в одном месте – они могли быть расположены очень близко друг к другу. И тогда, быть может, современная расширяющаяся Вселенная возникла не из сингулярности Большого взрыва, а образовалась после фазы сжатия. При сжатии Вселенной населяющие ее элементарные частицы могли и не столкнуться: они могли только пролететь друг мимо друга, что привело к современному расширению. Откуда тогда мы знаем, что реальная Вселенная возникла из Большого

взрыва? Лифшиц и Халатников исследовали модели Вселенной, близкие к фридмановским, но при этом учли неоднородности и случайные скорости галактик в реальной Вселенной. Они показали: несмотря на то, что галактики теперь не удалялись в точности радиально друг от друга, такие модели все же могли начать свое существование со стадии Большого взрыва, хотя это было возможно только в исключительных случаях – моделях, где галактики двигались строго определенным образом. Лифшиц и Халатников заключили, что, поскольку моделей без сингулярности Большого взрыва, похожих на фридмановские, бесконечно больше, чем моделей с сингулярностью Большого взрыва, мы должны сделать вывод, что в реальности никакого Большого взрыва и не было. Позднее они поняли, что существует гораздо более общий класс «фридманоподобных» моделей с сингулярностями, где галактики не должны двигаться каким бы то ни было специальным образом, и в 1970 году отказались от своей идеи.

Лифшиц и Халатников продемонстрировали, что если общая теория относительности верна, то Вселенная *могла* иметь сингулярность типа Большого взрыва, и в этом состоит ценность их работы. Правда, полученный результат не давал ответа на главный вопрос: следует ли из общей теории относительности, что во Вселенной *должен был произойти* Большой взрыв – начало времен? Ответить на него удалось благодаря совершенно иному подходу, предложенному британским математиком и физиком Роджером Пенроузом в 1965 году. На основании поведения световых конусов в рамках общей теории относительности, а также того постулата, что гравитационная сила – это всегда сила притяжения, он показал, что сжимающаяся (коллапсирующая) под действием собственного тяготения звезда оказывается захваченной в области, поверхность которой рано или поздно схлопывается до нулевых размеров. Поскольку поверхность области схлопывается до нуля, то это верно и в отношении объема. Все вещество звезды оказывается сжатым в области с нулевым объемом, в результате чего плотность вещества и кривизна пространства-времени оказываются бесконечно большими. Другими словами, мы получаем сингулярность внутри области пространства-времени, известную как черная дыра.

На первый взгляд, теория Пенроуза распространялась только на звезды: она не позволяла делать никаких выводов относительно прошлого Вселенной и возможности существования бесконечно плотного объема типа сингулярности Большого взрыва. Когда Пенроуз сформулировал свою теорему, я был аспирантом и отчаянно пытался найти задачу для завершения диссертации. За два года до этого мне поставили диагноз «боковой амиотрофический склероз», известный также как болезнь Лу Герига, или болезнь двигательных нейронов. Врачи отвели мне всего один-два года, и казалось, что в работе над диссертацией нет особого смысла, – мне все равно было не суждено дожить до ее защиты. Но два года прошли, а мое состояние особенно не ухудшилось. Вообще-то дела у меня шли довольно неплохо, и я обручился с очень милой девушкой – Джейн Уайлд. Но чтобы жениться, мне надо было найти работу, а чтобы получить работу, надо было защитить диссертацию.

В 1965 году я прочел о теореме Пенроуза, согласно которой гравитационный коллапс любого тела должен рано или поздно завершиться образованием сингулярности. Я вскоре понял, что если в этой теореме обратить направление времени – чтобы коллапс превратился в расширение, – то условия теоремы останутся в силе, если Вселенная в настоящее время на больших масштабах близка к модели Фридмана. Из теоремы Пенроуза вытекало, что коллапс любой звезды *должен* привести к образованию сингулярности; рассуждения об обращении хода времени приводили к тому, что любая модель расширяющейся Вселенной фридмановского типа *должна* была начаться с сингулярности. Чисто технические обстоятельства теоремы Пенроуза задавали состояние Вселенной: она должна была быть бесконечной в пространстве. Поэтому с помощью этой теоремы я смог доказать неизбежность сингулярности только для Вселенной, которая расширяется достаточно быстро, чтобы ее расширение в будущем не сменилось сжатием (поскольку только такие фридмановские модели имеют бесконечную протяженность в пространстве).

В последовавшие несколько лет я разработал новые математические методы для устранения этого и других технических ограничений в теоремах, настаивающих на неизбежности существования сингулярностей. Окончательный результат был опубликован в нашей совместной с Пенроузом статье в 1970 году – мы наконец доказали непереносимое наличие сингулярности типа сингулярности Большого взрыва только при условии, что общая теория относительности справедлива и что во Вселенной столько вещества, сколько мы наблюдаем. Наша работа встретила серьезное сопротивление, например, со стороны советских ученых – в частности, из-за их марксистской веры в научный детерминизм¹², – а частично и со стороны людей, считавших саму идею сингулярностей отвратительной и извращающей красоту теории Эйнштейна. Но с математическими доказательствами сложно спорить. Так, в конце концов наши выводы стали общепринятыми, и в настоящее время практически все согласны, что Вселенная началась с сингулярности Большого взрыва. А по иронии судьбы, мое мнение изменилось. Теперь я стараюсь убедить других физиков, что на самом деле никакой сингулярности в начале Вселенной не существовало: как мы увидим далее, она может исчезнуть, если учесть квантовые эффекты.

В этой главе мы увидели, как менее чем за полвека изменились представления о космосе, формировавшиеся на протяжении тысячелетий. Открытие Хабблом расширения Вселенной и последовавшее осознание ничтожности нашей планеты, затерявшейся в бескрайних космических глубинах, стали лишь отправной точкой. По мере накопления экспериментальных и теоретических данных становилось все очевиднее, что Вселенная должна была иметь начало во времени. И вот в 1970 году мы с Пенроузом окончательно доказали это, положившись на эйнштейновскую общую теорию относительности. Из нашего доказательства следовало, что общая теория относительности – теория неполная: она не в состоянии описать, как началась Вселенная, поскольку предсказывает, что все физические теории, включая саму себя, перестают действовать в точке зарождения Вселенной. Но общая теория относительности и не претендует ни на что большее, чем роль частной теории. Поэтому реальным следствием теорем сингулярности является следующий вывод: на самом раннем этапе существования Вселенной должен был быть момент, когда она была настолько мала, что нельзя было пренебречь мелкомасштабными эффектами другой великой частной теории XX века – квантовой механики. В начале 70-х годов прошлого века в попытках понять устройство космоса нам пришлось отойти от изучения масштабных объектов и сосредоточить внимание на объектах сверхмалых. Ниже мы расскажем об этой теории – квантовой механике, и только после приступим к обсуждению попыток объединения двух частных теорий в одну – единую квантовую теорию гравитации.

¹² Вера автора в превалирование марксистско-ленинских идей в среде советских ученых совершенно беспочвенна. – *Прим. науч. ред.*

Глава четвертая. Принцип неопределенности

Находясь под впечатлением от успеха научных теорий, а в особенности ньютоновской теории тяготения, французский ученый маркиз де Лаплас в начале XIX века решил, что Вселенная полностью детерминирована. Ученый считал, что должен существовать набор научных законов, с помощью которых мы можем предсказать все, что случится во Вселенной, если только получим полное описание ее состояния на какой-либо момент времени. Например, зная положения и скорости Солнца и планет в некоторый момент времени, мы можем воспользоваться законами Ньютона и вычислить состояние Солнечной системы на любой другой момент времени. В этом случае детерминизм представляется очевидным, но Лаплас пошел дальше и предположил существование аналогичных законов для всего остального, включая поведение человека.

Многие относятся к доктрине научного детерминизма крайне отрицательно, считая, что эта гипотеза ограничивает свободу Бога: Он не может уже управлять Вселенной по своему усмотрению. Но доктрина эта оставалась общепринятой в науке вплоть до начала XX века. Вопрос о необходимости отказа от этого предположения поставили результаты расчетов спектра абсолютно черного тела, выполненные британскими учеными лордом Релеем и сэром Джеймсом Джинсом. В соответствии с ними, раскаленное тело, например звезда, должно излучать энергию в бесконечно высоком темпе. Согласно общепринятым в то время научным законам раскаленное тело должно было излучать электромагнитные волны (радиоволны, видимый свет или рентгеновские лучи) равномерно на всех частотах. Например, раскаленное тело должно излучать одно и то же количество энергии на волнах с частотами от одного до двух миллионов миллионов волн в секунду с такой же интенсивностью, как и на волнах с частотами от двух до трех миллионов миллионов волн в секунду. Поскольку число волн в секунду не ограничено, значит, и совокупная излученная энергия тоже должна быть бесконечной.

Чтобы избежать этого нелепого результата, немецкий ученый Макс Планк в 1900 году предложил такую гипотезу: свет, рентгеновское излучение и другие виды электромагнитных волн могут излучаться не в произвольном количестве, а только дискретными порциями. И эти порции он назвал квантами (фотонами). Более того, каждый квант обладает определенной энергией, которая тем больше, чем выше частота волн. Поэтому на достаточно высоких частотах количество энергии, которое может быть излучено в виде единичного кванта, превышает энергию излучающего тела. Таким образом, энергия излучения на высоких частотах уменьшается, а потому скорость, с которой тело теряет энергию, оказывается конечной.

Квантовая гипотеза позволила замечательным образом объяснить распределение интенсивности излучения нагретых тел, но ее последствия для детерминизма были осознаны лишь в 1926 году, когда другой немецкий ученый, Вернер Гейзенберг, сформулировал свой знаменитый принцип неопределенности. Для предсказания будущих положения и скорости частицы необходимо иметь возможность измерить ее начальное положение и скорость с достаточно высокой точностью. Логично предположить, что сделать это можно, направив на частицу свет. Часть световых волн будет частицей рассеяна, и по этим волнам можно определить положение самой частицы. Но мы не сможем определить положение частицы точнее, чем расстояние между двумя гребнями световой волны. То есть для точного измерения положения частицы необходимо использовать излучение с короткой длиной волны. Но, согласно квантовой гипотезе Планка, мы не можем использовать произвольно малое количество света – придется задействовать как минимум один квант. Этот квант повлияет на частицу, изменив ее скорость непредсказуемым образом. К тому же чем точнее мы захотим измерить положение частицы, тем короче должна быть длина волны света и, следовательно, тем большей энергией должны обладать кванты света. Таким образом, скорость частицы изменится на большую величину.

Другими словами, чем точнее мы пытаемся измерить положение частицы, тем с меньшей точностью определяется ее скорость, и наоборот. Гейзенберг показал, что произведение неопределенности положения частицы на неопределенность ее скорости и на массу частицы в принципе не может быть меньше некоторой фиксированной величины, известной теперь как постоянная Планка. Более того, этот предел никак не зависит ни от способа измерения положения и скорости частицы, ни от типа самой частицы: принцип неопределенности Гейзенберга является фундаментальным, неизбежным свойством мира.

У принципа неопределенности есть очень важные последствия для нашего восприятия мира. Даже спустя семьдесят лет эти последствия до конца не осознаны большинством философов, и по их поводу все еще ведутся дискуссии. Принцип неопределенности объявил мечту Лапласа о полностью детерминированной научной теории и модели Вселенной утопией. Мы, безусловно, не можем в точности предсказать будущие события, если мы не в состоянии даже достаточно точно описать современное состояние Вселенной! Но все же можно представить себе существование набора законов, полностью определяющих развитие событий для некоего сверхъестественного существа, которое способно наблюдать современное состояние Вселенной, не воздействуя на нее. Однако такого рода модели Вселенной не представляют особого интереса для нас, простых смертных. Похоже, что лучше придерживаться принципа экономии, известного как бритва Оккама, и исключить из теории ненаблюдаемые элементы. Исходя из этого подхода в 1920-х годах Вернер Гейзенберг, Эрвин Шрёдингер и Поль Дирак, опираясь на принцип неопределенности, переформулировали ньютоновскую механику, создав новую теорию под названием «квантовая механика». В этой теории в отношении частиц неприменимы понятия четко определенного положения и скорости как отдельных величин. Вместо этого мы имеем дело с квантовым состоянием, которое представляет собой комбинацию положения и скорости.

В общем, квантовая механика не предсказывает единственного, определенного результата наблюдения. Вместо этого она делает прогноз в отношении целого набора возможных исходов и позволяет определить, насколько вероятен каждый из них. То есть в случае выполнения одного и того же измерения для большого количества похожих систем, стартующих с одинакового состояния, окажется, что результат будет в некоторых случаях иметь вид *A*, в других случаях – вид *B*, и т. д. Можно предсказать приблизительное число раз, когда исход эксперимента будет иметь вид *A* или *B*, но не конкретный результат конкретного эксперимента. Таким образом, квантовая механика неизбежно привносит в науку элемент непредсказуемости и случайности. Эйнштейн решительно возражал против такого подхода, несмотря на ту роль, которую сыграл в его появлении, – ведь ему была присуждена Нобелевская премия за вклад в квантовую теорию. Тем не менее он так и не смог примириться с тем, что Вселенная отдана на волю случая, и выразил свой протест крылатой фразой: «Бог не играет в кости». Но большинство ученых охотно приняли квантовую механику именно потому, что ее предсказания прекрасно согласуются с результатами экспериментов. И действительно, квантовая теория оказалась исключительно успешной и лежит в основе практически всей современной науки и техники. Она определяет поведение транзисторов и интегральных микросхем – важнейших деталей телевизоров и компьютеров – и является фундаментом современных химии и биологии. Единственные области физики, где квантовомеханический подход пока еще не реализован в должной мере, – это теория тяготения и теория крупномасштабной структуры Вселенной.

Хотя свет состоит из волн, квантовая гипотеза Планка предсказывает, что в некоторых отношениях он все же ведет себя так, как если бы состоял из частиц: свет может излучаться и поглощаться только дискретными порциями, или квантами. Точно так же из принципа неопределенности Гейзенберга следует, что частицы в некоторых отношениях ведут себя так же, как волны. Как мы уже видели, у них нет четкого положения, они «размазаны» в пространстве в соответствии с неким распределением вероятности. В основе квантовой механики лежит

математический аппарат совершенно нового типа: он не описывает реальный мир как состоящий из объектов, которые можно однозначно отнести к частицам или волнам. В этих терминах описываются только наблюдения мира. Таким образом, в квантовой механике мы имеем дело с корпускулярно-волновым дуализмом: для некоторых задач бывает удобно рассматривать частицы как волны, для других – рассматривать волны как частицы. Одно из важных следствий такого подхода состоит в возможности наблюдения так называемой интерференции двух множеств волн или частиц. То есть гребни одного множества волн могут накладываться на впадины другого. В таком случае два множества волн ослабляют друг друга, а не суммируются, образуя более сильную волну, как можно было ожидать (рис. 4.1). Хорошо всем знакомым примером интерференции света могут служить мыльные пузыри. Явление это возникает при отражении света от двух стенок тонкой мыльной пленки, образующей пузырь. Белый свет состоит из волн разной длины, то есть волн разного цвета. Для волн некоторой длины гребни волн, отраженных от одной из стенок мыльной пленки, накладываются на впадины волн, отраженных от другой стенки пленки. Соответствующие этим длинам волн цвета отсутствуют в отраженном свете, который из-за этого воспринимается не как белый, а как окрашенный.

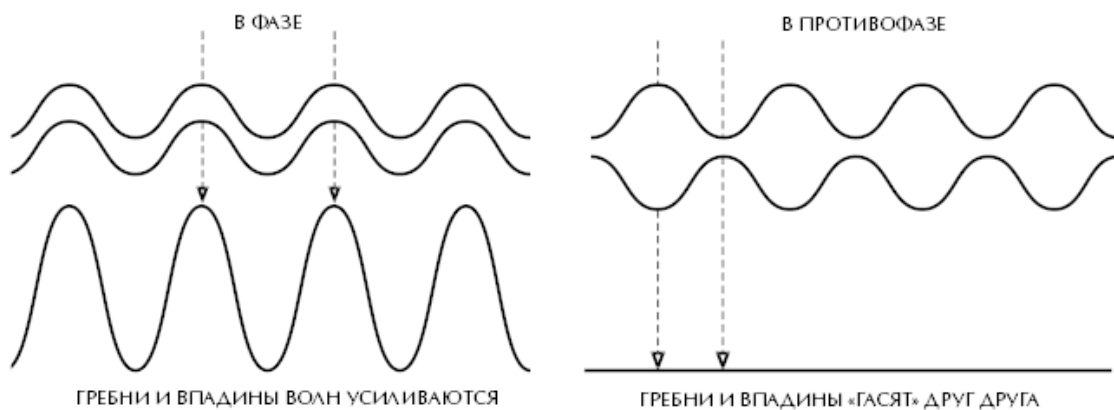


Рис. 4.1

Интерферировать могут и частицы – из-за обусловленного квантовой механикой волнового дуализма. Одним из наиболее известных примеров является так называемый двухщелевой эксперимент (рис. 4.2). Представьте себе перегородку – тонкую стенку – с двумя узкими параллельными щелями. С одной стороны от перегородки разместим источник света определенного цвета (то есть с определенной длиной волны). Большая часть света попадет в перегородку, но небольшое его количество пройдет через щели. Теперь представьте, что вы установили с другой стороны от перегородки экран. На любую точку этого экрана приходит свет из обеих щелей. Но в общем случае пути, которые свет проходит от источника до экрана через щели, отличаются друг от друга. Это означает, что волны, приходящие от двух щелей, окажутся не в фазе, когда они достигнут экрана. В некоторых местах впадины одной волны наложатся на гребни другой, и волны взаимно погасят друг друга, а в других местах гребни двух волн наложатся друг на друга, то же произойдет со впадинами, в результате чего волны усилят друг друга. Таким образом возникает характерный узор чередующихся светлых и темных полос.

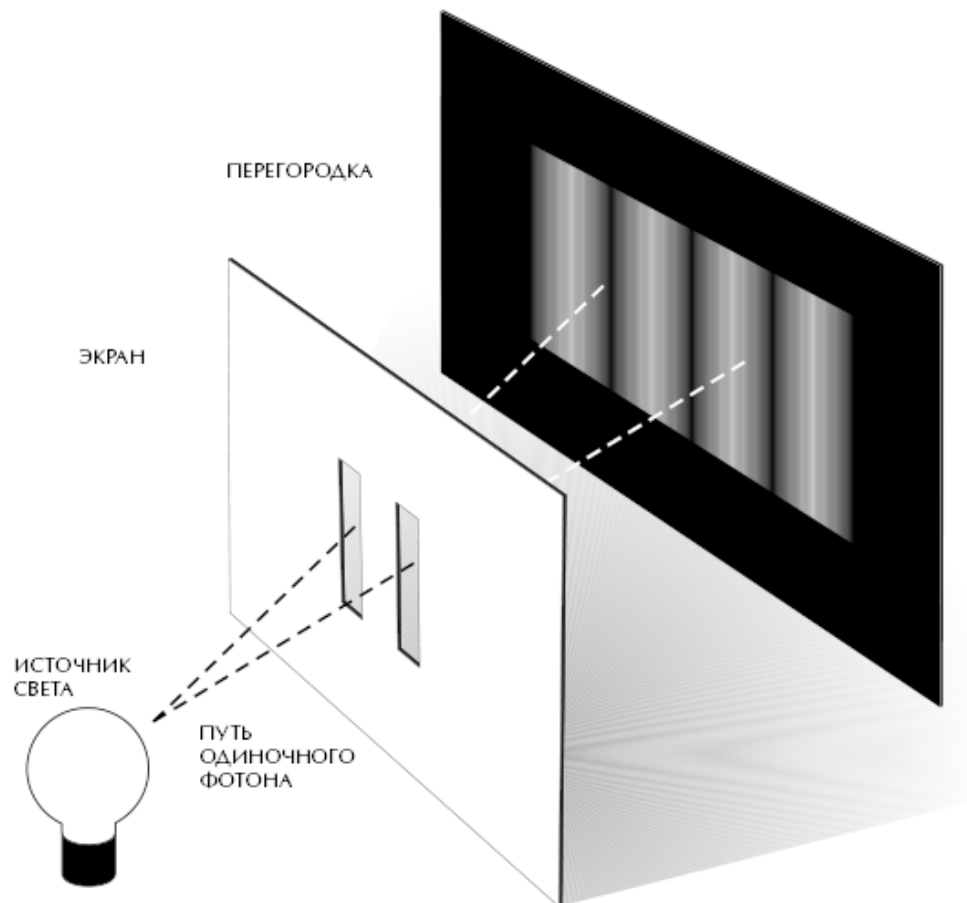


Рис. 4.2

Удивительно, что точно такая же картина из полос наблюдается, если заменить источник света источником потока частиц, например электронов, движущихся с определенной скоростью. (Это означает, что соответствующие им волны имеют определенную длину.) Это особенно неожиданно, если учесть, что если в перегородке только одна щель, никаких полос не наблюдается – электроны равномерно распределяются по экрану. Логично предположить, что если сделать в перегородке вторую щель, то результатом будет простое увеличение числа электронов, попадающих в каждую точку на экране. Но из-за интерференции число электронов в некоторых местах, наоборот, уменьшается. Если отправлять электроны через щели по одному, то естественно было бы ожидать, что каждый электрон пройдет через одну из щелей и распределение электронов за перегородкой будет таким же, как если бы мы имели дело с прохождением электрона через единственную щель – то есть равномерное распределение на экране. Но в реальности интерференционная картина наблюдается, даже если электроны выпускать по одному. Таким образом, каждый электрон должен проходить одновременно через *обе* щели!

Явление интерференции между частицами играет ключевую роль в нашем понимании строения атомов – основных структурных элементов, лежащих в основе химии и биологии, и тех самых «кирпичиков», из которых состоим мы и всё вокруг нас. В начале XX века считалось, что атомы похожи на Солнечную систему, – в них электроны (отрицательно заряженные частицы) обращаются вокруг положительно заряженного ядра в центре. Считалось, что взаимное притяжение положительных и отрицательных электрических зарядов удерживает электроны на их орбитах, подобно тому как гравитационное притяжение между Солнцем и планетами удерживает планеты на их орбитах. Проблема состояла в том, что согласно доквантовым

законам механики и законам электрического взаимодействия электроны должны были потерять свою энергию и, двигаясь по спирали, упасть на ядро. Это означало, что атомы, да и все вещество, должны были быстро сколлапсировать до сверхплотного состояния. В 1913 году датский ученый Нильс Бор предложил частичное решение этой проблемы. Он предположил, что орбиты электронов не могут находиться на произвольном расстоянии от центрального ядра, а только на вполне определенном. Если же допустить, что на каждом из этих расстояний могут находиться орбиты не более двух электронов, то это решает проблему «схлопывания» атома: заполнив орбиты с наименьшими энергиями и расстояниями от ядра, электроны просто не могут подойти к ядру ближе.

Эта модель неплохо объясняла строение простейшего атома – атома водорода, в котором вокруг ядра обращается один-единственный электрон. Но было непонятно, как эту модель распространить на более сложные атомы. К тому же идея об ограниченном наборе допустимых орбит казалась очень уж произвольной. Новая теория квантовой механики справилась с этой трудностью. Эта теория показала, что обращающийся вокруг ядра электрон можно рассматривать как волну, длина которой зависит от его скорости. Длины некоторых орбит равны целому (а не дробному) числу длин волн электрона. У этих орбит после каждого оборота гребни оказываются на том же месте, и такие волны усиливаются. Эти орбиты соответствуют разрешенным орбитам Бора. А вот у орбит, длина которых не равна целому числу длин волн, каждый горб на каком-то обороте электрона окажется погашенным впадиной. Такие орбиты не являются допустимыми.

Американский физик Ричард Фейнман предложил наглядный способ представить корпускулярно-волновой дуализм путем так называемого суммирования по траекториям. Этот подход предполагает, что у частицы не одна-единственная траектория в пространстве-времени, как в случае классической, неклассической теории. Вместо этого считается, что частица движется из точки *A* в точку *B* всеми возможными путями. Каждому пути из *A* в *B* Фейнман поставил в соответствие пару чисел – амплитуду, то есть размах волны, и фазу – положение волны в цикле (гребень или впадина). Вероятность для частицы попасть из *A* в *B* рассчитывается суммированием волн, соответствующих всем траекториям, ведущим из *A* в *B*. В общем случае фазы – то есть положения гребней и впадин волн – близких соседних траекторий сильно различаются. Это значит, что связанные с этими траекториями волны гасят друг друга. Но у некоторых наборов соседних траекторий различия фаз оказываются малыми, и соответствующие этим траекториям волны не гасят друг друга. Такие траектории соответствуют боровским допустимым орбитам.

На основе этих представлений, облеченных в конкретную математическую форму, оказалось довольно нетрудно рассчитать допустимые орбиты для более сложных атомов и даже молекул, состоящих из нескольких атомов, связанных электронами, которые обращаются сразу вокруг нескольких ядер. Поскольку строение молекул и их реакции лежат в основе всей химии и биологии, квантовая механика в принципе позволяет предсказать все происходящее вокруг нас в пределах, установленных принципом неопределенности. (Но на практике расчеты для систем с несколькими электронами оказываются настолько сложными, что не могут быть выполнены [аналитически].)

Общая теория относительности Эйнштейна определяет поведение Вселенной на больших масштабах. Это то, что можно назвать классической теорией, – она не учитывает квантовомеханический принцип неопределенности и поэтому не может быть согласована с другими теориями. Причина же согласия общей теории относительности с наблюдениями состоит в том, что все гравитационные поля, с которыми нам обычно приходится иметь дело, очень слабые. Однако согласно рассмотренным выше теоремам о сингулярностях как минимум в двух ситуациях – в черных дырах и во время Большого взрыва – гравитационное поле должно быть очень сильным. А в условиях таких сильных полей квантовые эффекты должны становиться суще-

ственными. Таким образом, в некотором смысле, предсказав существование точек с бесконечной плотностью, классическая общая теория относительности наметила собственный конец, совсем как классическая (то есть некантовая) механика наметила свой конец через предсказанный ею вывод о неизбежности коллапса атомов до состояния с бесконечной плотностью. У нас пока еще нет полной и непротиворечивой теории, которая бы объединяла общую теорию относительности и квантовую механику, но мы уже знаем некоторые из свойств, которыми такая теория должна обладать. Мы рассмотрим следствия этих свойств для черных дыр и Большого взрыва в последующих главах. А пока вернемся к недавним попыткам объединить наши знания о других силах природы в единую квантовую теорию.

Глава пятая. Элементарные частицы и силы природы

Аристотель считал, что все вещество в мире родилось из четырех стихий: земли, воздуха, огня и воды. Эти стихии подвержены влиянию двух типов сил: тяжести – стремлению земли и воды опускаться – и легкости – стремлению воздуха и огня подниматься. Этот подход, подразделяющий составляющие Вселенной на вещество и силы, используется и в настоящее время.

Аристотель считал вещество непрерывным – то есть «часть» вещества можно делить на все более мелкие фрагменты до бесконечности: мы никогда не дойдем до крупинки, которую нельзя было бы далее разделить. Однако некоторые древнегреческие ученые, такие как Демокрит, считали, что вещество имеет зернистую структуру и что все в мире состоит из большого числа разных атомов. Само слово «атом» в греческом языке означает «неделимый». Этот спор продолжался на протяжении столетий в отсутствие каких бы то ни было реальных свидетельств в пользу той или иной точки зрения, пока в 1803 году британский химик и физик Джон Дальтон не заметил, что факт участия химических веществ в реакциях всегда в четко определенных пропорциях можно объяснить, предположив, что атомы исходных веществ, соединяясь, образуют структуры, названные впоследствии молекулами. Но атомистов окончательно признали правыми в этом противоборстве двух учений лишь в начале XX века. Важную роль при этом сыграло физическое соображение, высказанное Эйнштейном. В своей статье 1905 года, за несколько недель до выхода знаменитой статьи по специальной теории относительности, Эйнштейн обратил внимание на то, что так называемое броуновское движение – беспорядочное случайное движение мелких частиц пылевой взвеси в жидкости – можно объяснить столкновениями атомов жидкости с пылинками.

К этому времени уже появились сомнения в неделимости атомов. За несколько лет до работы Эйнштейна сотрудник колледжа Троицы Кембриджского университета Дж. Дж. Томсон доказал существование частицы вещества, названной электроном, причем его масса была в [две тысячи] раз меньше массы самого легкого из атомов. Томсон использовал установку, напоминающую трубку старомодного телевизора: в ней электроны уходили с докрасна раскаленной металлической нити, а благодаря отрицательному заряду их можно было ускорять электрическим полем в направлении покрытого фосфором экрана. При попадании электронов на экран возникали вспышки света. Вскоре стало ясно, что электроны исходят собственно изнутри атомов, и в 1911 году новозеландский физик Эрнест Резерфорд наконец показал, что атомы вещества имеют внутреннюю структуру: состоят из крохотного положительно заряженного ядра, вокруг которого обращаются несколько электронов. Резерфорд пришел к такому выводу, исследуя, как отклоняются, сталкиваясь с атомами, альфа-частицы – положительно заряженные частицы, испускаемые радиоактивными атомами.

Вначале считалось, что атомное ядро состоит из электронов и разного [для разных атомов] количества положительно заряженных частиц – протонов (от греческого слова, означающего «первый» – предполагалось, что протоны являются фундаментальными объектами, из которых состоит вещество). Но в 1932 году коллега Резерфорда по Кембриджу Джеймс Чедвик открыл, что атомные ядра содержат также и другие частицы почти с такой же массой, как и у протона, но без электрического заряда. Эти частицы получили название «нейтроны». За свое открытие Чедвик получил Нобелевскую премию и был избран главой колледжа Гонвилля и Киза в Кембридже (того самого колледжа, где я сейчас работаю). Впоследствии Чедвик ушел в отставку с этого поста из-за разногласий с научными сотрудниками. Когда группа молодых ученых, вернувшихся с войны, сместила многих старых профессоров с должностей, которые те занимали долгие годы, в колледже возникло ожесточенное противоборство. Это было еще до меня – меня приняли в колледж в 1965 году, уже на излете конфликта, когда из-за похожих

разногласий был вынужден уйти в отставку другой глава колледжа и нобелевский лауреат сэр Невилл Мотт.

Еще 30 лет назад протоны и нейтроны считались «элементарными» частицами, но эксперименты по столкновению протонов и электронов на высоких скоростях показали, что в действительности они состоят из более мелких частиц. Физик из Калифорнийского технологического института Марри Гелл-Манн назвал их кварками и в 1969 году был удостоен Нобелевской премии за свои работы, посвященные этим частицам. Название это происходит из загадочной цитаты из романа Джеймса Джойса: «Три кварка для мастера Марка!»¹³. Вообще слово *quark* («кварк») следует произносить как *quart* («кворт»), но с «к», а не «т» на конце. Однако это слово обычно рифмуют с *lark* («ларк»).

Есть несколько видов кварков – всего шесть «ароматов», называемых нижний, верхний, странный, очарованный, прелестный и истинный. Первые три известны с 60-х годов XX века, очарованный был открыт только в 1974 году, прелестный – в 1977 году, а истинный – в 1995 году. Кварки каждого аромата бывают трех «цветов» – красного, зеленого и синего. (Следует отметить, что эти термины – всего лишь условные обозначения: кварки намного меньше длины волны видимого света и поэтому не имеют цвета в общепринятом смысле. Просто современные физики отличаются более творческим подходом к выбору названий для частиц и явлений и не ограничиваются словами греческого языка!) Протоны и нейтроны состоят из трех кварков, по одному каждого цвета. Протон состоит из двух верхних и одного нижнего кварка, а нейтрон – из двух нижних и одного верхнего. Из других кварков (странных, очарованных, прелестных и истинных) тоже можно составлять частицы, которые, правда, оказываются намного более массивными и быстро распадаются на протоны и нейтроны.

Теперь мы знаем, что ни атомы, ни протоны, ни нейтроны не являются неделимыми. Так что возникает вопрос: что же такое по-настоящему элементарные частицы, из которых, как из кирпичиков, состоит все? Длина волны света намного больше размера атома, и поэтому нельзя надеяться, что мы сможем «рассмотреть» части атомов привычным нам способом. Придется использовать нечто с куда меньшей длиной волны. Как мы выяснили в предыдущей главе, квантовая механика учит, что частицы в действительности представляют собой волны и что чем выше энергия частицы, тем короче длина соответствующей волны. Так что качество ответа на наш вопрос зависит от того, насколько энергичные частицы имеются в нашем распоряжении. Ведь от этого зависит, насколько мелкие длины и размеры мы сможем «разглядеть». Энергии частиц обычно измеряются в единицах под названием «электрон-вольт». (В своих экспериментах с электронами Томсон использовал для ускорения этих частиц электрическое поле. Энергия, приобретаемая электроном в поле с разностью потенциалов в один вольт, – это то, что принимается за 1 электрон-вольт.) В XIX веке, когда из всех энергий частиц люди умели использовать только небольшую долю – на уровне нескольких электрон-вольт, – которую обеспечивали химические реакции вроде горения, атомы считались мельчайшими частицами вещества. В эксперименте Резерфорда энергии альфа-частиц достигали нескольких миллионов электрон-вольт. Потом мы научились с помощью электромагнитных полей разгонять частицы до энергий сначала в миллионы, а потом и миллиарды электрон-вольт. И теперь мы знаем, что считавшиеся 30 лет назад «элементарными» частицы на самом деле состоят из более мелких составляющих. Но не окажется ли так, что по мере продвижения в область еще более высоких энергий в составе этих частиц удастся разглядеть еще более мелкие? Это, разумеется, возможно, но некоторые теоретические соображения позволяют считать, что мы уже подошли вплотную к пониманию фундаментальных структурных элементов природы или даже достигли его.

¹³ Речь идет о цитате из частично переведенного на русский язык романа Джойса «На помине Финнеганов». – Прим. изд.

С точки зрения рассмотренного в предыдущей главе корпускулярно-волнового дуализма все во Вселенной, включая свет и тяготение, можно описать при помощи частиц. У этих частиц есть свойство, называемое спином. Его можно представить себе, сравнив частицы с маленькими волчками, вращающимися вокруг своей оси. Однако такое сравнение может оказаться не очень удачным, потому что согласно квантовой механике у частиц нет четко определенной оси. В действительности спин свидетельствует о том, как частица выглядит с разных сторон. Частица с нулевым спином похожа на точку: она выглядит одинаково, независимо от того, с какой стороны на нее смотреть (рис. 5.1i). Частица со спином 1 напоминает стрелку: она выглядит по-разному с разных направлений (рис. 5.1ii). Чтобы снова увидеть ее такой же, частицу надо повернуть на 360 градусов. Частица со спином 2 похожа на двустороннюю стрелку (рис. 5.1iii): она будет выглядеть так же, если повернуть ее на 180 градусов. Аналогично частицы с большими спинами выглядят так же, если повернуть их на меньшую долю полного оборота. Все это выглядит довольно просто, но у некоторых частиц есть замечательное свойство: они не выглядят такими же, если сделают полный круг, – их надо повернуть на два оборота! Про такие частицы говорят, что их спин равен $1/2$.

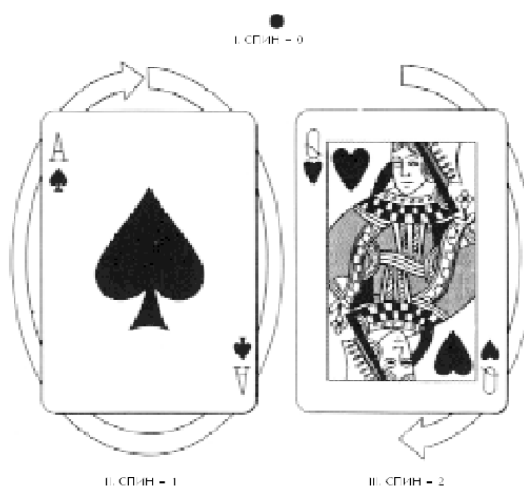


Рис. 5.1

Все известные элементарные частицы во Вселенной можно подразделить на две группы: частицы со спином $1/2$, из которых состоит вещество во Вселенной, и частицы со спином 0, 1 или 2, которые, как мы увидим, порождают силы, действующие между частицами вещества. Частицы вещества подчиняются так называемому принципу запрета Паули. Этот принцип был открыт в 1925 году австрийским физиком Вольфгангом Паули, в 1945 году получившим Нобелевскую премию за это достижение. Он был типичным физиком-теоретиком: о нем говорили, что одно его присутствие в городе плохо влияло на ход экспериментов! Принцип запрета Паули гласит, что две одинаковые частицы не могут пребывать в одном и том же состоянии, то есть в пределах, определяемых принципом неопределенности, они не могут одновременно находиться в одном и том же положении и иметь при этом одинаковые скорости. Принцип запрета имеет чрезвычайно важное значение, поскольку объясняет, почему частицы вещества не коллапсируют в сверхплотное состояние под действием сил, создаваемых частицами со спином 0, 1 или 2: когда частицы вещества оказываются очень близко друг к другу (то есть имеют очень близкие положения), они должны иметь очень разные скорости и, следовательно, не могут долго находиться в одном и том же положении. Если бы в мире не действовал принцип запрета, кварки бы не образовали отдельные друг от друга протоны и нейтроны, а последние вместе

с электронами не могли бы образовывать отдельные друг от друга атомы. Они бы элементарно сколлапсировали, образовав более или менее однородный и густой «суп».

Верное понимание электрона и других частиц со спином $1/2$ пришло только в 1928 году – с теорией, предложенной Полем Дираком, который впоследствии был избран на должность Лукасовского профессора математики в Кембридже (эту должность в свое время занимал Ньютон, а сейчас ее занимаю я). Это была первая теория, совместимая как с квантовой механикой, так и со специальной теорией относительности. Она дает математическое объяснение электрону со спином $1/2$, то есть толкует, почему электрон не выглядит тождественно, если повернуть его на один полный оборот, и почему нужно повернуть его на целых два оборота. Теория Дирака также предсказывала, что у электрона должна быть частица-двойник – антиэлектрон, или позитрон. Открытие позитрона в 1932 году подтвердило теорию Дирака и принесло ему Нобелевскую премию по физике 1933 года. Теперь мы знаем, что у каждой частицы есть своя античастица, и при взаимодействии они могут аннигилировать (взаимно уничтожиться). (Античастицами «переносчиков» взаимодействий являются сами эти частицы.) Из античастиц могут состоять целые антимир и антилюди. Но если вы встретите свою «антисущность», ни в коем случае не пытайтесь пожать друг другу руки! Вы оба исчезнете в сильной вспышке света. Вопрос о том, почему вокруг нас намного больше частиц, чем античастиц, чрезвычайно важен, и я вернусь к нему позже в этой главе.

В квантовой механике считается, что взаимодействия между частицами вещества переносятся частицами с целым спином – 0, 1 или 2. Это означает, что частица вещества, например электрон или кварк, испускает частицу-носитель взаимодействия. Из-за возникающей отдачи скорость частицы вещества меняется. Частица-носитель силы после этого сталкивается с другой частицей вещества и поглощается ею, изменяя тем самым ее скорость, как если бы между двумя частицами вещества действовала сила. Важным свойством частиц-носителей взаимодействия является то, что они не подчиняются принципу запрета. Это значит, что отсутствует предел количеству участвующих в обмене частиц, и поэтому они могут порождать сильное взаимодействие. Однако если частицы-носители взаимодействия имеют большую массу, их будет трудно порождать и трудно обмениваться ими на больших расстояниях. Из-за этого переносимые таким частицами силы окажутся весьма короткодействующими. С другой стороны, если частицы-носители не имеют массы покоя, то соответствующие силы могут быть дальнедействующими. Частицы-носители взаимодействия, которыми обмениваются частицы вещества, называют виртуальными – в отличие от «реальных» их невозможно непосредственно зарегистрировать с помощью детектора частиц. Но мы знаем, что они существуют, поскольку их влияние можно измерить: такие частицы порождают взаимодействия между частицами вещества. При некоторых условиях частицы со спином 0, 1 или 2 существуют и как реальные частицы и могут быть обнаружены непосредственно. В этом случае с точки зрения классической физики они для нас выглядят как волны – например, волны света или гравитационные волны. Иногда они испускаются, когда взаимодействуют частицы вещества, обмениваясь виртуальными частицами-носителями взаимодействия. (Например, сила электрического отталкивания двух электронов является результатом обмена виртуальными фотонами, которые в принципе невозможно непосредственно обнаружить. Но в случае, когда один электрон пролетает мимо другого, возможно излучение реальных фотонов, которые мы воспринимаем как волны света.)

Частицы-носители взаимодействий можно подразделить на четыре категории в зависимости от интенсивности взаимодействия, которое они переносят, и от вида частиц, с которыми они взаимодействуют. Это деление условное и приводится только для удобства построения частных теорий; при этом оно может не отражать объективной реальности. Большинство физиков надеются, что когда-нибудь удастся построить единую теорию, которая объяснит все виды сил как разные аспекты единой силы. И многие считают это главной задачей современной

физики. В последнее время предпринимались успешные попытки объединения трех из четырех видов взаимодействий, и я расскажу о них в этой главе. А вопрос об интеграции четвертого вида взаимодействия – гравитационного – отложим на потом.

Первым делом поговорим о силе тяготения. Это универсальная сила – в том смысле, что любая частица «ощущает» ее воздействие, а восприимчивость к ней зависит от массы или энергии частицы. Тяготение, или гравитация, – самая слабая из всех сил, причем она значительно слабее остальных. Она настолько слаба, что мы бы вообще не замечали ее, если бы не две особенности: во-первых, это дальнодействующая сила, а во-вторых, она всегда работает как сила притяжения. Это значит, что очень слабые гравитационные силы, действующие между частицами в составе двух больших тел, таких, например, как Земля и Солнце, складываются, в результате чего возникает весьма внушительная сила. Остальные три типа сил – либо короткодействующие, либо бывают иногда притягивающими, а иногда отталкивающими, стремясь компенсировать друг друга. При квантовомеханическом взгляде на гравитационное поле, взаимодействие между двумя частицами вещества осуществляется с помощью частиц со спином 2, называемых гравитонами. Эти частицы не имеют собственной массы, и поэтому переносимая ими сила является дальнодействующей. Гравитационное взаимодействие между Солнцем и Землей рассматривается как результат обмена гравитонами между частицами, составляющими эти два тела. Хотя участвуют в обмене виртуальные частицы, они порождают измеримый эффект, заставляя Землю обращаться вокруг Солнца! Реальные гравитоны образуют то, что классические физики называли бы гравитационными волнами. Они чрезвычайно слабы – их так трудно обнаружить, что никому до сих пор это не удалось¹⁴.

Обратимся теперь к электромагнитной силе, которая действует на электрически заряженные частицы, такие как электроны и кварки, но не действует на нейтральные частицы вроде гравитонов. Она куда сильнее гравитации: сила электромагнитного взаимодействия двух электронов примерно в миллион миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов (единица с сорока двумя нулями) раз больше силы гравитационного взаимодействия этих частиц. Но электрические заряды бывают двух видов – положительные и отрицательные. При этом два положительных – так же, как и два отрицательных – заряда отталкиваются, а положительный и отрицательный заряды притягиваются друг к другу. В крупном теле вроде Земли или Солнца количество положительных зарядов примерно равно количеству отрицательных; в результате силы отталкивания и притяжения между отдельными частицами взаимно почти уравниваются и суммарная электромагнитная сила оказывается очень малой. Но на малых – атомных и молекулярных – масштабах электромагнитные силы преобладают. Сила электромагнитного притяжения между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженными протонами атомного ядра удерживает электроны на орбитах вокруг атомного ядра, совсем как сила гравитационного притяжения удерживает Землю на орбите вокруг Солнца. Сила электромагнитного притяжения представляется как результат обмена большим количеством не имеющих массы частиц со спином 1 – фотонов. Как и в предыдущем случае, участвующие во взаимодействии фотоны являются виртуальными частицами. Но переход электрона с одной допустимой орбиты на другую, расположенную ближе к ядру, сопровождается выделением энергии и излучением реального фотона, который можно наблюдать человеческим глазом как видимый свет – если длина его волны попадает в соответствующий диапазон, – или зарегистрировать другим фотодетектором, например фотопленкой. Точно так же при столкновении реального фотона с атомом электрон, движущийся по расположенной

¹⁴ Об экспериментальном открытии гравитационных волн коллаборациями *LIGO* и *VIRGO* было объявлено 11 февраля 2016 года. 14 сентября 2015 года был зарегистрирован сигнал слияния двух черных дыр двумя детекторами *LIGO* в Хэнфорде и Ливингстоне. В 2017 году за создание детектора гравитационных волн и экспериментальное доказательство их существования трем американским физикам – Райнеру Вайсу, Кипу Торну и Барри Бэрришу – была присуждена Нобелевская премия по физике. – *Прим. перев.*

вблизи ядра орбите, может оказаться выбитым на более далекую орбиту. Электрон использует энергию фотона, и поэтому сам фотон поглощается.

Третья категория сил называется слабым ядерным взаимодействием, которое отвечает за радиоактивный распад атомных ядер и действует на все частицы вещества со спином $\frac{1}{2}$, но не действует на частицы со спином 0, 1 или 2, такие как фотоны и гравитоны. Механизм слабого ядерного взаимодействия оставался не в полной мере понятным до 1967 года, когда Абдус Салам из Имперского колледжа Лондона и Стивен Вайнберг из Гарвардского университета разработали теорию, объединившую слабое и электромагнитное взаимодействия – как за сто лет до того Максвелл объединил электричество и магнетизм. Салам и Вайнберг предположили, что кроме фотонов имеются еще и другие частицы со спином 1 – так называемые массивные векторные бозоны, – которые служат носителями слабого взаимодействия. Эти частицы обозначаются как W^+ (W -плюс), W^- (W -минус) и Z^0 (Z -ноль), каждая имеет массу около 100 ГэВ (ГэВ – гигаэлектронвольт, или одна тысяча миллионов электрон-вольт). Теория Вайнберга – Салама обладает свойством спонтанного нарушения симметрии. Это значит, что целый ряд частиц, которые кажутся совершенно разными при низких энергиях, фактически являются одним и тем же видом частиц, но находятся в разных состояниях. При высоких энергиях все эти частицы ведут себя одинаково. Это можно сравнить с поведением шарика при игре в рулетку. При высоких энергиях (пока колесо рулетки крутится быстро) шарик ведет себя однообразно – просто катится по кругу. Но по мере замедления колеса энергия шарика уменьшается, и в какой-то момент он попадает в одно из тридцати семи углублений на колесе. Другими словами, при низких энергиях шарик может пребывать в одном из 37 различных состояний. Если по какой-то причине мы наблюдаем шарик только при низких энергиях, то создается впечатление, что мы имеем дело с 37 типами шариков!

В теории Вайнберга – Салама, при энергиях куда выше 100 ГэВ, три новые частицы и фотон ведут себя одинаково. Но при более низких энергиях, с которыми мы имеем дело в обычных ситуациях, симметрия между частицами нарушается. W^+ , W^- и Z^0 -частицы приобретают большие массы, и соответствующие им силы становятся очень короткодействующими. Когда Салам и Вайнберг предложили свою теорию, мало кто поверил им, а мощность ускорителей частиц на тот момент была недостаточной и не позволяла достичь энергий в 100 ГэВ, необходимых для порождения реальных бозонов W^+ , W^- и Z^0 . Однако в последующие десять лет оказалось, что другие предсказания теории на низких энергиях настолько хорошо согласуются с экспериментальными данными, что в 1979 году Саламу, Вайнбергу и Шелдону Глэшоу, еще одному ученому из Гарвардского университета, создавшему аналогичную общую теоретическую основу для электромагнитного и слабого ядерного взаимодействий, была присуждена Нобелевская премия по физике. Нобелевскому комитету не пришлось краснеть за возможную ошибку, и это стало окончательно ясно в 1983 году. Тогда в Европейском центре ядерных исследований (фр. *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN)*; рус. ЦЕРН) были открыты три массивных партнера фотона с правильно предсказанными массами и другими свойствами. Карло Руббиа, руководитель совершившей открытие группы из нескольких сотен физиков, в 1984 году был удостоен Нобелевской премии – совместно с Симоном ван дер Меером, инженером ЦЕРНа, разработавшим систему хранения антивещества, использованную в экспериментах. (В наше время добиться признания в экспериментальной физике очень нелегко, для этого нужно быть лучшим из лучших!)

Четвертый тип взаимодействия – сильное ядерное взаимодействие. Благодаря ему внутри протонов и нейтронов удерживаются кварки, а протоны и нейтроны – внутри атомного ядра. Носителем этого взаимодействия считается частица со спином 1 под названием глюон, которая взаимодействует только с такими же частицами и с кварками. Сильное ядерное взаимодей-

ствие обладает удивительным свойством – так называемым конфайнментом¹⁵. Это означает, что удерживаемые вместе частицы всегда имеют нулевой суммарный цветовой заряд. Невозможно получить отдельный кварк, потому что у него был бы какой-либо определенный цвет (красный, зеленый или синий). Вместо этого красный кварк должен объединяться с зеленым и синим посредством «струны» из глюонов (красный + зеленый + синий = белый). Такого рода триплет образует протон или нейтрон. Другая возможная комбинация – это пара, состоящая из кварка и антикварка (красный + антикрасный / зеленый + антизеленый / синий + антисиний = белый). Из таких комбинаций состоят частицы, называемые мезонами, которые неустойчивы, потому что кварк и антикварк могут взаимно аннигилироваться, в результате чего образуются электроны и другие частицы. Аналогично конфайнмент не допускает существования отдельного глюона, потому что глюоны также имеют цветовой заряд. Вместо этого приходится иметь дело с комбинациями глюонов с суммарным белым цветовым зарядом. Такая комбинация образует неустойчивую частицу, получившую название глюоний.

¹⁵ От англ. *confine* – ограничивать, держать взаперти, удерживать. – Прим. изд.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.