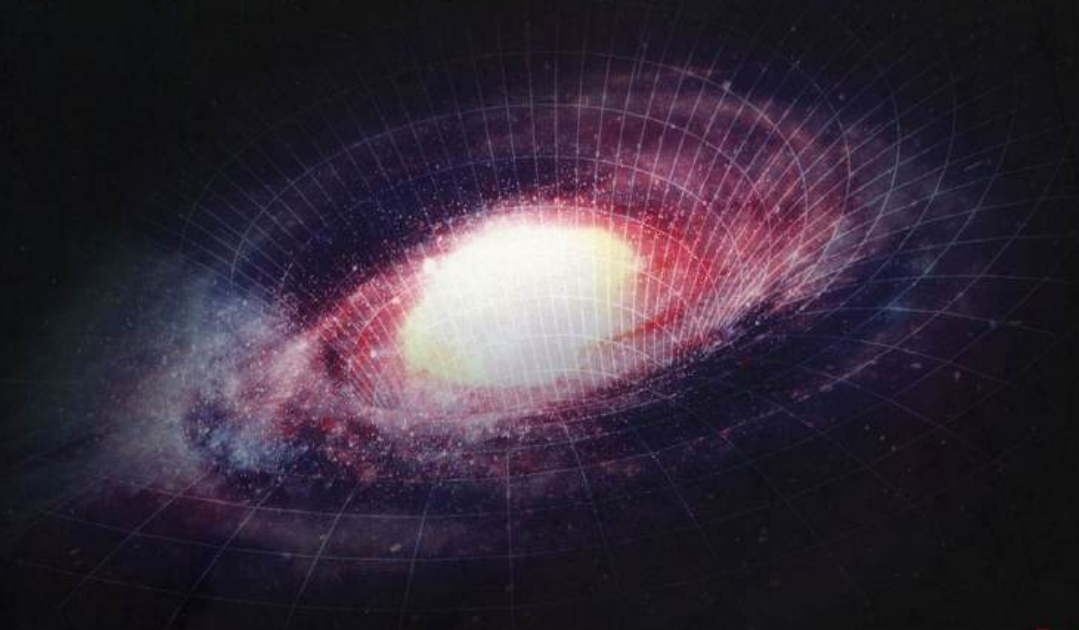


СТИВЕН ХОКИНГ



О ВСЕЛЕННОЙ В ДВУХ СЛОВАХ

КРАЕУГОЛЬНЫЕ КАМНИ И ОСТРЫЕ УГЛЫ
НАУКИ О МАКРОКОСМОСЕ



МИР
СТИВЕНА
ХОКИНГА

STEPHEN HAWKING

THE UNIVERSE IN A NUTSHELL



СТИВЕН ХОКИНГ

О ВСЕЛЕННОЙ В ДВУХ СЛОВАХ



ОГИЗ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ
МОСКВА

УДК 524.8
ББК 22.68
Х70

Перевод оригинального издания:

Stephen Hawking
The Universe in a Nutshell

*Печатается с разрешения автора при содействии литературных агентств
Writers House LLC и Synopsis Literary Agency.*

*Все права защищены. Любое использование материалов данной книги,
полностью или частично, без разрешения правообладателя запрещается.*

Хокинг, Стивен

Х70 О Вселенной в двух словах / С. Хокинг; пер. с англ. А.М. Бродоцкой:
под ред. А.М. Краси́льщикова. — Москва: АСТ, 2021. — 224 с.: ил. —
(Мир Стивена Хокинга).

ISBN 978-5-17-102307-2 (ООО «Издательство АСТ»)

Стремительный прогресс в области технологий и новые знания об устройстве видимого и невидимого мира заставляют физиков-теоретиков искать новые объяснения установившемуся порядку вещей. И наиболее интригующими остаются рассуждения о пространстве и времени.

С момента публикации мирового бестселлера «Краткая история времени» профессор Стивен Хокинг внимательно следил за развитием астрофизики, пока наконец не назрела необходимость ввести широкую публику в курс того, что изменилось на переднем крае науки. Тем временем мы вплотную приблизились к пониманию природы Вселенной во всей ее сложности. В захватывающем диалоге с читателем, используя доступные для каждого формулировки, автор раскрывает суть квантовой механики, путешествий во времени, черных дыр и теории относительности. Центральное место Стивен Хокинг по традиции отводит теории всего — как мы, обыватели, привыкли ее называть, — или единой теории поля, Святому Граалю современной физики.

УДК 524.8
ББК 22.68

ISBN 978978-5-17-102307-2

© Stephen Hawking, 2001
© ООО «Издательство АСТ», 2021 (перевод на русский язык)

СОДЕРЖНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ — стр. 7

ГЛАВА 1 — стр. 11

Краткая история теории относительности

Как Эйнштейн заложил основы двух фундаментальных теорий XX века —
общей теории относительности и квантовой механики.

ГЛАВА 2 — стр. 37

Форма времени

Общая теория относительности Эйнштейна придает времени форму.

Как привести это в соответствие с квантовой теорией?

ГЛАВА 3 — стр. 75

О Вселенной в двух словах

У Вселенной множество историй, но каждую можно расколоть, как орешек, и пересказать в двух словах.

ГЛАВА 4 — стр. 109

Как предсказать будущее

Почему черные дыры, поглощая информацию, мешают нам предсказывать будущее.

ГЛАВА 5 — стр. 139

Как защитить прошлое

Возможны ли путешествия во времени?

Может ли развитая цивилизация вернуться в прошлое и изменить его?

ГЛАВА 6 — стр. 163

Наше будущее. Звездный путь или что-то другое?

Как биологическая и электронная жизнь будет усложняться все быстрее и быстрее

ГЛАВА 7 — стр. 181

Браны: новый взгляд на новый мир

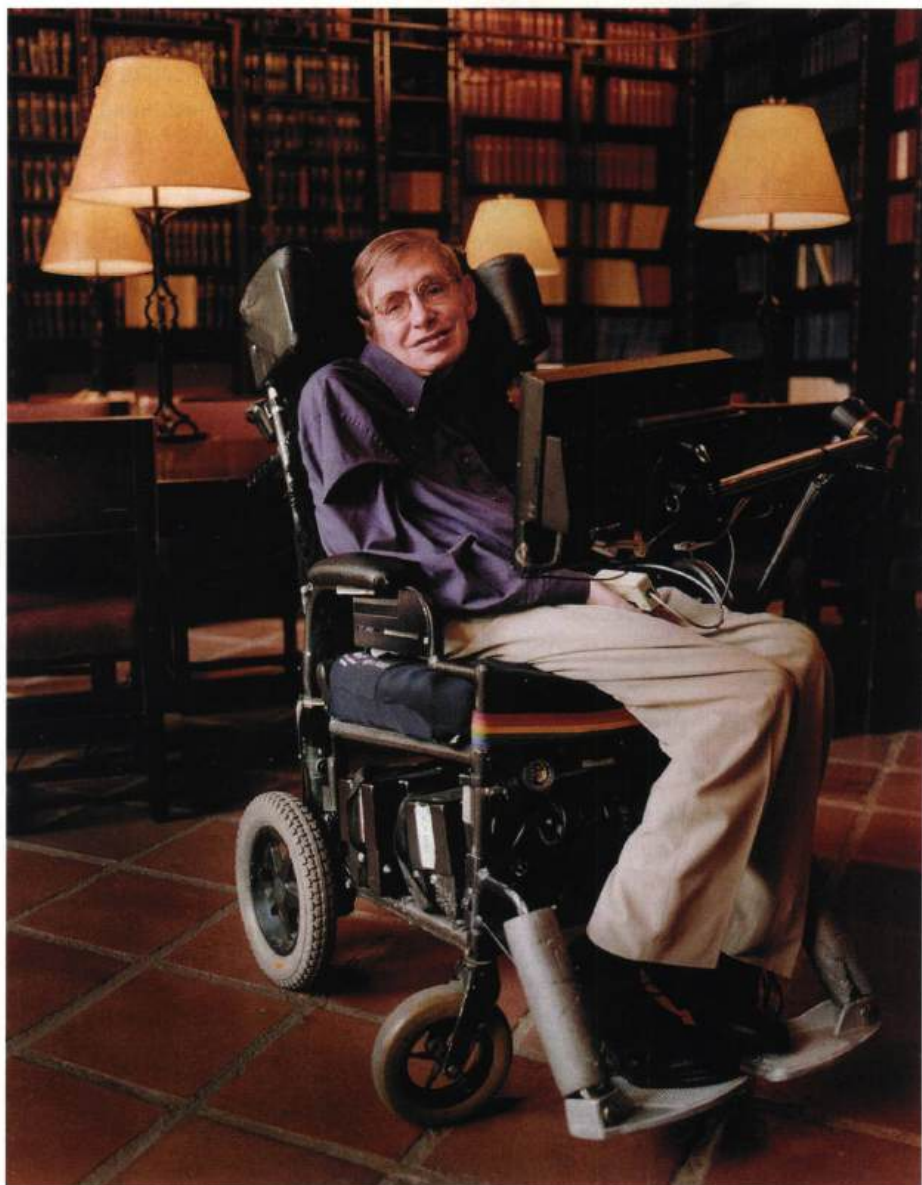
Неужели мы живем на бране? А вдруг мы просто голограммы?

ГЛОССАРИЙ — стр. 211

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА — стр. 219

МЕНЕЕ ПОПУЛЯРНАЯ ЛИТЕРАТУРА — стр. 220

ИСТОЧНИКИ ИЛЛЮСТРАЦИЙ — стр. 221





ПРЕДИСЛОВИЕ

Я НЕ ОЖИДАЛ, что моя научно-популярная книга «Краткая история времени» будет иметь такой успех. Она продержалась в списке бестселлеров *London Sunday Times* больше четырех лет, то есть дольше всех прочих книг, что удивительно для научно-популярной работы, которая не так-то легко читается. После этого меня все спрашивали, не собираюсь ли я писать продолжение. Я сопротивлялся этой идее, поскольку не хотел писать «Сына Краткой истории» или «Удлиненную историю времени» и к тому же был занят научными исследованиями. Но потом я понял, что могу написать другую книгу — вероятно, более простую и понятную. Структура «Краткой истории времени» была линейной, и главы обычно продолжали друг друга, образовывали логическую последовательность. Многим читателям это нравилось, однако некоторые увязли в первых главах и так и не добрались до более интересного материала, расположенного ближе к концу. В отличие от первой, эта книга устроена иначе, она похожа на дерево: главы 1 и 2 — это основной ствол, от которого ответвляются остальные главы.

Ветви почти не зависят друг от друга, и осваивать их можно в любом порядке после основного ствола. Они соответствуют областям науки, в которых я работал или о которых думал уже после выхода в свет «Краткой истории времени». То есть книга показывает, в каких именно областях исследования идут сегодня активнее всего. Я постарался уйти от линейной структуры и в пределах каждой главы в отдельности. Как и в иллюстрированном переиздании «Краткой истории времени», которое вышло в 1996 году, рисунки и подписи к ним помогают по-новому взглянуть на то, что сказано в тексте, а врезки и рамки дают возможность разобраться в некоторых вопросах подробнее, чем позволяет основной текст.

В 1988 году, когда вышло первое издание «Краткой истории времени», казалось, что до «Теории Всего» буквально рукой подать. Как

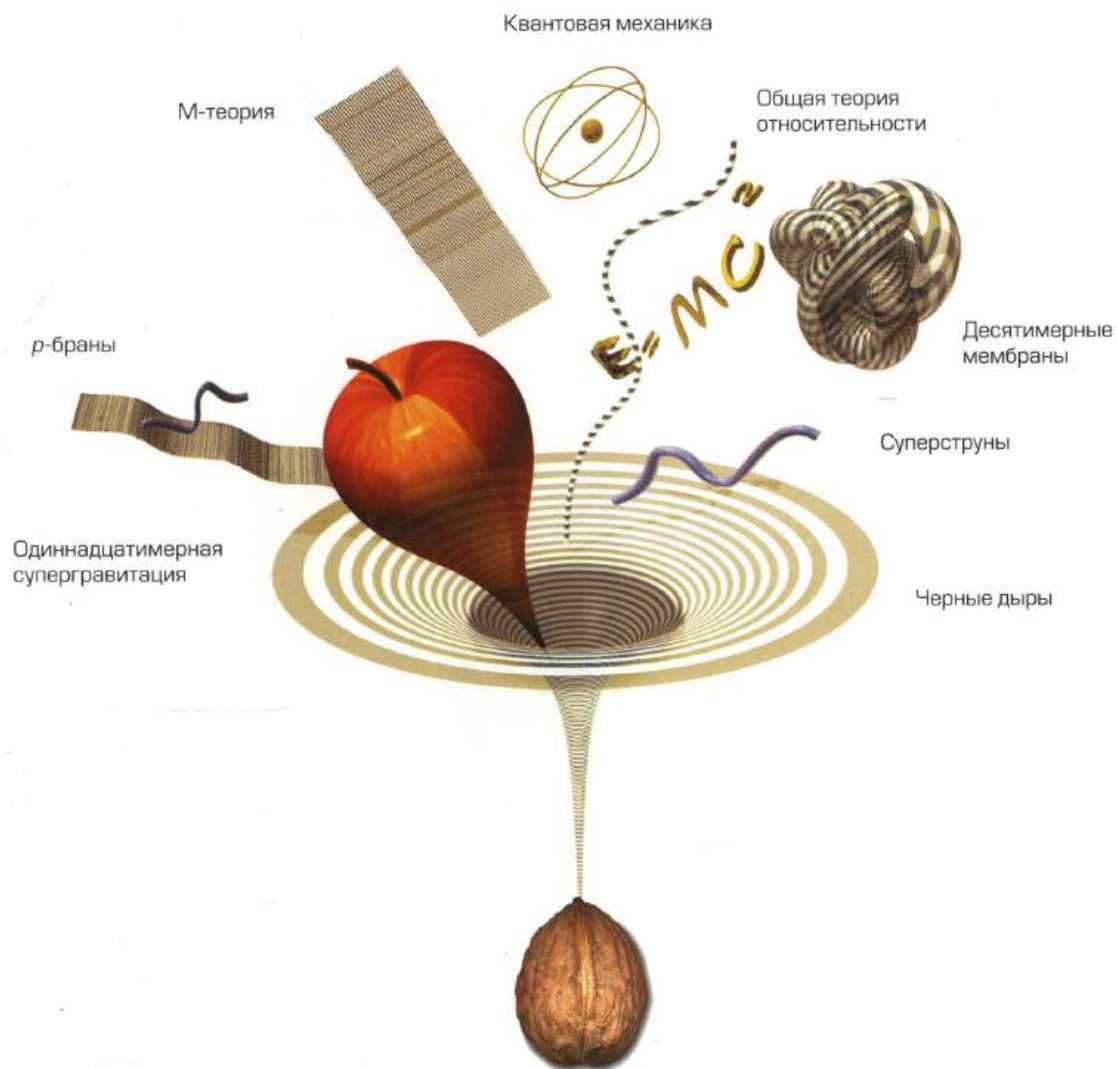


изменилось положение дел? Приблизились ли мы к цели? Как сказано в этой книге, мы прошли с тех пор долгий путь. Но он еще далеко не завершен, и конечная цель пока не видна. Однако, как гласит народная мудрость, идти и надеяться приятнее, чем окончательно прийти. Когда мы стремимся к открытиям, это улучшает наши творческие способности, причем не только в науке, а во всех областях. Если бы мы достигли конечной точки, дух человеческий зачах бы и угас. Но я сомневаюсь, что мы когда-нибудь остановимся: если исследования и не станут глубже, их сложность неизбежно возрастет, и мы всегда будем в самом центре расширяющегося горизонта возможностей.

Я радуюсь сделанным открытиям и складывающейся картине реальности и хочу поделиться этой радостью с читателями. Чтобы усилить ощущение сопричастности, я сосредоточился на областях, в которых работал сам. Технические подробности моих исследований очень сложны, но я уверен, что основные идеи вполне можно передать без особой математической нагрузки. Уповаю на то, что у меня это получилось.

В работе над этой книгой мне много помогали. Особенно я хотел бы упомянуть Томаса Хертога и Нила Шерера, которые помогали мне с рисунками, подписями к ним и рамками, Энн Харрис и Китти Фергюсон, которые редактировали рукопись (точнее, компьютерные файлы, я же пишу все в электронном виде), и Филипа Данна из *Book Laboratory* и *Moonrunner Design*, которые подготовили иллюстрации. Но помимо этого я хочу поблагодарить всех тех, кто обеспечивает мне возможность вести относительно нормальную жизнь и заниматься наукой. Без них я не написал бы эту книгу.

Стивен Хокинг,
Кембридж, 2 мая 2001 года



ГЛАВА 1

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

*Как Эйнштейн заложил основы двух фундаментальных теорий
XX века — общей теории относительности и квантовой механики.*



Professor Einstein



Альберт Эйнштейн™

low



A. Einstein

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН, АВТОР СПЕЦИАЛЬНОЙ И ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ, РОДИЛСЯ В 1879 ГОДУ В ГЕРМАНИИ, В ГОРОДЕ УЛЬМЕ, но через год семья переехала в Мюнхен, где отец Эйнштейна Герман и дядя Якоб основали небольшую и не слишком процветающую фирму по торговле электрическим оборудованием. В детстве Альберт не подавал особых надежд, однако слухи, что он плохо учился в школе, похоже, все-таки преувеличены. В 1894 году отцовская фирма прогорела, и семья переехала в Милан. Родители решили, что Альберт должен остаться в Мюнхене и окончить школу, но такой деспотизм ему не понравился, и не прошло и нескольких месяцев, как он бросил школу и приехал к родителям в Милан. Позднее Эйнштейн завершил образование в Цюрихе — в 1900 году он окончил престижный Политехникум (Высшую техническую школу). По натуре Альберт был спорщик и не признавал авторитетов, поэтому не снискал особой любви преподавателей в Политехникуме, и ему не предложили остаться там в качестве ассистента, что стало бы началом научной карьеры. Через два года Альберт все же получил небольшую должность в Швейцарском патентном бюро в Берне. И в этой должности в 1905 году он написал три статьи, которые сделали его одним из самых выдающихся ученых современности и положили начало сразу двум понятийным революциям — революциям, которые изменили наше представление о времени, пространстве и реальности как таковой.

К концу XIX века ученые были убеждены, что вот-вот сумеют полностью описать Вселенную. Они предполагали, что пространство заполнено средой под названием «эфир». Считалось, будто световые лучи и радиосигналы — это волны в эфире, подобно тому как звук — это волны сжатия в воздухе. Для завершения теории не хватало самой малости: точно измерить упругость эфира. Более того, когда в Гарвардском университете строили Лабораторию имени Джефферсона, ее нарочно сделали без единого железного гвоздя, чтобы в перспективе можно было проводить точные магнитометрические исследования. Правда, архитекторы забыли, что красно-коричневые кирпичи, из которых выстроено и здание лаборатории,



Albert Einstein™

Альберт Эйнштейн в 1920 году.

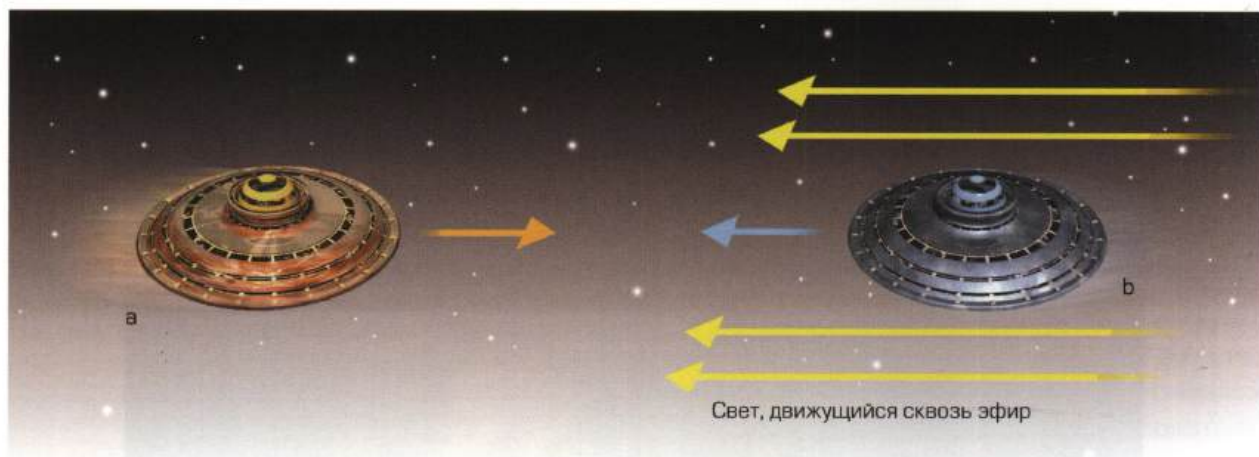


Рис. 1.1. (вверху)
ТЕОРИЯ НЕПОДВИЖНОГО
ЭФИРА

Если бы свет был волной в упругой среде под названием эфир, скорость света казалась бы больше скорости космического корабля, летящего навстречу потоку света (а), и меньше скорости космического корабля, летящего в том же направлении, что и поток света (б).

Рис. 1.2 (справа)
Не выявлено никакой разницы между скоростью света в направлении орбиты Земли и перпендикулярно ей.

и почти весь Гарвард, содержат много железа. Зданием пользуются до сих пор, хотя в Гарварде и сейчас не уверены, достаточно ли прочен пол библиотеки, построенный без железных гвоздей.

Но к концу века в концепции вездесущего эфира обнаружились противоречия. Ожидалось, что свет проходит сквозь эфир с постоянной скоростью, но если двигаться сквозь эфир в том же направлении, что и свет, его скорость покажется меньше, а если двигаться в противоположном направлении — больше (рис. 1.1).

Однако проведенные эксперименты эту гипотезу не подтвердили. Самым тщательным и точным был эксперимент Альберта Майкельсона и Эдварда Морли из Школы прикладной науки им. Кейза в Кливленде, штат Огайо. В 1887 году Майкельсон и Морли сравнили скорости двух лучей света, перпендикулярных друг другу. Земля вращается вокруг своей оси и движется по орбите вокруг Солнца, поэтому измерительный прибор движется сквозь эфир с разной скоростью и в разном направлении (рис. 1.2). Однако Майкельсон и Морли не обнаружили никакой разницы скоростей у двух лучей света — она не накопилась ни за день, ни за год. Как будто свет всегда двигался с одной и той же скоростью относительно наблюдателя, в каком бы направлении и с какой бы скоростью этот наблюдатель ни двигался (рис. 1.3).

На основании эксперимента Майкельсона–Морли ирландский физик Джордж Фицджеральд и голландский физик Хендрик Лоренц предположили, что тела, движущиеся сквозь эфир, сжимаются, а часы замедляются. Сжатие и замедление часов таково, что скорость

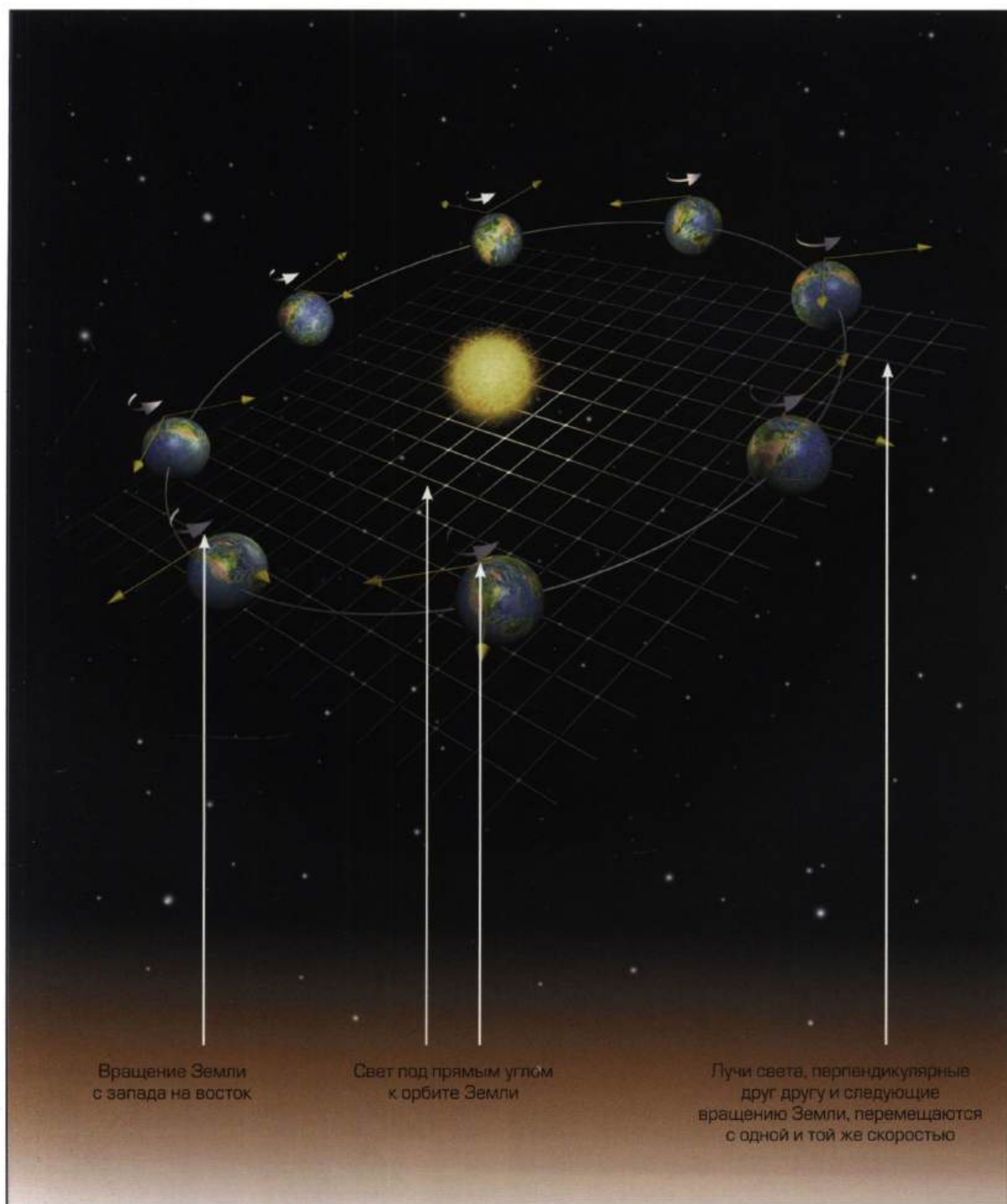
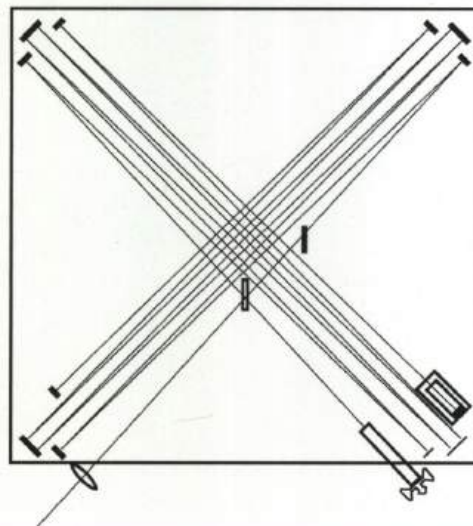


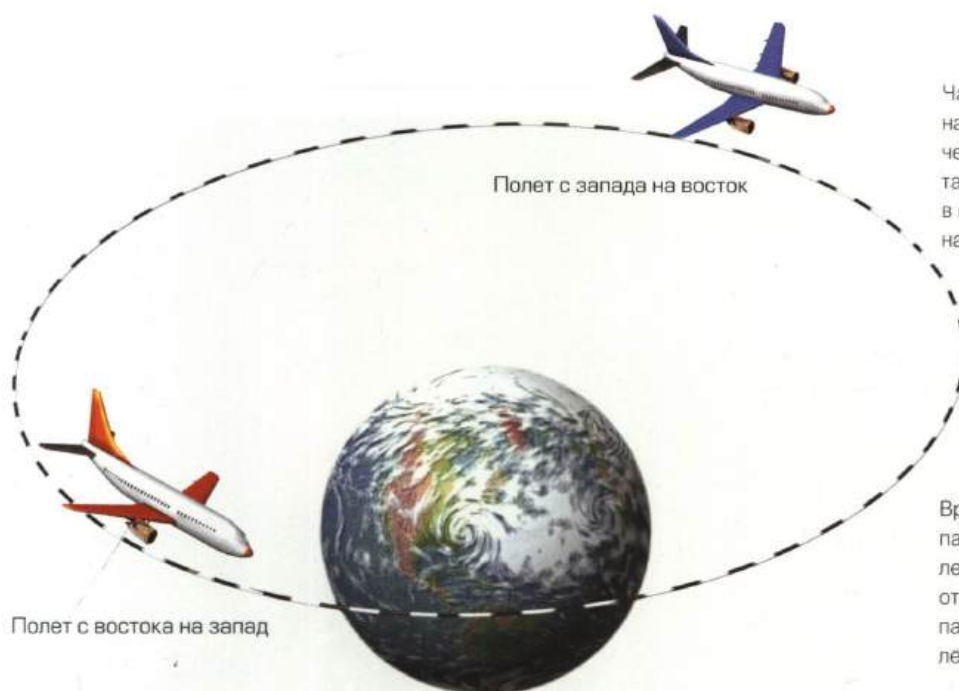


Рис. 1.3. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

В интерферометре Майкельсона–Морли свет из источника расщепляется на два луча при помощи полупрозрачного зеркала. Два луча направлены перпендикулярно друг другу, а затем при помощи другого полупрозрачного зеркала сводятся в один. Если бы свет распространялся в разные стороны с разной скоростью, это привело бы к тому, что максимумы световой волны первого луча прибывали бы в конечную точку в тот же момент, что минимумы световой волны второго луча, и эти волны гасили бы друг друга.

Справа: схема эксперимента, реконструированная по рисунку в журнале *Scientific American* (1887 г.).





Часы в самолете, летящем на запад, показывают больше, чем точно такие же часы в точно таком же самолете, летящем в противоположном направлении.

Время с точки зрения пассажиров самолета, летящего на восток, отстает от времени с точки зрения пассажиров самолета, летящего на запад.

света всегда будет одной и той же с точки зрения любого наблюдателя, в каком бы направлении относительно эфира он ни двигался (и Фицджеральд, и Лоренц были убеждены в существовании эфира). Однако Эйнштейн в статье, написанной в июне 1905 года, указал, что если наблюдатель не может определить, движется он или нет, то идея эфира избыточна. Эйнштейн исходил из утверждения, что законы физики должны оставаться одинаковыми для всех свободно движущихся наблюдателей. В частности, одинаковой для всех должна быть и измеряемая скорость света, независимо от скорости движения самих наблюдателей. Скорость света не зависит от их движения и одинакова во всех направлениях.

Для этого нужно было отказаться от представления об универсальном времени, которое измеряют все часы. Время же у каждого свое. Время у двух человек совпадает, если они оба находятся в покое относительно друг друга, и не совпадает, если они движутся.

Это было подтверждено целым рядом экспериментов, в число которых входит опыт с двумя точными часами, которые облетают вокруг света в противоположном направлении и по возвращении показывают немного разное время (рис. 1.4). То есть если хочешь прожить дольше, надо стараться лететь на восток, чтобы скорость самолета складывалась со скоростью вращения Земли. Впрочем, вы-

Рис. 1.4.

Одна из версий парадокса близнецов (рис. 1.5) проверена экспериментально: одинаковые точные часы облетели вокруг планеты в противоположных направлениях.

Когда их сравнили после полета, оказалось, что часы, летевшие на восток, немного отстали.



Рис. 1.5 (слева)
ПАРАДОКС БЛИЗНЕЦОВ

Согласно теории относительности, каждый наблюдатель измеряет время по-своему. Из этого следует так называемый парадокс близнецов.

Один из пары близнецов (а) отправляется в космос и путешествует со скоростью, близкой к скорости света (c), а его брат (b) остается на Земле.

Из-за движения (а) время в космическом корабле идет медленнее, чем с точки зрения оставшегося на Земле близнеца. Так что по возвращении космический путешественник (a2) обнаружит, что его брат (b2) теперь старше его самого.

На первый взгляд это противоречит здравому смыслу, однако целый ряд экспериментов показал, что при таком сценарии близнец-путешественник и в самом деле окажется моложе.

Рис. 1.6 (справа)

Космический корабль проходит мимо Земли слева направо со скоростью в четыре пятых скорости света. С одного конца кабины испускается импульс света и отражается на другом конце (а). Свет видят люди на Земле и на корабле. Из-за движения корабля люди на Земле и на корабле делают разные выводы о том, какое расстояние прошел свет до отражения (b). Следовательно, они должны сделать разные выводы и о том, за какое время свет прошел это расстояние, поскольку, согласно постулату Эйнштейна, скорость света одинакова для всех свободно движущихся наблюдателей.



года в микроскопическую долю секунды с лихвой компенсируется вредной самолетной елойд.

Постулат Эйнштейна о том, что все законы природы должны быть одинаковы для всех свободно движущихся наблюдателей, лег в основу теории относительности, названной так, поскольку она предполагает, что какую-то роль играет лишь относительное движение. Красота и простота теории относительности убедили многих мыслителей, однако у нее нашлись и противники. Эйнштейн опроверг две нерушимые аксиомы XIX века — аксиому об абсолютном покое, примером которого служил эфир, и аксиому об универсальном времени, которое измеряют все часы. Это многим пришлось не по душе. Они спрашивали, не следует ли из теории Эйнштейна, что все относительно и на свете нет даже абсолютных нравственных стандартов. Сомнения в теории относительности не ослабевали ни в двадцатые, ни в тридцатые годы. В 1921 году Эйнштейн получил Нобелевскую премию по физике — за другую, тоже важную, но (по меркам самого Эйнштейна) не такую значительную

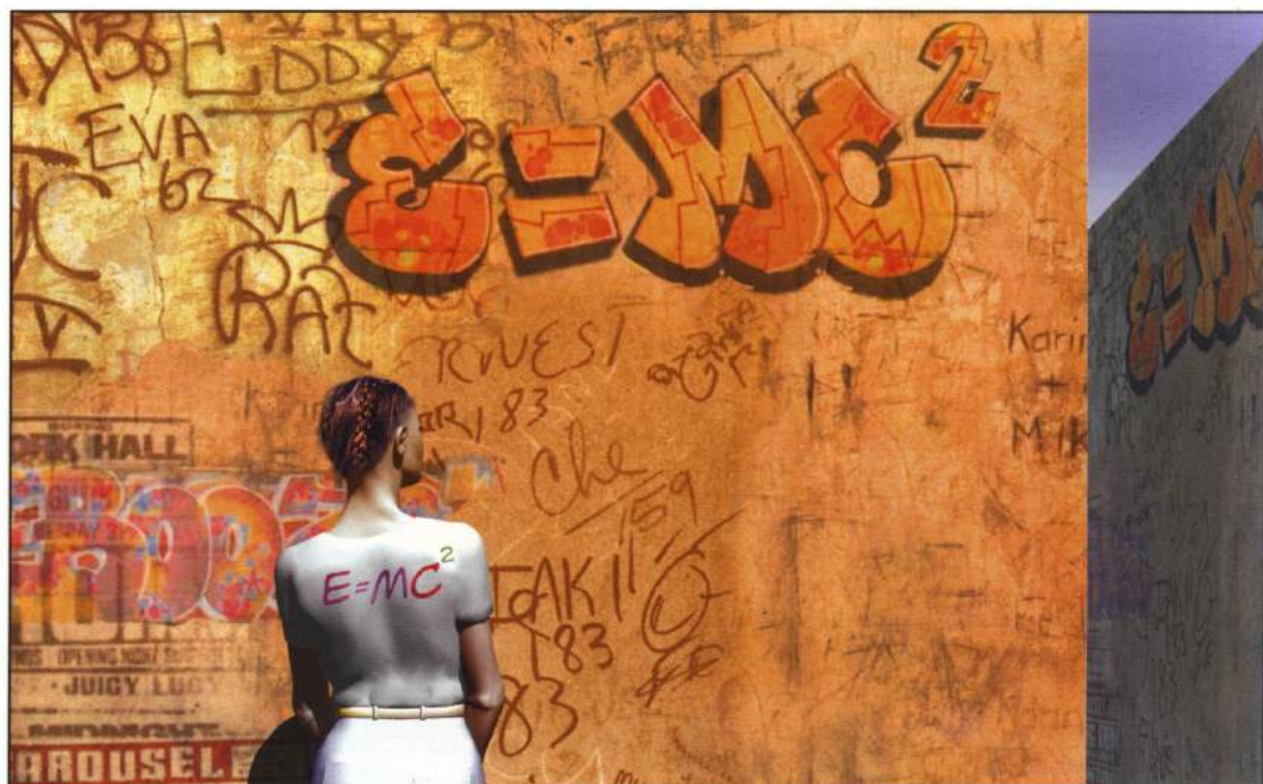
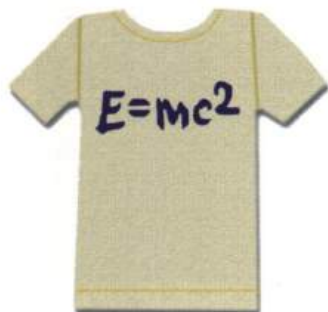


Рис. 1.7



статью, также вышедшую в 1905 году. Теория относительности в мотивации Нобелевского комитета не упоминалась, поскольку ее считали слишком противоречивой. (Мне до сих пор два-три раза в неделю приходят письма, утверждающие, что Эйнштейн был не прав.) Тем не менее сегодня научное сообщество полностью приняло теорию относительности, а ее предсказания проверены самыми разными экспериментами и используются в современной технике.

Важнейшее следствие из теории относительности — это соотношение массы и энергии. Из постулата Эйнштейна о том, что скорость света постоянна независимо от наблюдателя, следует, что двигаться быстрее света невозможно. И вот почему: когда кто-то расходует энергию, чтобы разогнать какое-то тело, будь то элементарная частица или космический корабль, масса этого тела растет¹, отчего разгонять его становится чем дальше, тем труднее. Разогнать части-

¹ В настоящее время принято считать, что масса тела неизменна, а растет только его импульс, что, впрочем, не влияет на выводы автора. — Прим. ред.



цу до скорости света невозможно, поскольку для этого требуется бесконечно много энергии. Масса и энергия эквивалентны, что и показано в знаменитом уравнении Эйнштейна $E = mc^2$ (рис. 1.7). Вероятно, это единственное уравнение в физике, которое все узнают с первого взгляда. Следствием этого уравнения является и то, что если ядро урана распадается на два ядра, общая масса которых немного меньше, высвобождается огромное количество энергии (см. рис. 1.8).

В 1939 году, в преддверии Второй мировой войны, несколько ученых, понимавших, к чему это может привести, убедили Эйнштейна отказаться от пацифистских убеждений и излишней шепетильности и поставить свою подпись под обращением к президенту Рузвельту, в котором говорилось, что США должны запустить программу ядерных исследований. Авторитет Эйнштейна придал этому обращению особый вес.

В результате был запущен Манхэттенский проект, а также созданы бомбы, которые сбросили на Хиросиму и Нагасаки в 1945 году.



Пророческое письмо Эйнштейна президенту Рузвельту. 1939 год

Благодаря трудам Жолио во Франции, а также Ферми и Силарда в Америке в последние четыре месяца стало ясно, что можно запустить цепную ядерную реакцию в большой массе урана, в результате чего будет произведено очень много энергии и большое количество новых элементов, подобных радю. Сейчас почти несомненно, что это удастся осуществить в ближайшем будущем. Этот новый феномен приведет также к созданию бомб, и можно предположить, хотя с куда меньшей уверенностью, что таким образом будут созданы крайне мощные бомбы нового типа.

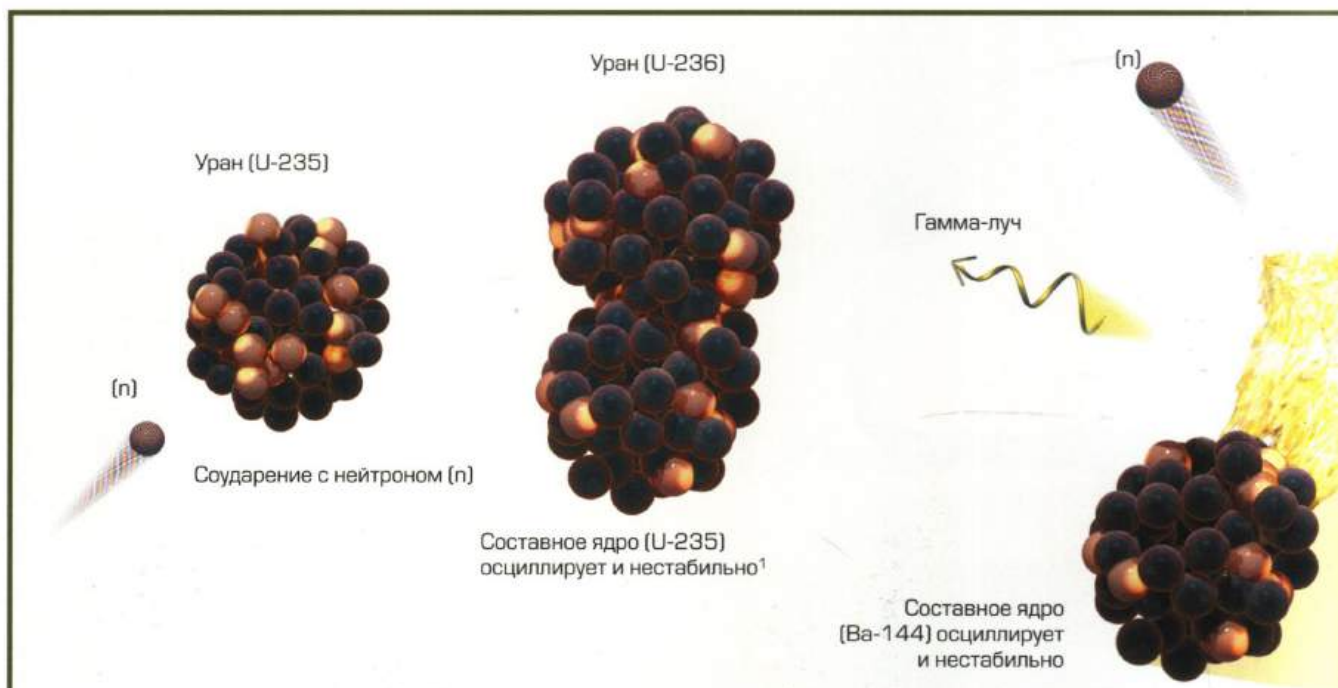


Рис. 1.8
ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

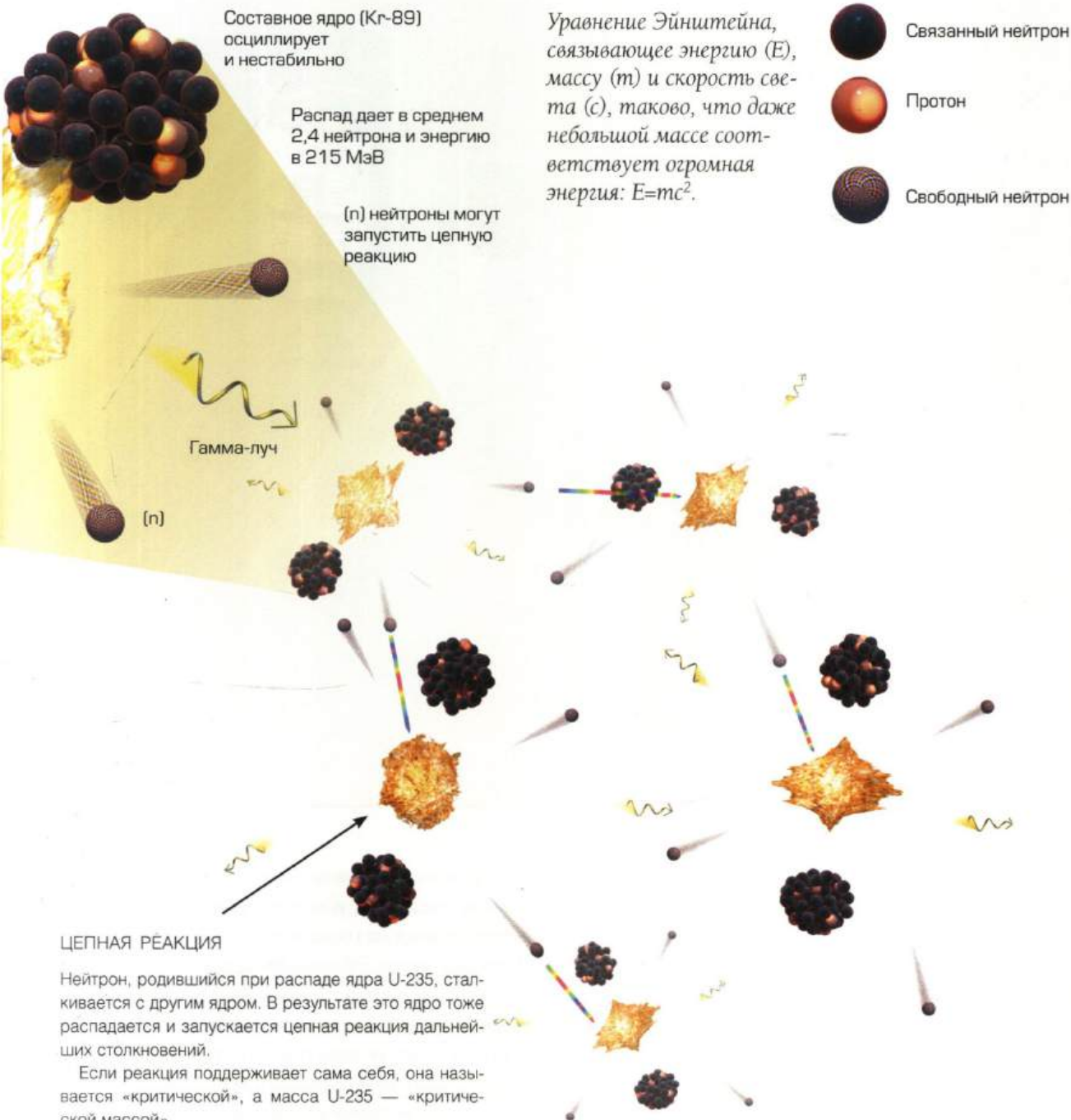
Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, которые удерживает вместе сильное взаимодействие. Однако масса ядра всегда меньше, чем сумма масс составляющих его протонов и нейтронов по отдельности. Разница между массами служит мерой энергии связи ядра, скрепляющей ядро. Эту энергию можно рассчитать по формуле Эйнштейна: энергия связи ядра $= \Delta m c^2$, где Δm — разность между массой ядра и суммой масс составляющих его частиц.

Ядерные взрывные устройства обладают такой разрушительной силой именно из-за высвобождения этой потенциальной энергии.

Иногда в этом обвиняют Эйнштейна, поскольку именно он обнаружил связь между массой и энергией, но это все равно что обвинять Ньютона в том, что самолеты падают, поскольку это он открыл гравитацию. Эйнштейн лично не участвовал в Манхэттенском проекте и пришел в ужас, когда узнал об атомной бомбардировке.

После революционных статей 1905 года у Эйнштейна сложилась прочная репутация в научных кругах. Однако должность в Цюрихском университете ему предложили лишь в 1909 году, и только тогда он смог уйти из Швейцарского патентного бюро. Через два года он перешел в Немецкий университет в Праге, но в 1912 году вернулся в Цюрих — на сей раз в Политехнику. Несмотря на антисемитизм, распространенный тогда в Европе, даже в университетах, Эйнштейн стал теперь нарасхват в академической среде. Его звали и в Вену, и в Утрехт, однако он решил занять должность исследователя в Прусской академии наук, поскольку это освобождало его от преподавательских обязанностей. В апреле 1914 года он переехал в Берлин, где

¹ Правильнее написать «Составное ядро (U-235) + n». — Прим. ред.



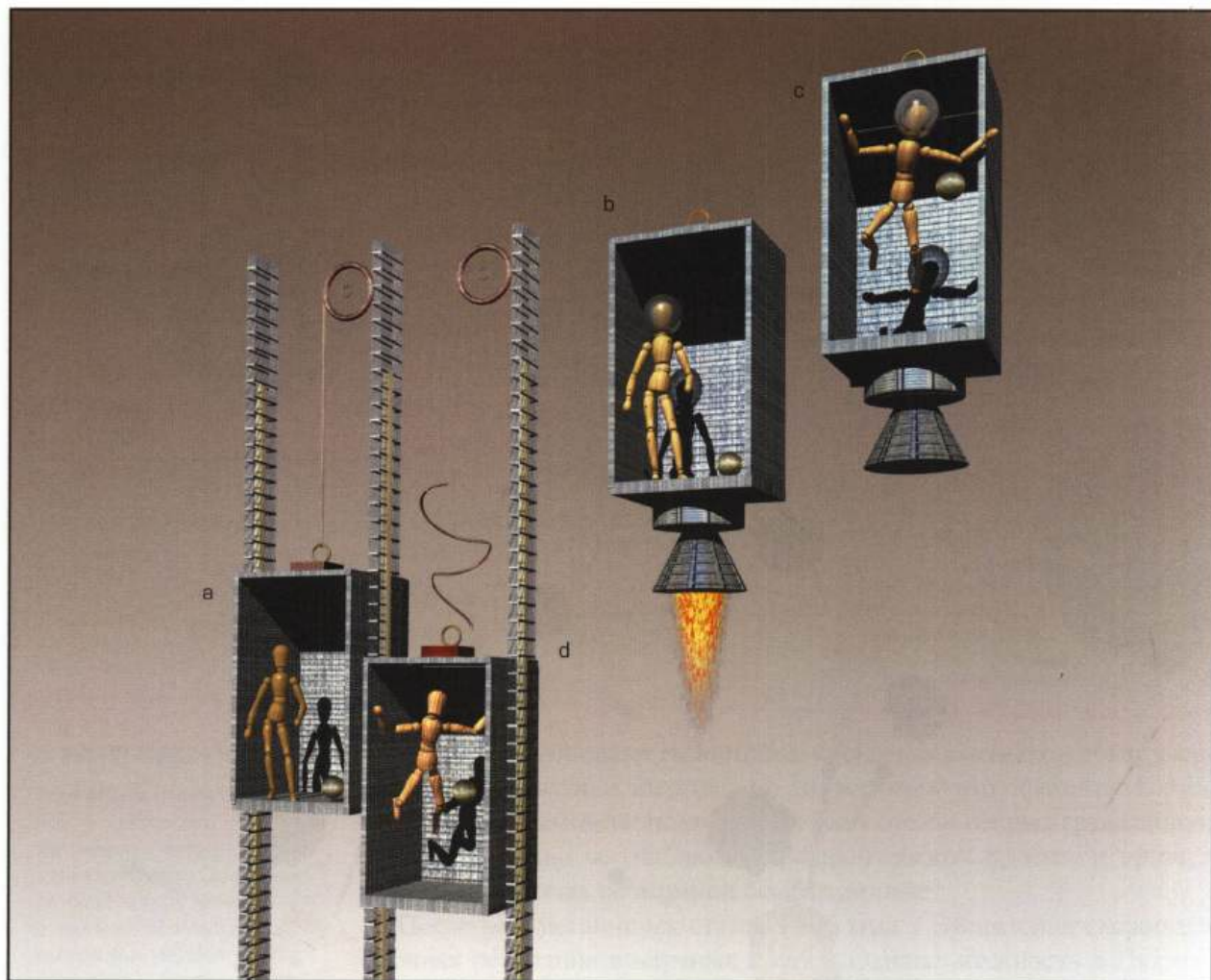


Рис. 1.9
Наблюдатель в закрытой кабине не понимает, где он находится — то ли в неподвижном лифте на Земле (а), то ли в ускоряющейся ракете в космосе (б). Если двигатель ракеты выключен (с), у наблюдателя будут такие же ощущения, как и в лифте, который свободно падает на дно шахты (d).

к нему вскоре присоединились жена и двое сыновей. Однако отношения супругов уже давно не ладились, и вскоре семья Эйнштейна вернулась в Цюрих. Эйнштейн иногда их навещал, но в конце концов развелся с женой. Впоследствии Эйнштейн женился на своей двоюродной сестре Эльзе, которая жила в Берлине. Не исключено, что годы Первой мировой войны стали для него такими плодотворными с научной точки зрения, в частности, потому, что он вел тогда холостяцкую жизнь и не был обременен домашними хлопотами.

Хотя теория относительности хорошо совмещается с законами, управляющими электричеством и магнетизмом, она противоречит



Рис. 1.10

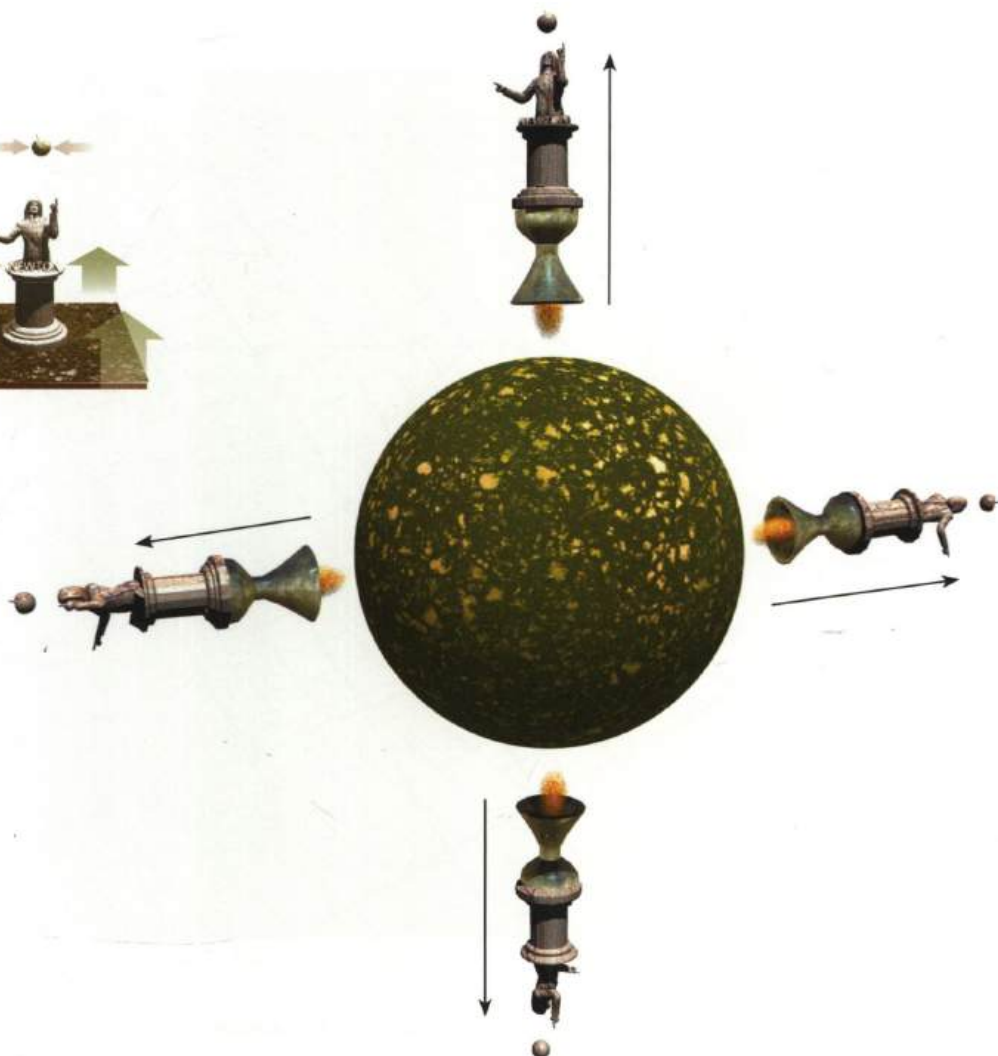


Рис. 1.11

закону всемирного тяготения Ньютона. Согласно этому закону, если изменить распределение вещества в какой-то области пространства, изменения гравитационного поля ощущаются мгновенно повсюду во Вселенной. А это не только означает, что можно распространять сигналы быстрее света (что запрещает теория относительности), но и требует, чтобы существовало абсолютное, универсальное время (иначе непонятно, что такое «мгновенно»), от которого теория относительности отказывается в пользу локального времени.

Об этом осложнении Эйнштейн догадался в 1907 году, когда еще работал в патентном бюро в Берне, однако всерьез задумался над этой

Если бы Земля была плоской (рис. 1.10), можно было бы сказать, что яблоко упало на голову Ньютона или из-за гравитации, или потому, что Земля и Ньютон ускорялись вверх. Для сферической Земли эта эквивалентность нарушается (рис. 1.11), поскольку люди на противоположных сторонах земного шара удалялись бы друг от друга. Эйнштейн преодолел эту трудность, предположив, что пространство и время искривлены.

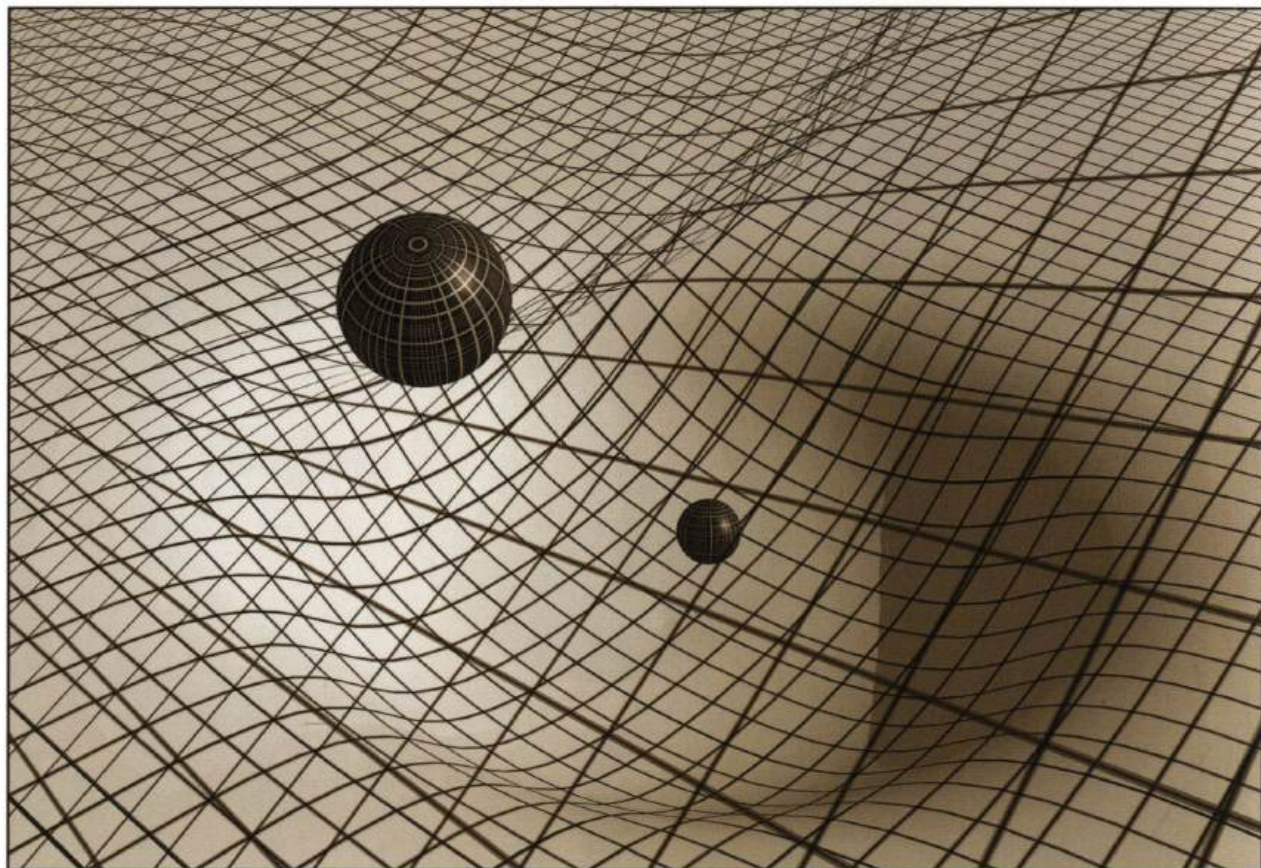


Рис. 1.12
КРИВЫЕ
ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Ускорение и гравитация могут быть эквивалентны, только если массивное тело искривляет пространство-время, а следовательно, и траектории движения тел в своей окрестности.

задачей лишь в 1911 году, когда уже переехал в Прагу. Он понял, что между ускорением и гравитационным полем есть близкое родство. Наблюдатель в закрытой кабине, например в лифте, не знает, покоится ли кабина в гравитационном поле Земли или ускоряется ракетой в космосе. (Это, разумеется, было до эпохи «Звездного пути», поэтому Эйнштейн представлял себе не космические корабли, а лифты.) Однако разгоняться или свободно падать в лифте можно лишь недолго, иначе произойдет катастрофа (рис. 1.9).

Если бы Земля была плоской, можно было бы с одинаковым успехом заявить, что яблоко упало на голову Ньютона из-за гравитации или потому, что Ньютон вместе с поверхностью Земли ускорялся вверх (рис. 1.10). Однако на круглой Земле ускорение и гравитация не эквивалентны: люди на противоположных сторонах земного шара должны были бы ускоряться в противоположных



Prokuser Einstein



направлениях, оставаясь при этом на постоянном расстоянии друг от друга (рис. 1.11).

Однако по возвращении в Цюрих в 1912 году Эйнштейна осенило: он понял, что ускорение и гравитация на сфере останутся эквивалентными, если геометрия пространства-времени будет не плоской, как думали раньше, а искривленной.

По мысли Эйнштейна, масса и энергия искривляют пространство-время — а как именно, еще предстояло определить. Все тела — и яблоки, и планеты — стараются двигаться в пространстве-времени по прямой, однако их траектории искривляются гравитационным полем, поскольку пространство-время искривлено (рис. 1.12).

Заручившись помощью своего друга Марселя Гроссмана, Эйнштейн изучил теорию искривленных пространств и поверхностей, которую разработал еще в середине XIX века Георг Фридрих Риман. Однако Риман думал только об искривленном пространстве. Нужен был Эйнштейн, чтобы понять, что искривлено все пространство-время. В 1913 году Эйнштейн и Гроссман вместе написали статью, в которой выдвинули гипотезу, что мы принимаем за гравитационные силы всего лишь проявление кривизны пространства-времени. Но Эйнштейн в одном месте допустил ошибку (человеку свойственно ошибаться), поэтому им с Гроссманом не удалось вывести уравнения, которые связали бы кривизну пространства-времени с массой и энер-

Albert Einstein™

low

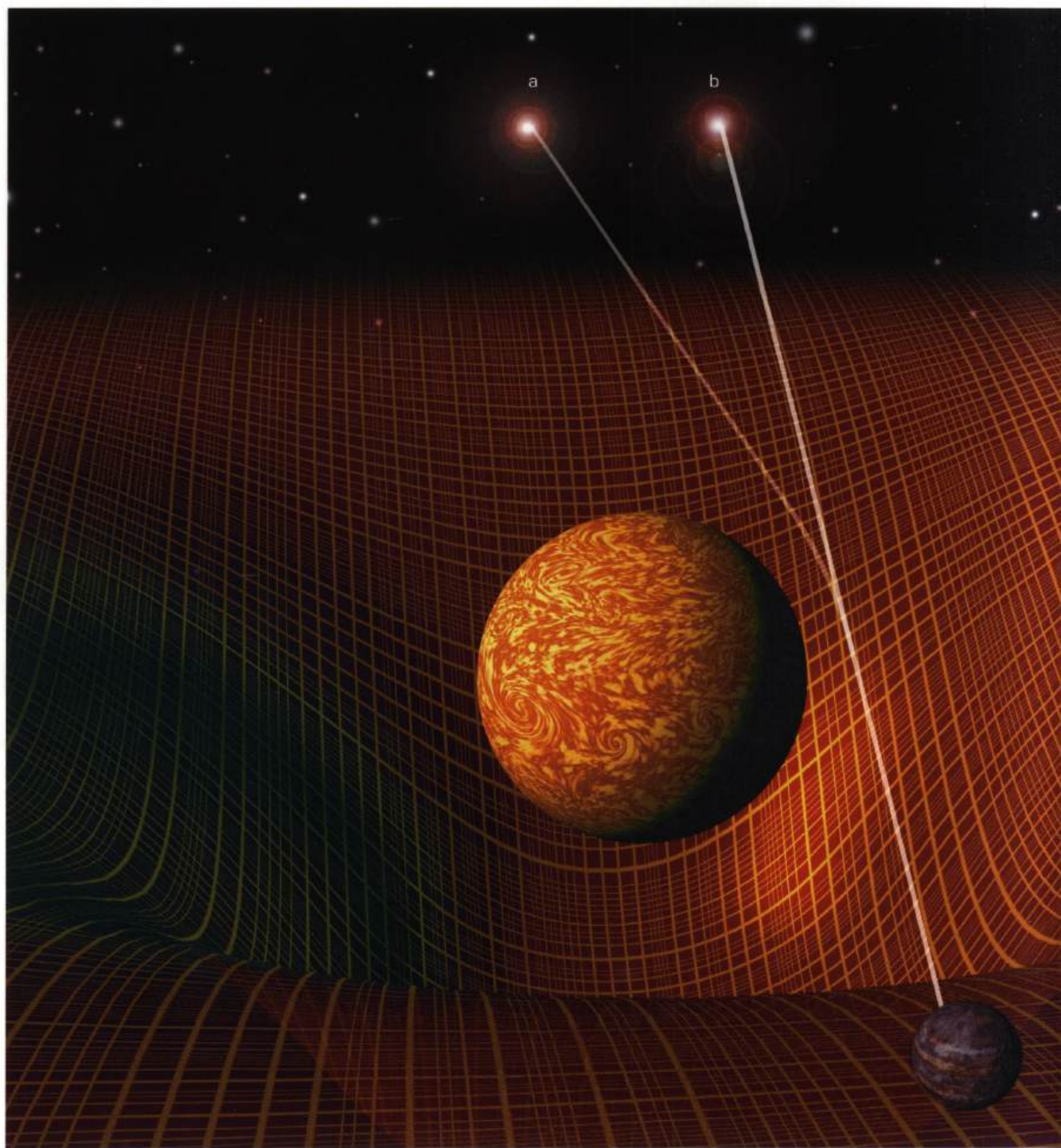




Рис. 1.13
ИСКРИВЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ЛУЧА

Свет от звезды, проходящий мимо Солнца, отклоняется, поскольку масса Солнца искажает пространство-время (а). Поэтому с точки зрения наблюдателя на Земле положение звезды на небосклоне несколько меняется (b). Подобные явления наблюдаются во время солнечных затмений¹.

гией, заключенной в нем. Эйнштейн продолжил работать над этой задачей в Берлине — война его почти не затронула, а от домашних обязанностей он был избавлен — и в ноябре 1915 года все же вывел нужные формулы. Летом 1915 года он побывал в Гёттингенском университете, где обсудил свои соображения с математиком Дэвидом Гилбертом, и оказалось, что Гилберт независимо вывел те же уравнения на несколько дней раньше Эйнштейна. Однако, как признал сам Гилберт, честь открытия новой теории принадлежит все-таки Эйнштейну. Ведь это он предложил связать гравитацию с искажением пространства-времени. К чести Германии надо отметить, что в те годы это была страна очень цивилизованная, раз даже в военное время государство не препятствовало подобным научным диспутам и общению ученых. Какой контраст с фашистской диктатурой, наступившей двадцать лет спустя!

Новая теория искривленного пространства-времени получила название «общая теория относительности», чтобы отличать ее от первоначальной теории, где о гравитации ничего не говорилось, — мы называем ее «специальная теория относительности». Общая теория относительности получила яркое подтверждение уже в 1919 году, когда британская экспедиция в Западной Африке пронаблюдала легкое искривление света звезды, проходившего мимо Солнца во время затмения (рис. 1.13). Это было прямое доказательство искривления пространства и времени, которое заставило нас радикально пересмотреть свое восприятие Вселенной, что можно сравнить разве что с переворотом в сознании, которое произвел Евклид, когда около 300 года до н.э. написал свои «Начала геометрии».

Своей общей теорией относительности Эйнштейн превратил пространство и время из пассивных декораций, в которых происходят различные события, в активных участников вселенской динами-

¹ Преимущество наблюдений во время затмения состоит в том, что только в это время можно регистрировать лучи света от звезд, проходящие в непосредственной близости от Солнца, где искажение пространства-времени наиболее сильно. — Прим. ред.

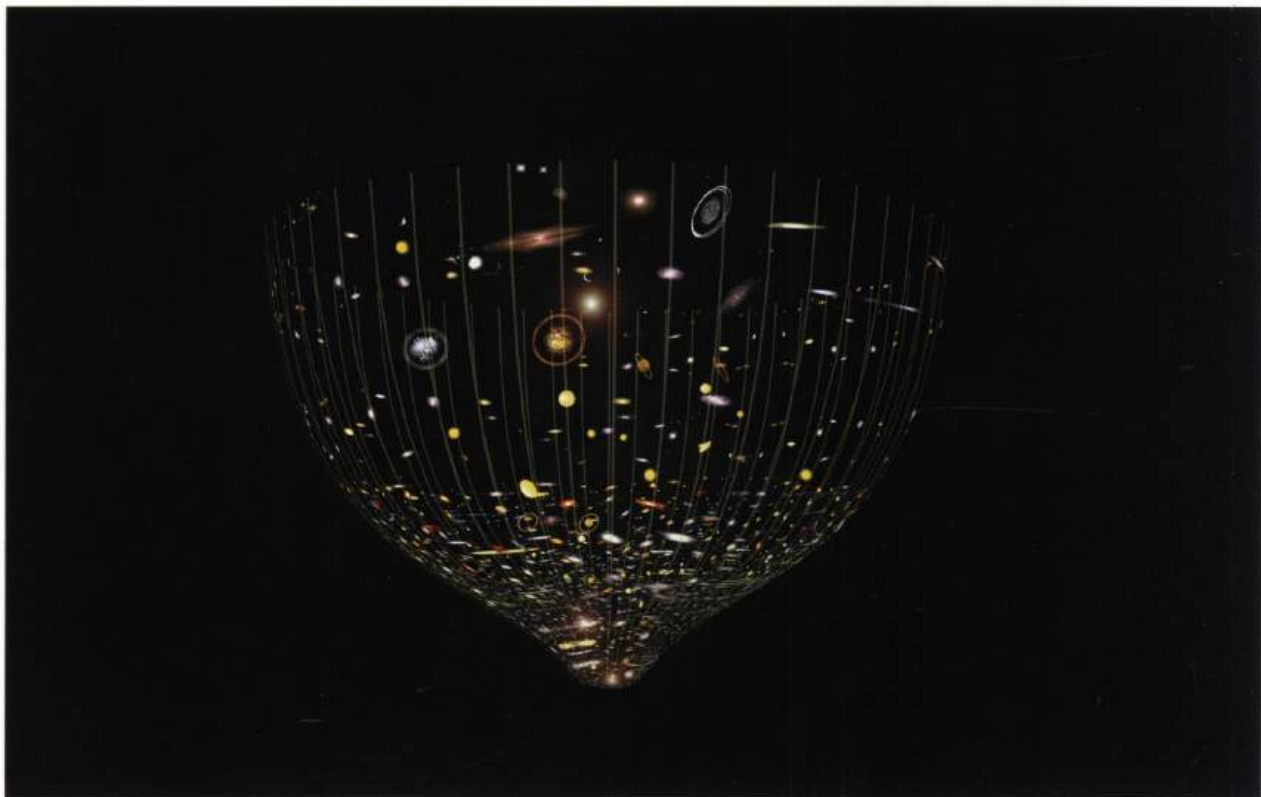
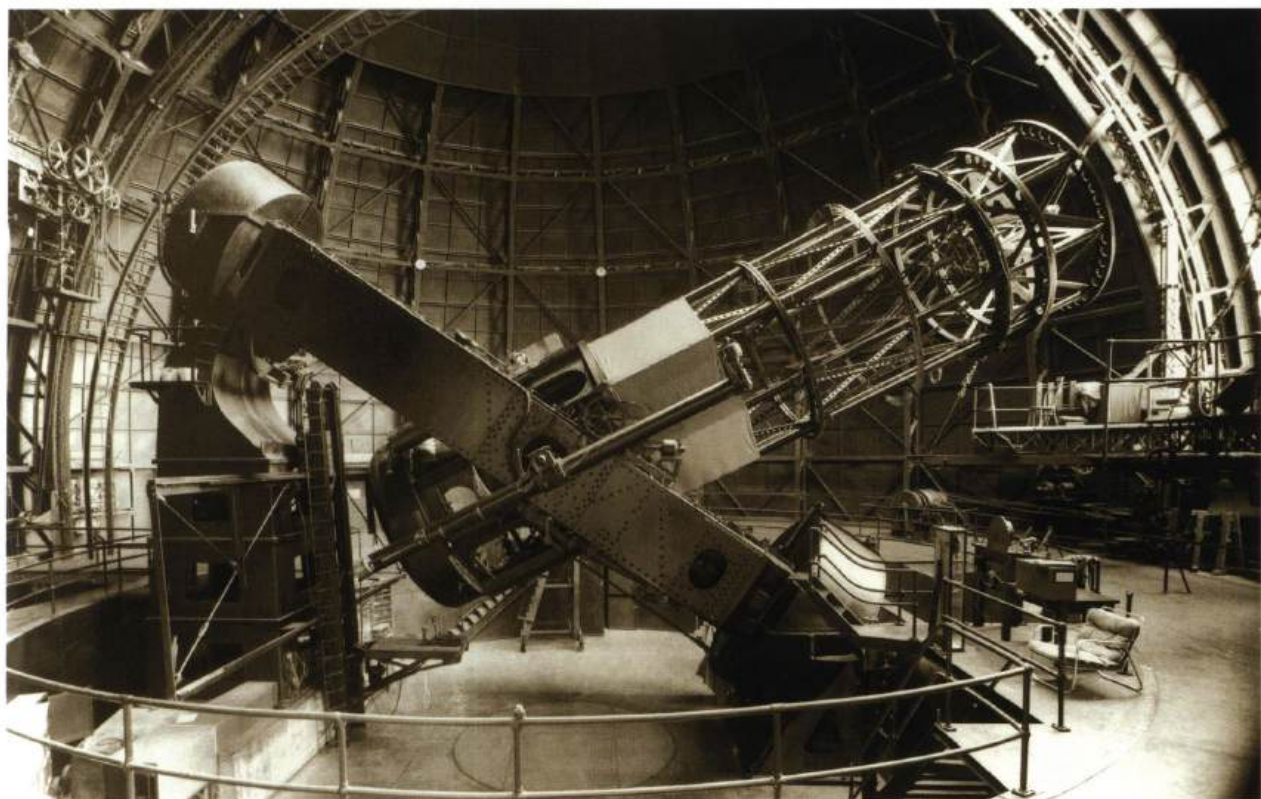


Рис. 1.14

Наблюдения галактик показывают, что Вселенная расширяется: расстояние между практически любыми двумя галактиками растёт.

ки. Это подвело нас к масштабной задаче, которая занимает центральное место и в физике XXI века. Вселенная полна вещества, и вещество искривляет пространство-время таким образом, что тела притягиваются друг к другу. Эйнштейн обнаружил, что у его уравнений нет решения, которое описывало бы статическую вселенную, не меняющуюся со временем. Тем не менее он не отказался от подобной вечной и неизменной вселенной, которую представлял себе он сам и большинство его современников, а подправил уравнения — добавил слагаемое под названием «космологическая постоянная», которое искривляло пространство-время в противоположном направлении, так чтобы тела отталкивались. Отталкивающее воздействие космологической постоянной должно было уравновешивать притяжение вещества — и тогда у уравнений появлялось решение, допускавшее существование статической вселенной. Это была одна из величайших упущенных возможностей в истории теоретической физики. Если бы Эйнштейн придерживался первоначальных уравне-



ний, он предсказал бы, что Вселенная либо расширяется, либо сжимается. Так или иначе, никто не воспринимал всерьез гипотезу о Вселенной, которая меняется со временем, но уже в двадцатые годы прошлого века на стоюймовом телескопе в обсерватории «Маунт-Вилсон» были сделаны сенсационные наблюдения.

Эти наблюдения показали, что чем дальше от нас находятся другие галактики, тем быстрее они удаляются от нас. Вселенная расширяется, причем расстояние между любыми двумя галактиками постоянно увеличивается со временем (рис. 1.14). Это открытие сделало космологическую постоянную ненужной — оказалось, что у уравнений Эйнштейна и не должно быть статического решения. В дальнейшем Эйнштейн назвал космологическую постоянную величайшей ошибкой в своей жизни. Однако в наши дни представляется, что это, вероятно, была вовсе не ошибка: недавние наблюдения, о которых рассказано в главе 3, показывают, что небольшая космологическая постоянная, возможно, все же нужна.

*Стоюймовый телескоп Хукера
в обсерватории «Маунт-Вилсон».*



Рис. 1.15

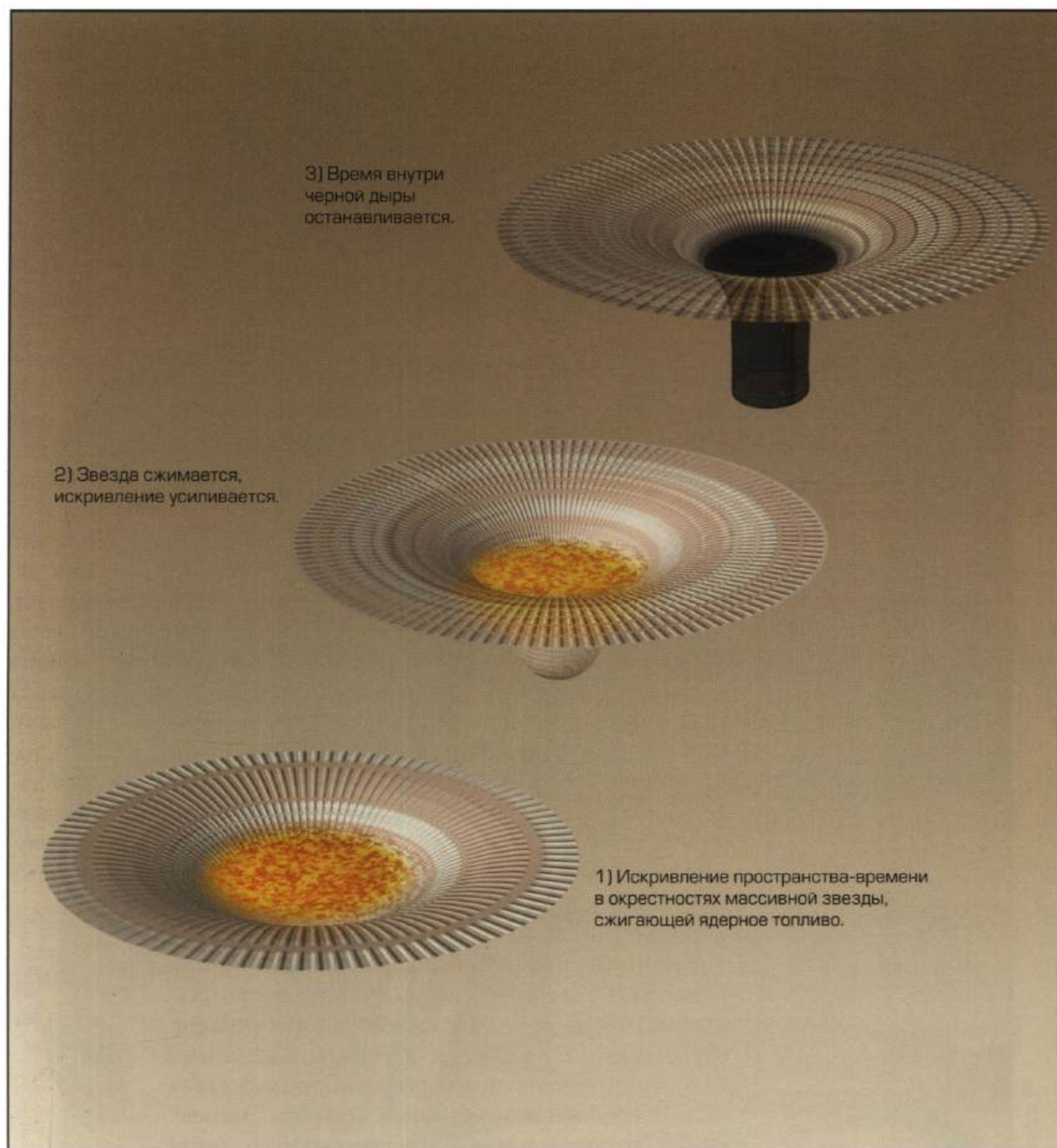
Когда массивная звезда сжигает все свое ядерное топливо, ее температура падает и звезда сжимается. Пространство-время искривляется так сильно, что возникает черная дыра, откуда не может вырваться даже свет. Время внутри черной дыры останавливается.

Общая теория относительности полностью изменила ход дискуссии о происхождении и судьбе Вселенной. Статичная вселенная могла существовать всегда, а могла быть создана в нынешнем виде в какой-то момент в прошлом. Но если галактики расходятся друг от друга, значит, когда-то они находились ближе друг к другу. Примерно 15 миллиардов лет назад они буквально громоздились друг на дружку и плотность Вселенной была очень велика. Католический священник Жорж Леметр, который первым исследовал это начальное состояние Вселенной, назвал его «первоначальный атом», а теперь оно называется «Большой взрыв».

Эйнштейн, похоже, никогда не относился к теории Большого взрыва серьезно. Очевидно, он считал, что простая модель равномерно расширяющейся Вселенной рухнет, если проследить движение галактик в обратном порядке, и что галактики двигались еще и в стороны с небольшой скоростью, что позволяло им избежать столкновения. Он думал, что у Вселенной, вероятно, была фаза сжатия, а рывок к нынешнему расширению произошел при умеренной плотности. Однако сейчас мы знаем, что для того, чтобы ядерные реакции в ранней Вселенной выработали то количество легких элементов, которое мы наблюдаем в окружающем мире, плотность должна была составлять как минимум десять тонн на кубический дюйм¹, а температура — десять миллиардов градусов. Более того, исследования фонового космического микроволнового излучения показывают, что когда-то плотность, вероятно, составляла триллион триллионов триллионов триллионов триллионов (1 и 72 нуля) тонн на кубический дюйм. Кроме того, теперь мы знаем, что общая теория относительности Эйнштейна не допускает, чтобы Вселенная рывком перешла от фазы сжатия к нынешней фазе расширения. Как рассказано в главе 2, мы с Роджером Пенроузом сумели показать, что общая теория относительности предсказывает зарождение Вселенной в ходе Большого взрыва. Так что теория Эйнштейна и в самом деле предполагает, что у времени было начало, хотя самому Эйнштейну это не нравилось.

Еще меньше ему хотелось признавать, что общая теория относительности предсказывает и гибель массивных звезд — когда они к концу жизни уже не могут вырабатывать достаточно тепла, чтобы уравновесить силу собственной гравитации, которая старается их сжать. Эйнштейн считал, что такие звезды впадают в какое-то ста-

¹ Около 600 кг на кубический сантиметр. — Прим. ред.





Альберт Эйнштейн с марионеткой
в виде себя самого вскоре после
окончательного переезда в Америку.

бильное финальное состояние, но сегодня мы знаем, что у звезды с массой более двух масс Солнца никакого финального состояния не бывает. Такие звезды продолжают сжиматься и превращаются в черные дыры — области пространства-времени, искривленные настолько, что оттуда не может вырваться даже свет (рис. 1.15).

Мы с Пенроузом показали, что из общей теории относительности следует, что внутри черной дыры время останавливается — и для самой звезды, и для злосчастного астронавта, который туда упал. Однако и начало, и конец времени — точки, в которых уравнения общей теории относительности не работают. Таким образом, теория не предсказывает, что получится в результате Большого взрыва. Кому-то в этом видится проявление божественной воли (мол, Бог захотел — и создал Вселенную), но есть и такие, в том числе и я, кому кажется, что и зарождение Вселенной должно подчиняться тем же законам, которые действуют в остальное время. Мы достигли определенного прогресса в этом направлении, о чем написано в главе 3, но все же еще не понимаем до конца, как именно зародилась Вселенная.

Общая теория относительности дает сбой в момент Большого взрыва потому, что противоречит квантовой гипотезе — второй великой понятийной революции начала XX века. Первый шаг к созданию квантовой гипотезы был сделан в 1900 году в Берлине, когда Макс Планк обнаружил, что излучение от докрасна раскаленного тела можно объяснить только в том случае, если свет излучается и поглощается лишь отдельными порциями, получившими название квантов. Эйнштейн в одной из своих фундаментальных статей, написанных в 1905 году во время работы в патентном бюро, показал, что квантовая гипотеза Планка, вероятно, объясняет так называемый фотоэффект: некоторые металлы под воздействием света испускают электроны. На фотоэффекте основаны современные светоприемники и телекамеры, и именно за этот труд Эйнштейн получил Нобелевскую премию по физике.

Эйнштейн продолжал разрабатывать гипотезу о квантах и в двадцатые годы, однако его очень тревожили работы Вернера Гейзенберга в Копенгагене, Поля Дирака в Кембридже и Эрвина Шредингера в Цюрихе, в результате которых складывалась новая картина реальности — квантовая механика. Элементарные частицы лишились определенного места и скорости. Чем точнее удавалось определить положение частицы, тем хуже определялась ее ско-





Albert Einstein™



рость — и наоборот. Эта случайность, непредсказуемость фундаментальных законов природы пугала Эйнштейна, и он так никогда и не примирился с квантовой механикой окончательно. Свои чувства он выразил в знаменитом афоризме «Бог не играет в кости». Однако большинство ученых все же признало справедливость новых квантовых законов, поскольку с их помощью удавалось объяснить целый ряд загадочных явлений, к тому же они прекрасно подтверждались наблюдениями. Законы квантовой механики лежат в основе современных представлений в химии, молекулярной биологии и электронике и дали старт техническому прогрессу, который преобразил мир в следующие полвека.

В декабре 1932 года, понимая, что нацисты во главе с Гитлером вот-вот придут к власти, Эйнштейн покинул Германию, а через четыре месяца отказался и от немецкого гражданства и последние двадцать лет своей жизни провел в Институте перспективных исследований в Принстоне, штат Нью-Джерси. Тем временем в Германии фашисты развернули кампанию против «еврейской науки» и репрессировали многих ученых-евреев; отчасти поэтому Германия так и не смогла создать атомную бомбу. Одной из главных целей этой кампании был Эйнштейн и его теория относительности. Когда Эйнштейну сообщили, что в свет вышла книга под названием «Сто авторов против Эйнштейна», он заметил: «А зачем так много? Если бы я был не прав, хватило бы и одного». После Второй мировой войны Эйнштейн убеждал членов антигитлеровской коалиции создать всемирное правительство для контроля над ядерным вооружением. В 1948 году Эйнштейну предложили пост президента только что образованного Государства Израиль, но он отказался. Как-то раз он заметил: «Политика сиюминутна, а формулы вечны». Формулы общей теории относительности — лучшая эпитафия Эйнштейну и лучшая память о нем. Они проживут столько же, сколько сама Вселенная.

История еще не знала периода, когда за сто лет мир изменился бы настолько сильно. И дело не в новых политэкономических учениях, а в стремительном научно-техническом прогрессе, который стал возможным благодаря достижениям в фундаментальной физике. А самый подходящий символ этого прогресса — Альберт Эйнштейн.

ГЛАВА 2

ФОРМА ВРЕМЕНИ

*Общая теория относительности Эйнштейна придает времени форму.
Как привести это в соответствие с квантовой теорией?*



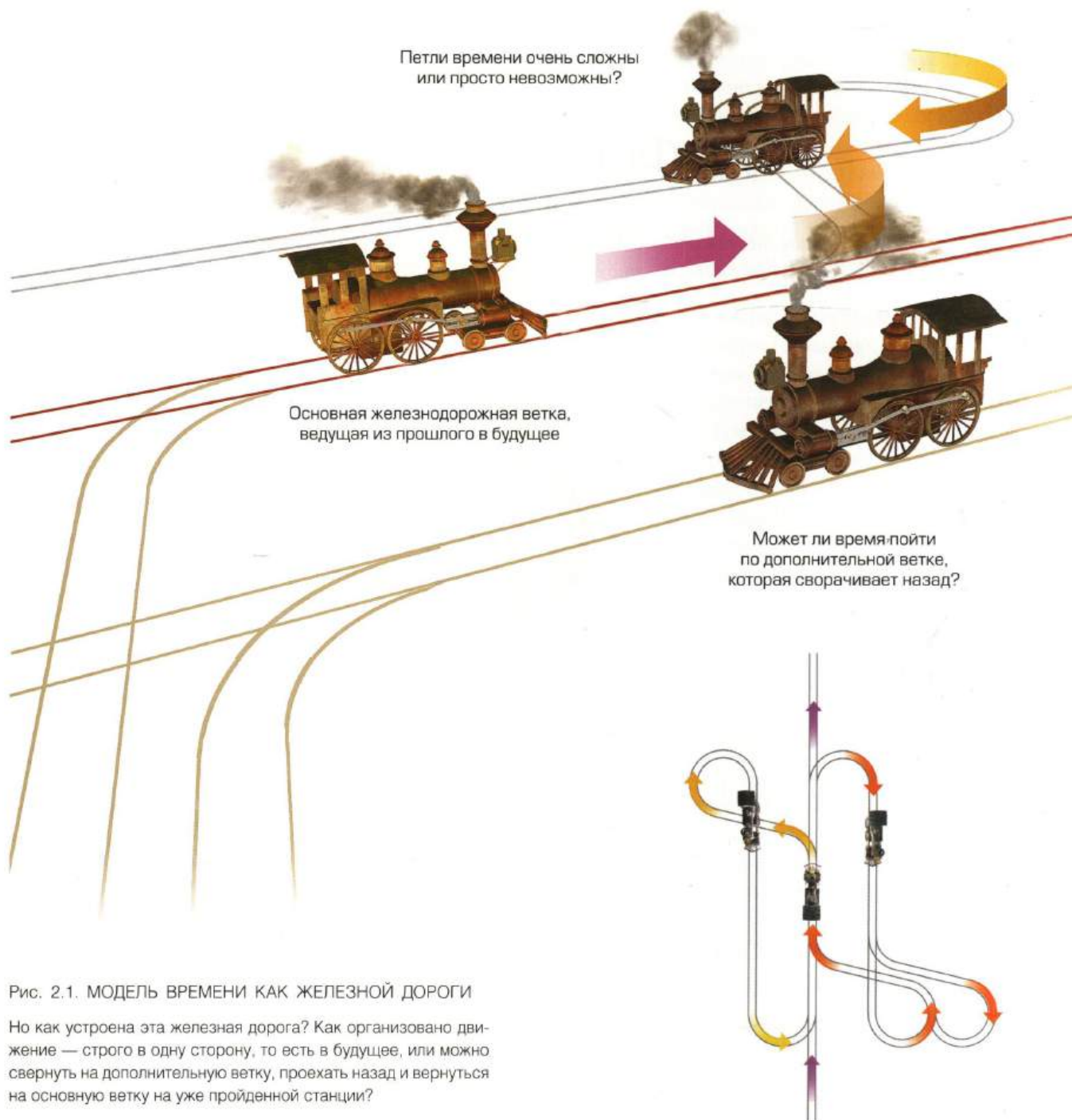
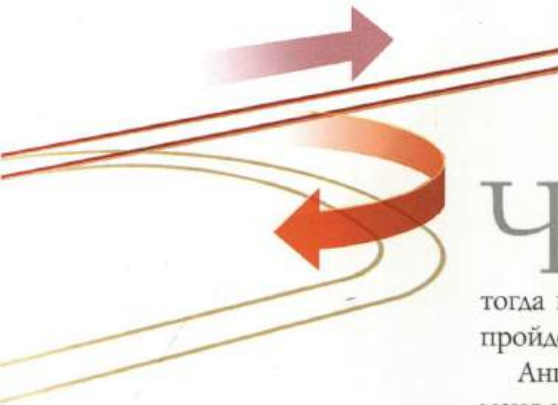


Рис. 2.1. МОДЕЛЬ ВРЕМЕНИ КАК ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Но как устроена эта железная дорога? Как организовано движение — строго в одну сторону, то есть в будущее, или можно свернуть на дополнительную ветку, проехать назад и вернуться на основную ветку на уже пройденной станции?



ЧТО ТАКОЕ ВРЕМЯ? Непрерывный поток, уносящий в прошлое все мечты, как поется в старой песне? Или что-то вроде железной дороги? А вдруг у него есть петли и ответвления — тогда можно двигаться вперед, но при этом снова попасть на уже пройденную станцию на той же ветке (рис. 2.1)?

Английский поэт Чарльз Лэм, живший в XIX веке, писал: «Для меня нет ничего более загадочного, чем пространство и время. Однако пространство и время заботят меня меньше всего, ведь я о них никогда не думаю». Мы все время (что бы это ни значило) забываем о пространстве и времени, но иногда все же задаемся вопросом, что такое время, с чего оно началось и куда оно нас ведет.

Мне кажется, что в основе любой жизнеспособной научной теории, не обязательно теории времени, должны лежать принципы самой надежной и конструктивной философии науки — позитивистского подхода Карла Поппера и других философов. Согласно их мировоззрению, научная теория — это математическая модель, описывающая и кодифицирующая наблюдения, которые мы делаем. Хорошая теория описывает широкий диапазон явлений при помощи нескольких простых постулатов и делает конкретные предсказания, которые можно проверить. Если предсказания согласуются с наблюдениями, теория проходит проверку, однако доказать, что она правильна, невозможно. С другой стороны, если наблюдения не согласуются с предсказаниями, нужно либо отказаться от теории, либо видоизменить ее. (По крайней мере, так должно быть. На практике теоретики часто сомневаются в точности наблюдений и, более того, в надежности и морально-этических качествах наблюдателей.) Если, подобно мне, придерживаться позитивистского подхода, невозможно сказать, который сейчас час. Можно лишь привести какую-нибудь математическую модель времени, которую ученые считают очень хорошей, и сказать, какие прогнозы она дает.

Первую математическую модель пространства и времени выдвинул Исаак Ньютон в своем труде *Philosophiae Naturalis Principia*

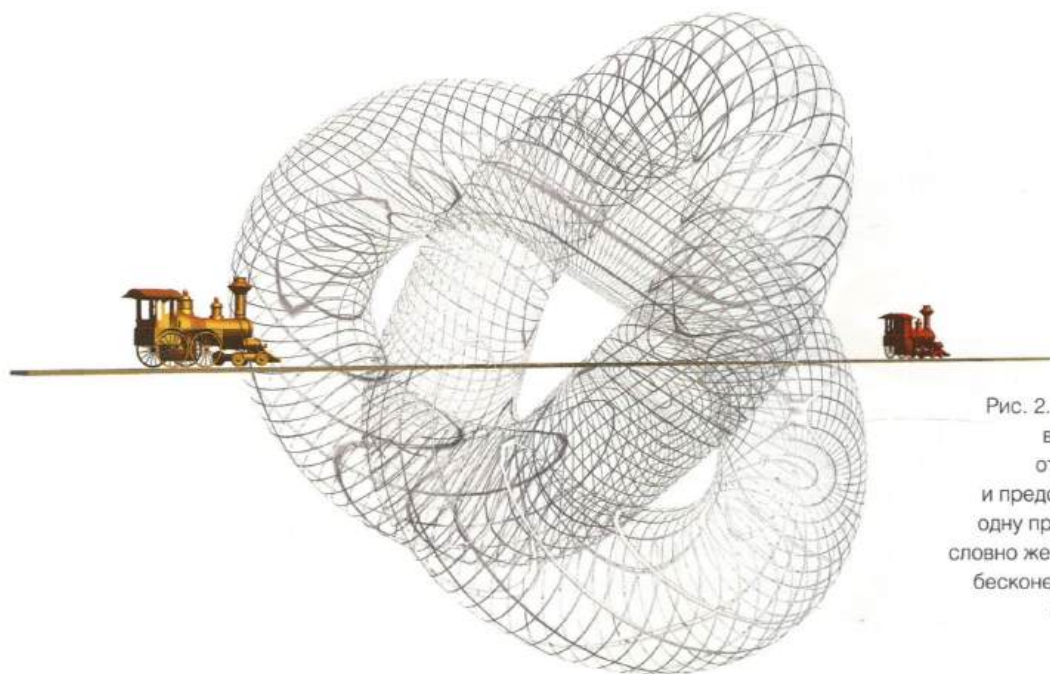
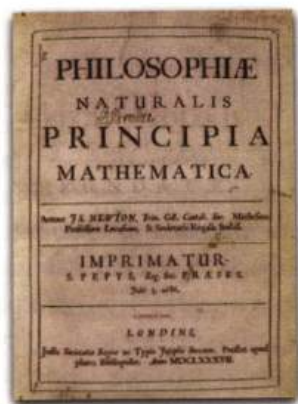


Рис. 2.2. По Ньютону, время отделено от пространства и представляет собой одну прямую линию — словно железная дорога, бесконечно тянущаяся в обе стороны.



Исаак Ньютон опубликовал свою математическую модель пространства и времени более 300 лет назад.

Mathematica («Математические начала натуральной философии»), увидевшем свет в 1687 году. Ньютон занимал в Кембридже кресло (то есть кафедру) Лукасовского профессора математики — то самое, которое сейчас занимаю я, хотя тогда, конечно, оно не было оборудовано всевозможной электроникой. Согласно модели Ньютона, время и пространство служат лишь фоном для происходящих событий, которые никак их не затрагивают. Время не зависит от пространства и считается одной линией — железнодорожной веткой, — бесконечно тянущейся в обе стороны (рис. 2.2). Само время вечно — в том смысле, что оно всегда было и всегда будет. Большинство современников Ньютона считали, напротив, что физическая Вселенная была создана более или менее в нынешнем состоянии всего несколько тысяч лет назад. Это несоответствие тревожило многих философов, в том числе и немецкого мыслителя Иммануила Канта. Если Вселенная и вправду была создана, зачем было ждать бесконечно долго, прежде чем ее создавать? С другой стороны, если Вселенная существовала всегда, почему все, что должно было случиться, не случилось до сих пор — почему истории не настал конец? В частности, почему во Вселенной не наступило тепловое равновесие — то есть все предметы не стали одной и той же температуры?

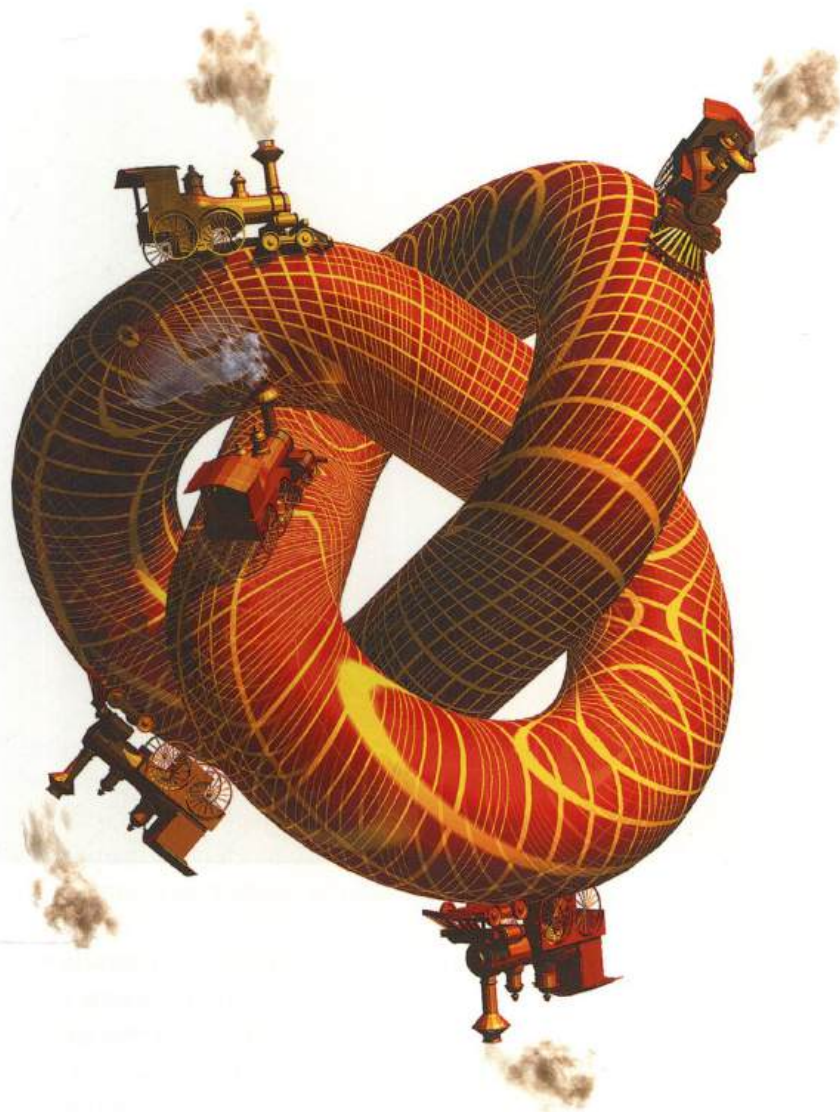


Рис. 2.3. ФОРМА И НАПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Эйнштейновская теория относительности, которая подтверждается множеством экспериментов, показывает, что время и пространство неразрывно взаимосвязаны. Нельзя искривить

пространство, не затронув и время. Значит, у времени есть форма. Однако, судя по всему, двигаться во времени все же можно лишь в одном направлении — как паровозики на рисунке.

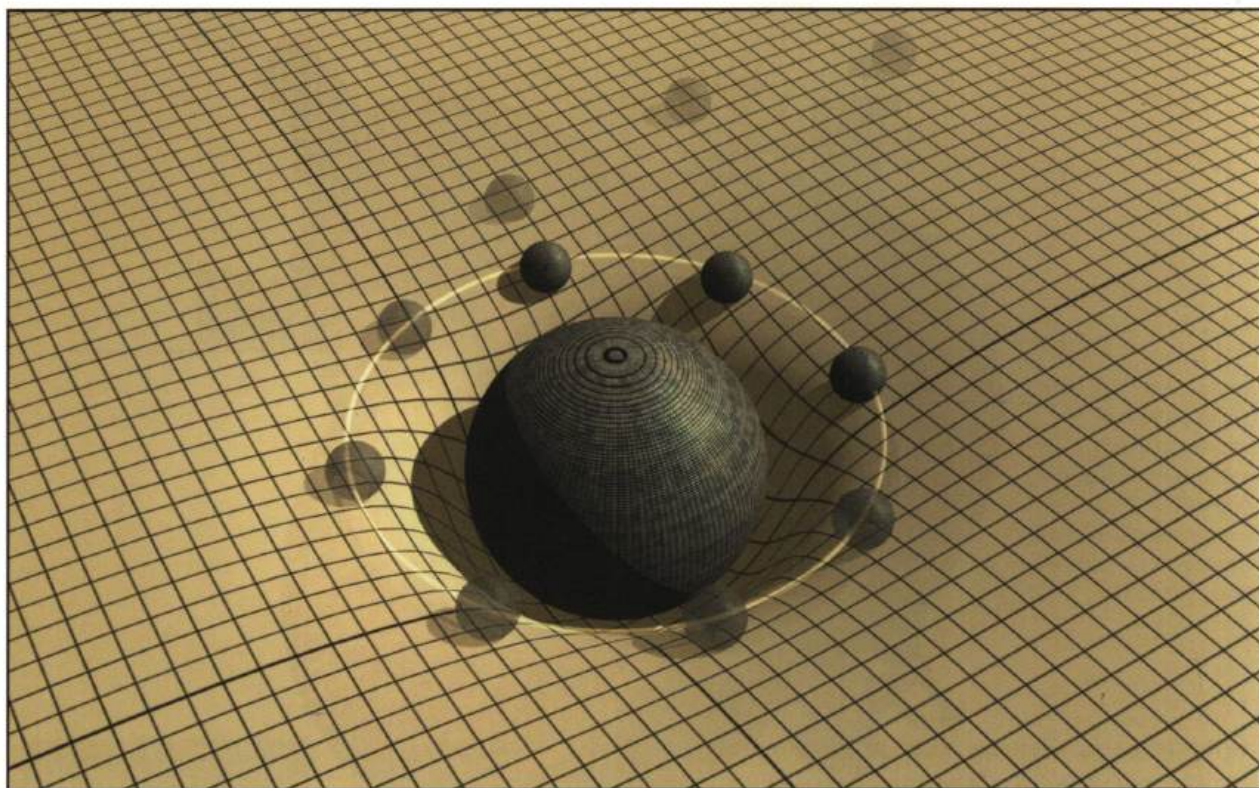


Рис. 2.4. АНАЛОГИЯ
С РЕЗИНОВЫМ ЛИСТОМ

Большой шар в центре — это какое-нибудь массивное тело, например звезда. Своей массой оно искривляет резиновый лист вокруг себя. Траектория маленьких шариков, катящихся по листу, из-за этого искривления искажается и замыкается вокруг большого шара — так вращаются по орбите планеты в гравитационном поле звезды.

Эту проблему Кант назвал «антиномией чистого разума», поскольку видел здесь логическое противоречие, которое не удавалось разрешить. Однако такое противоречие имеет место только в рамках математической модели Ньютона, согласно которой время — бесконечная линия, не зависящая от происходящего во Вселенной. Между тем из главы 1 мы знаем, что в 1915 году Эйнштейн выдвинул принципиально новую математическую модель — общую теорию относительности. За годы, прошедшие после публикации статьи Эйнштейна, мы украсили его теорию различными бантиками и завитушками, но все равно наша модель пространства-времени основана на том, что предложил Эйнштейн. В этой и в дальнейших главах описано, как развивались наши представления после выхода в свет революционной статьи Эйнштейна. Это история успеха множества ученых, и я горжусь тем, что здесь есть и мой скромный вклад.

Общая теория относительности прибавляет к трем пространственным измерениям одно временное, и получается так называемое



пространство-время (см. рис. 2.3). Эта теория описывает и эффект гравитации: распределение вещества и энергии во Вселенной искажает и сворачивает пространство-время, которое в результате оказывается не плоским. Объекты в таком пространстве-времени стремятся двигаться по прямой, но поскольку пространство-время искривлено, их траектории оказываются изогнутыми и они движутся так, словно на них влияет гравитационное поле.

Прибегнем к грубой аналогии — не воспринимайте ее буквально. Представьте себе резиновый лист. Теперь положим на лист большой мяч — это у нас будет Солнце. Под весом мяча лист прогнется и искривится вокруг Солнца. Если теперь покатаить по листу маленькие шарики, например из подшипника, они не покатятся прямо через лист, а закружатся вокруг тяжелого предмета — как планеты вокруг Солнца (рис. 2.4).

Эта аналогия не полна, поскольку в ней искривляется лишь двумерная часть пространства (поверхность резинового листа), а время остается незатронутым — как в теории Ньютона. Однако согласно общей теории относительности, которая подтверждается множеством экспериментов, время и пространство неразрывно связаны. Невозможно искривить пространство, не затронув время. Значит, у времени есть форма. Искривляя пространство и время, общая теория относительности превращает их из пассивного фона, на котором разворачиваются события, в активных, динамичных участников происходящего. По поводу теории Ньютона, где время существовало независимо от всего остального, резонно было бы спросить, чем занимался Бог до того, как создал Вселенную. По словам Блаженного Августина, это не повод для шуток вроде «Создавал Ад для тех, кто слишком глубоко копает». Это серьезный вопрос, многие столетия служивший предметом для размышлений. Согласно Блаженному Августину, Господь, прежде чем создавать Небо и Землю, не делал ничего. В сущности, это очень близко к современным представлениям.

С другой стороны, согласно общей теории относительности, время и пространство зависят и друг от друга, и от Вселенной, в которой они существуют. Они определяются на основе измерений некоторых параметров Вселенной — например, количества колебаний в кристалле кварцевых часов или длины линейки. Легко представить себе, что при таком определении времени в пределах Вселенной оно должно иметь минимальное или максимальное значение, то есть начало или конец. Спрашивать, что было до начала или после конца, бессмысленно, поскольку это лежит вне области определения времени.



Блаженный Августин, философ, живший в V веке, который полагал, что до сотворения мира времени не существовало. Страница из *De Civitate Dei* («О Граде Божьем»), XII в. Библиотека Лоренцо Медичи, Флоренция.



Очевидно, что было важно понять, предсказывает ли математическая модель общей теории относительности начало или конец Вселенной и самого времени. В целом физики-теоретики, в том числе и сам Эйнштейн, исходили из убеждения, что время тянется бесконечно в обе стороны. Иначе начинались неприятные вопросы о создании Вселенной, по всей видимости выходящие за рамки науки. Были известны решения уравнений Эйнштейна, предполагавшие, что у времени есть начало или конец, но все это сводилось к сугубо частным случаям, для которых требовалось много симметрии. Считалось, что в настоящем материальном теле, которое коллапсирует под действием собственной гравитации, давление или боковые скорости не позволяют всему веществу схлопнуться в одну точку с бесконечной плотностью. Подобным же образом, если проследить расширение Вселенной в обратном направлении по времени, вещество во Вселенной не должно было возникнуть из точки с бесконечной плотностью. Такую точку стали называть сингулярностью, и именно она могла бы быть началом или концом времени.

В 1963 году двое советских ученых — Евгений Лифшиц и Исаак Халатников — заявили, что им удалось доказать, что решения уравнений Эйнштейна с сингулярностью требуют особого соотношения вещества и скоростей. Вероятность, что решение, описывающее Вселенную, удовлетворяет именно такому соотношению, была практически нулевой. Почти все решения, которые могли бы описывать Вселенную, позволяли избежать сингулярности бесконечной плотности: до эры расширения Вселенной должна была быть фаза сжатия, во время которой вещество сгущалось, но не сжималось бесконечно, а затем снова начинало разлетаться, что и положило бы начало нынешней фазе расширения. А в таком случае время длилось бы вечно — из бесконечного прошлого в бесконечное будущее.

Однако доводы Лифшица и Халатникова убедили не всех. Мы с Роджером Пенроузом прибегли к другому подходу, основанному не на подробном исследовании решений уравнений, а на исследовании глобальной структуры пространства-времени. В рамках общей теории относительности пространство-время искривляется не только под воздействием массивных тел, но и под влиянием содержащейся в нем энергии. Энергия всегда положительна, поэтому она придает пространству-времени кривизну, из-за которой траектории световых лучей изгибаются навстречу друг другу.

А теперь рассмотрим обращенный в прошлое световой конус (рис. 2.5), образованный в пространстве-времени траекториями све-

Наблюдатель, смотрящий
в прошлое

Как выглядят галактики сейчас

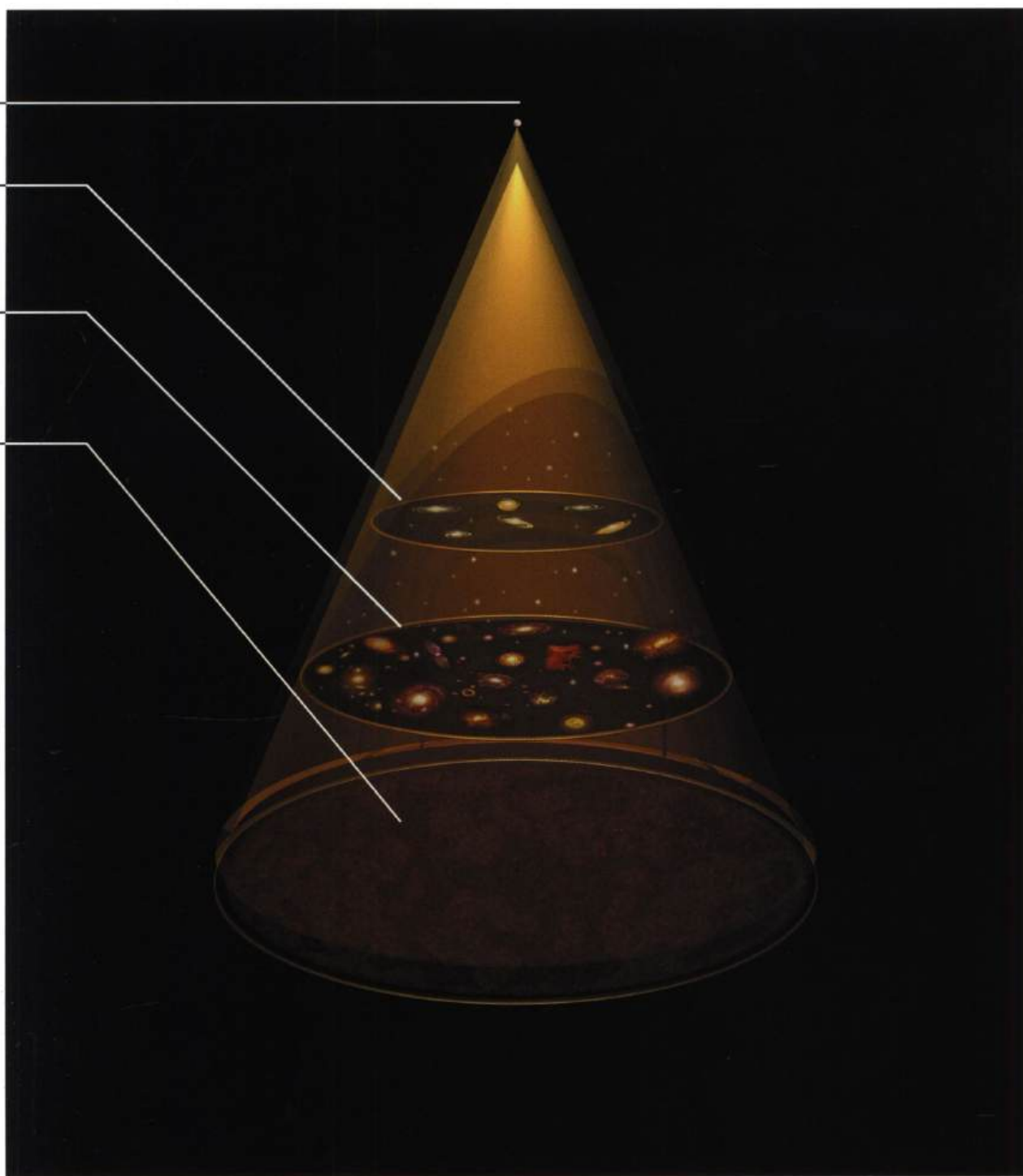
Как выглядели галактики
5 миллиардов лет назад

Фоновое излучение



Рис. 2.5. СВЕТОВОЙ КОНУС НАШЕГО ПРОШЛОГО

Когда мы смотрим на далекие галактики, то на самом деле видим Вселенную такой, какой она была раньше, поскольку свет распространяется с конечной скоростью. Если мы отложим время по вертикальной оси, а два из трех пространственных измерений — по горизонтальным осям, то область пространства-времени, которую мы можем наблюдать, будет иметь форму конуса.





СПЕКТР КОСМИЧЕСКОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА COBE

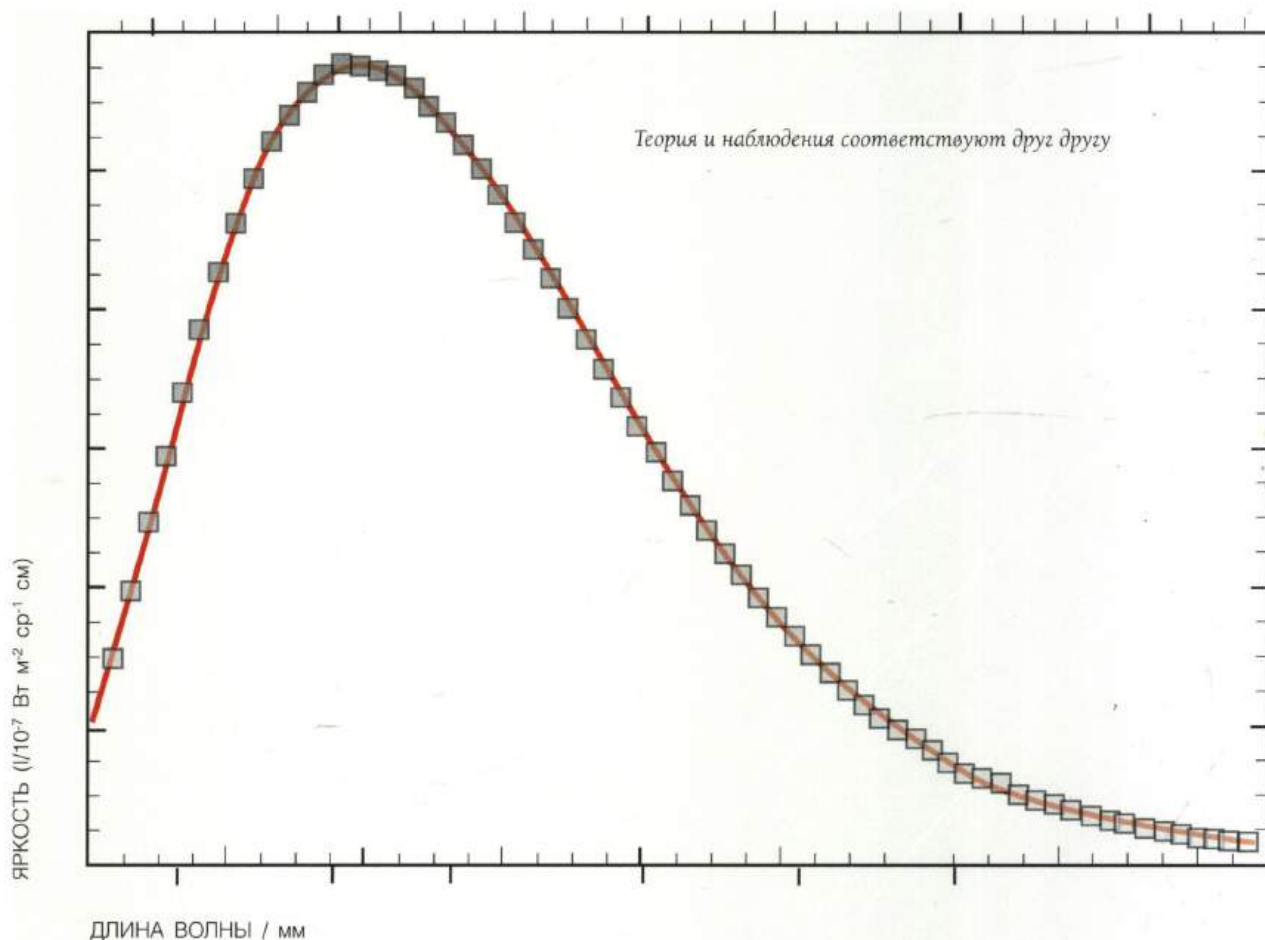
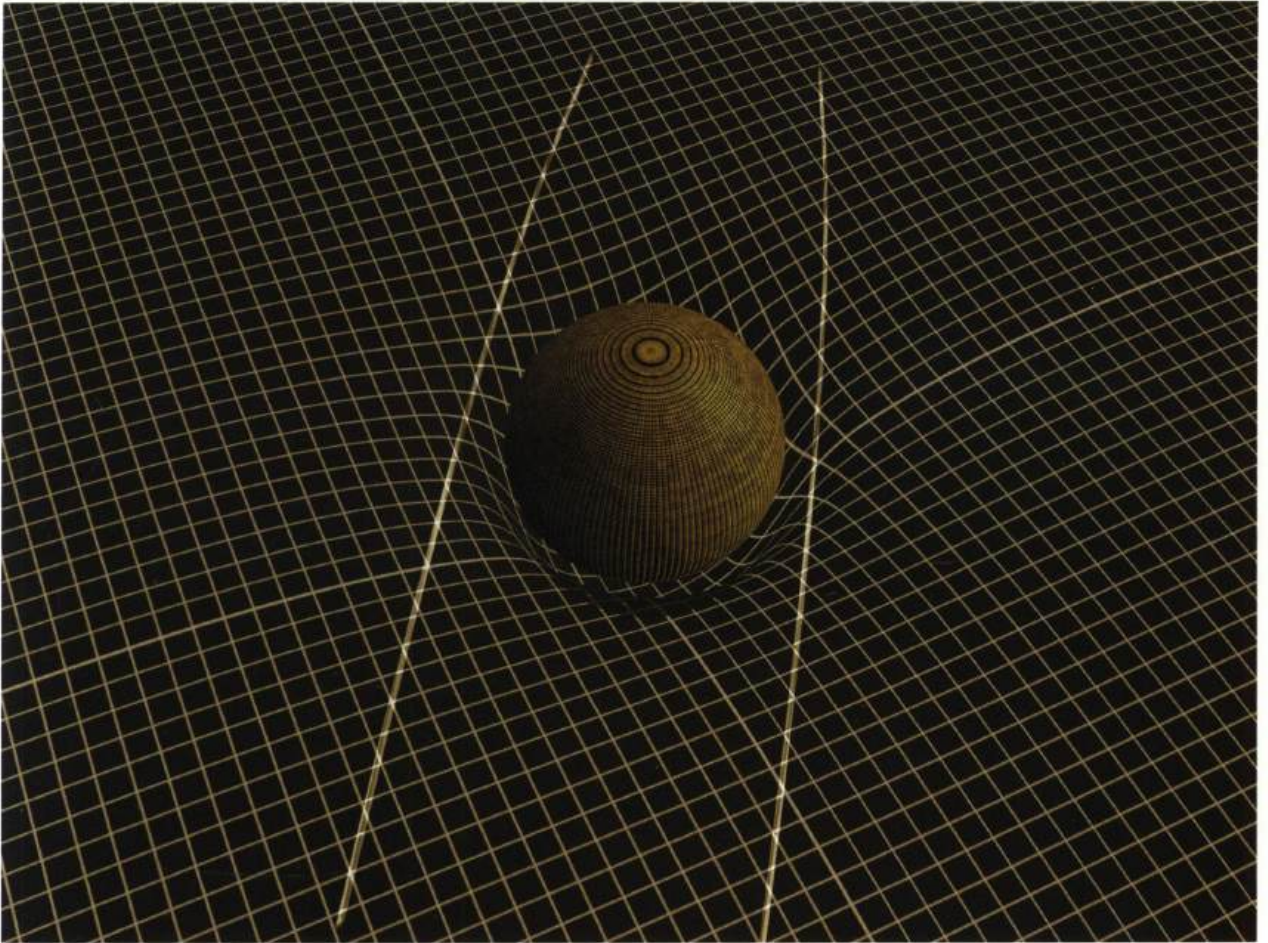


Рис. 2.6. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА МИКРОВОЛНОВОГО ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Спектр микроволнового космического фонового излучения — распределение интенсивности по частоте — характерен для нагретого тела. Чтобы излучение пришло в тепловое равновесие, оно должно было многократно рассеяться на веществе. А следовательно, в нашем световом конусе наверняка было достаточно вещества, чтобы световые лучи искривлялись на встречу друг другу.

товых лучей из далеких галактик, которые достигают нас в настоящий момент. В системе координат, где время откладывается по вертикальной оси, а пространство — по горизонтальным, это конус с вершиной в точке, где находимся мы. Когда мы движемся в прошлое — вниз от вершины к основанию конуса, — то видим, как выглядели галактики все раньше и раньше. Поскольку Вселенная расширяется и когда-то все объекты в ней были гораздо ближе друг к другу, мы, глядя в прошлое, заглядываем в области, где вещество имело более высокую плотность. Мы также замечаем слабое фоновое микроволновое излучение, которое попадает к нам по световому конусу из ранних времен, когда Вселенная была гораздо плотнее и горячее, чем теперь. Если настроить приемники на разные частоты

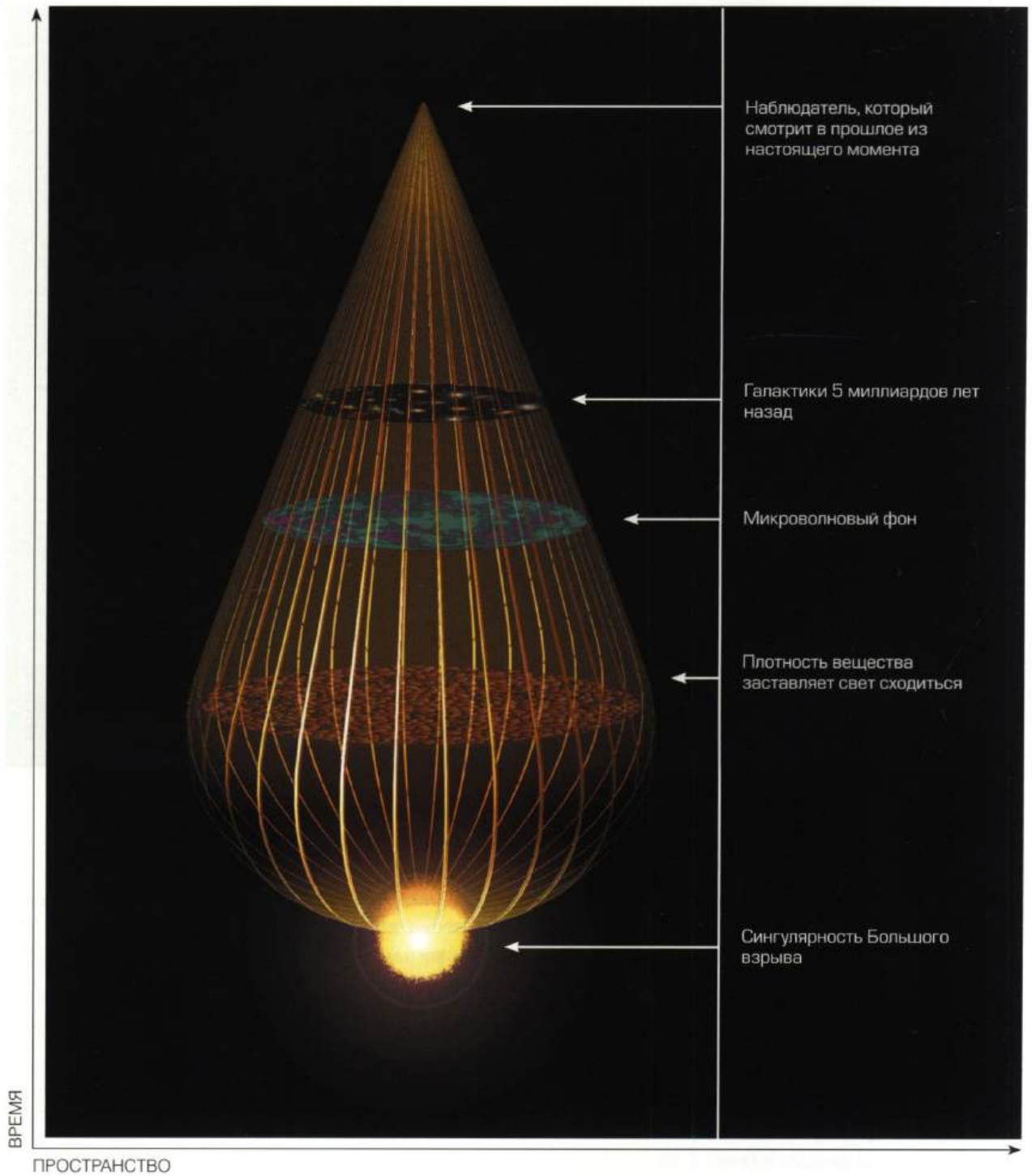


микроволнового излучения, можно измерить его спектр (распределение мощности по частоте) и увидеть, что это спектр, характерный для излучения тела при температуре 2,7 градуса выше абсолютного нуля. Такое излучение пищу не разморозит, однако поскольку его спектр так точно соответствует модели излучения тела при температуре 2,7 градуса, это говорит нам о том, что излучение пришло из областей пространства, непроницаемых для микроволн (рис. 2.6).

Таким образом, можно сделать вывод, что наш световой конус, обращенный в прошлое, должен был пройти сквозь какое-то количество вещества. Этого вещества хватает, чтобы искривлять пространство-время, поэтому лучи света в нашем световом конусе прошлого искривляются и сходятся (рис. 2.7).

Рис. 2.7. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Поскольку гравитация притягивает, вещество всегда искривляет пространство-время, и световые лучи сходятся друг к другу./





По мере углубления в прошлое сечения нашего светового конуса достигают максимального размера, а затем снова уменьшаются. Наше прошлое имеет форму груши (рис. 2.8).

Чем дальше уходишь в прошлое по световому конусу прошлого, тем сильнее положительная плотность энергии вещества заставляет световые лучи сходиться. Сечение светового конуса сузится до нуля за конечное время. Это значит, что все вещество внутри светового конуса окажется в области, границы которой сужаются до нуля. Поэтому не приходится удивляться, что мы с Пенроузом сумели доказать, что в математической модели общей теории относительности время должно иметь начало в результате Большого взрыва. Аналогично можно доказать, что у времени будет конец, когда звезды и галактики схлопнутся под воздействием собственной гравитации и образуют черные дыры. Мы обошли антиномию чистого разума Канта, отказавшись от лежавшего в ее основе предположения, что время имеет смысл независимо от Вселенной. Наша статья, где доказано, что у времени было начало, заняла второе место в конкурсе Фонда исследований гравитации в 1968 году, и мы с Роджером на двоих получили неслыханно щедрую награду в 300 долларов. Сомневаюсь, чтобы другие статьи, получившие призы в тот год, имели хоть какую-нибудь научную ценность.

Отзывы на нашу работу были противоречивыми. Она огорчила многих физиков, зато привела в восторг религиозных деятелей, которые верили в сотворение мира и решили, что вот тому научное доказательство. Между тем Лифшиц и Халатников оказались в неловком положении. Им нечего было возразить против математических теорем, которые мы доказали, но при советском режиме они не могли признать, что ошиблись, а права была западная наука. Однако они нашли выход: обнаружили более общее семейство решений с сингулярностью, которые не требовали таких особых оговорок, как прежние решения. Это дало Лифшицу и Халатникову возможность утверждать, что сингулярности, а с ними и начало и конец времени — открытие советских ученых.

Рис. 2.8. ВРЕМЯ ИМЕЕТ ФОРМУ ГРУШИ

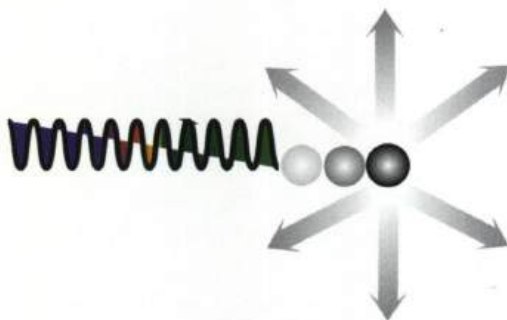
Если вернуться по нашему световому конусу в прошлое, окажется, что он искривлен веществом в ранней Вселенной. Вся наблюдаемая Вселенная заключена в области, чьи границы в момент Большого взрыва сжимаются до нуля. Это и есть сингулярность — место, где плотность вещества бесконечна, а законы классической общей теории относительности не действуют.



ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ



Низкочастотные волны меньше влияют на скорость частицы



Высокочастотные волны сильнее влияют на скорость частицы



Чем больше длина волны, при помощи которой наблюдают частицу, тем больше неопределенность местоположения частицы

Чем короче длина волны, при помощи которой наблюдают частицу, тем точнее определяется местоположение частицы

Важным шагом в открытии квантовой теории стало предположение, которое выдвинул Макс Планк в 1900 году: свет дискретен и состоит из крошечных блоков — квантов. Но хотя квантовая гипотеза Планка, очевидно, объясняла наблюдения излучения нагретых тел, весь масштаб следствий из нее стал понятен лишь к середине двадцатых годов XX века, когда немецкий ученый Вернер Гейзенберг сформулировал свой знаменитый принцип неопределенности.

Гейзенберг отметил, что из гипотезы Планка следует, что чем точнее пытаешься измерить местоположение частицы, тем хуже измеряется ее скорость — и наоборот.

А точнее, Гейзенберг показал, что произведение неопределенности положения частицы и неопределенности ее импульса должно быть больше постоянной Планка — величины, тесно связанной с количеством энергии, содержащейся в одном кванте света.



УРАВНЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА



Большинству физиков была не по душе мысль о начале и конце времени. Поэтому они указывали, что нельзя ожидать, что такая математическая модель хорошо опишет пространство-время в окрестностях сингулярности. Дело в том, что, как мы отмечали в главе 1, общая теория относительности, описывающая гравитационное взаимодействие, — это классическая теория, а потому она не учитывает неопределенность, которую вносит квантовая теория, управляющая всеми остальными известными нам взаимодействиями. Это несоответствие не играет никакой роли почти что нигде и никогда во Вселенной, поскольку масштабы, на которых пространство-время искривляется, очень велики, а масштабы, на которых нужно учитывать квантовые эффекты, очень малы. Однако в окрестностях сингулярности эти масштабы сопоставимы, поэтому эффекты квантовой гравитации начинают играть важную роль. Так что наши с Пенроузом теоремы сингулярности на самом деле установили, что классическая область пространства-времени неразрывно связана с прошлым, а возможно, и с будущим посредством областей, в которых квантовую гравитацию нужно учитывать. Чтобы разобраться в происхождении Вселенной и узнать, что ее ждет, нужна квантовая теория гравитации, и этому в основном и посвящена книга, которую вы держите в руках.

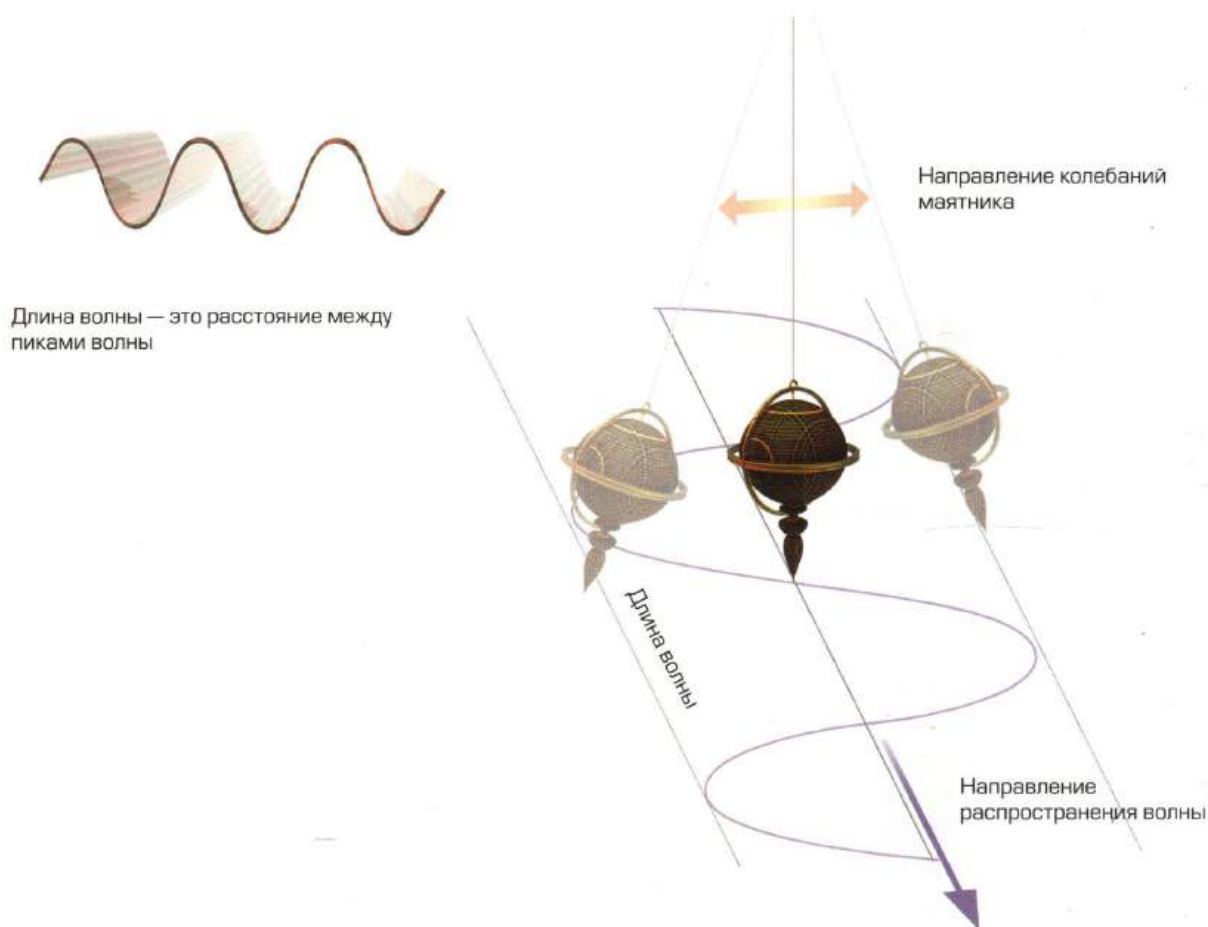
Квантовые теории систем вроде атомов, состоящих из конечного числа частиц, сформулировали в двадцатые годы Гейзенберг, Шредингер и Дирак. (Кстати, Дирак тоже был в числе моих предшественников на Кембриджском кресле, но осо-

ПОЛЕ МАКСВЕЛЛА¹

В 1865 году британский физик Джеймс Клерк Максвелл привел в соответствие все известные законы электричества и магнетизма. Теория Максвелла опирается на существование «полей», передающих действие из одного места в другое. Максвелл понял, что поля, передающие электрические и магнитные возмущения, — это динамические сущности, способные осциллировать и перемещаться в пространстве.

Получившийся в результате такого синтеза электромагнетизм можно описать всего двумя уравнениями, определяющими динамику таких полей. Сам Максвелл вывел первое великое следствие из этих уравнений: электромагнитные волны любых частот распространяются в пространстве с одной и той же постоянной скоростью — скоростью света.

¹ Под «полем Максвелла» автор имеет в виду любое поле, которое может быть описано как линейная совокупность гармонических колебаний и подчиняется уравнениям, имеющим форму уравнений Максвелла, — в частности, электромагнитное поле. — Прим. ред.



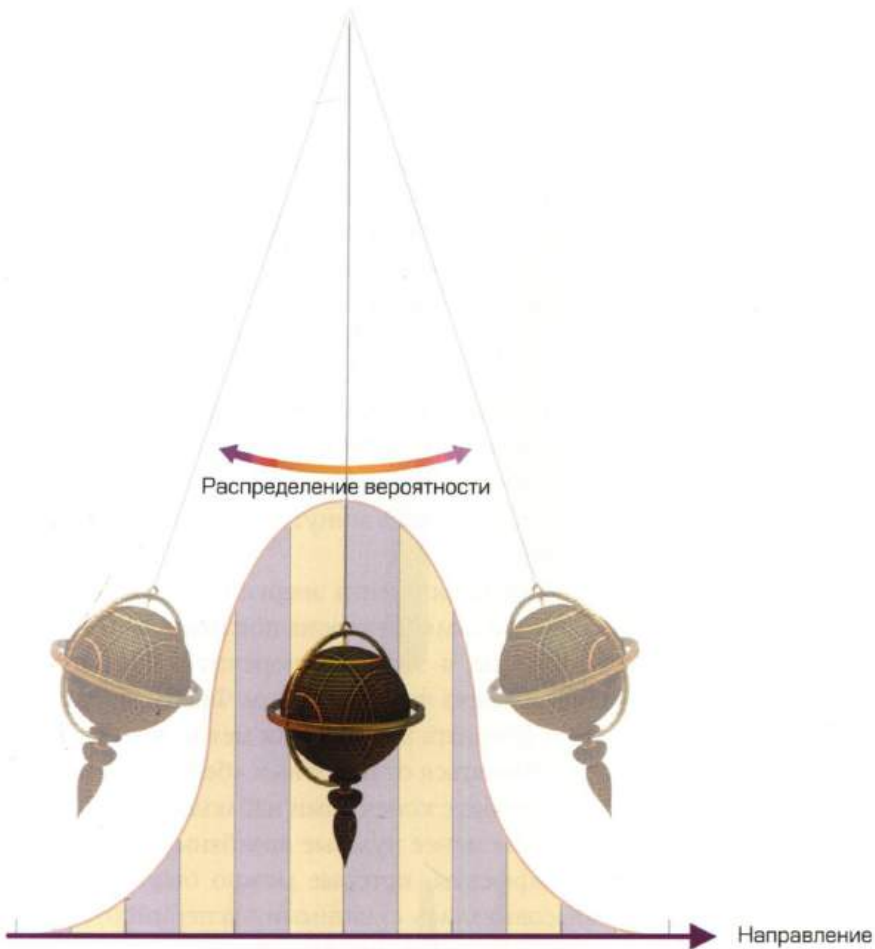
бое оборудование, чтобы его занимать, требуется только мне.) Однако когда ученые попытались распространить идеи квантовой механики на уравнения Максвелла, описывающие электричество, магнетизм и свет, у них сперва ничего не вышло.

В 1865 году британский физик Джеймс Клерк Максвелл привел в соответствие все известные законы электричества и магнетизма. Теория Максвелла опирается на существование «полей», передающих действие из одного места в другое. Максвелл понял, что поля, передающие электрические и магнитные возмущения, — это динамические сущности, способные осциллировать и перемещаться в пространстве.

Получившийся в результате такого синтеза электромагнетизм можно описать всего двумя уравнениями, определяющими динамику таких полей. Сам Максвелл вывел первое великое следствие из этих уравнений: электромагнитные волны любых частот распространяются в пространстве с одной и той же постоянной скоростью — скоростью света.

Рис. 2.9. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ И КОЛЕБАНИЯ МАЯТНИКА

Электромагнитное излучение распространяется в пространстве как волна, а электрическое и магнитное поле при этом осциллируют, подобно маятнику, в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны. Излучение может состоять из нескольких полей с разными длинами волн.



Можно представить себе, что электромагнитное поле состоит из набора колебаний с разной длиной волны (длина волны — это расстояние между гребнями соседних волн). Поле в волне колеблется от одного значения к другому, словно маятник (рис. 2.9).

Согласно квантовой теории, маятник не может находиться в основном состоянии, оно же состояние с минимальной энергией, в том положении, когда он направлен прямо вниз и обладает минимальной энергией, потому что в этом случае у маятника было бы одновременно и определенное положение, и определенная скорость — ноль. Это было бы нарушением принципа неопределенности, который не позволяет точно определить одновременно и скорость, и положение. Произведение неопределенности положения и неопределенности импульса должно всегда быть больше величины, известной как постоянная Планка. Каждый раз записывать это число слишком долго, поэтому мы обозначаем постоянную Планка специальным символом: $\hbar$.

Рис. 2.10. МАЯТНИК И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ

Согласно принципу Гейзенберга, маятник не может быть направлен абсолютно точно вниз и двигаться с нулевой скоростью. Квантовая теория предсказывает, что даже в самом низком энергетическом состоянии у маятника должны быть какие-то минимальные флуктуации — так называемые нулевые колебания.

Следовательно, положение маятника может быть задано как распределение вероятности. В основном состоянии самое вероятное положение — маятник направлен строго вниз, но есть некоторая вероятность, что он отклонится от вертикали на небольшой угол.

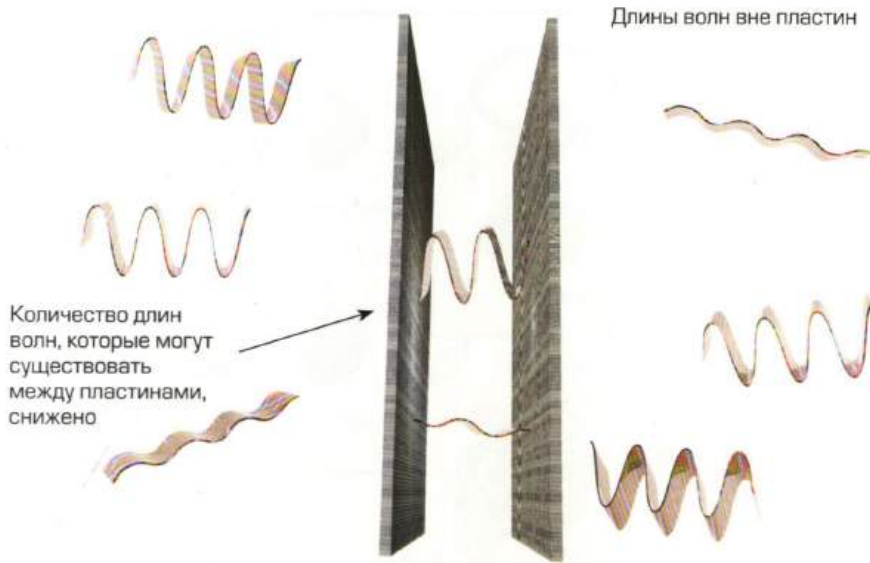


Итак, вопреки ожиданиям, энергия маятника в основном состоянии, или в состоянии минимальной энергии, не равна нулю. Даже в основном состоянии маятник, как и любая другая осциллирующая система, должен обладать каким-то минимальным количеством так называемых нулевых колебаний. Это значит, что маятник не обязательно направлен прямо вниз, — есть некоторая вероятность, что он немного отклоняется от вертикали (рис. 2.10). Подобным же образом даже в вакууме в состоянии минимальной энергии волны электромагнитного поля не равны нулю — у них могут быть какие-то небольшие амплитуды. Чем выше частота колебаний маятника или частота волны (количество колебаний в минуту), тем выше окажется энергия основного состояния.

Таким образом, прямолинейная оценка энергии нулевых колебаний электромагнитного поля и поля электрона показывает, что заряд и масса электрона бесконечны, а это противоречит наблюдениям. Однако в сороковые годы XX века физики Ричард Фейнман, Джулиан Швингер и Синъитиро Томонага разработали метод, который позволял последовательно избавляться от подобных «бесконечностей», «вычитать» их и работать только с конечными наблюдаемыми значениями массы и заряда. Тем не менее нулевые колебания по-прежнему вызывали небольшие эффекты, которые можно было измерить и которые хорошо согласовывались с данными экспериментов. Такие же «схемы вычитания», позволявшие избежать бесконечностей, действуют и в поле Янга–Миллса, теорию которого выдвинули Чжэньнин Янг и Роберт Миллс. Теория Янга–Миллса — это логическое расширение теории Максвелла: она объединяет два других фундаментальных взаимодействия — так называемые слабое и сильное ядерные взаимодействия.

Однако нулевые колебания играют гораздо более важную роль в квантовой теории гравитации. Здесь снова каждой длине волны соответствует энергия нулевых колебаний. Поскольку длины волн максвелловского поля¹ могут быть сколь угодно малы, в каждой области пространства-времени содержится бесконечное количество разных длин волн и бесконечное количество энергии основного состояния. Поскольку плотность энергии, как и плотность вещества, служит источником гравитации, бесконечная плотность энергии должна означать, что во Вселенной достаточно гравитационного

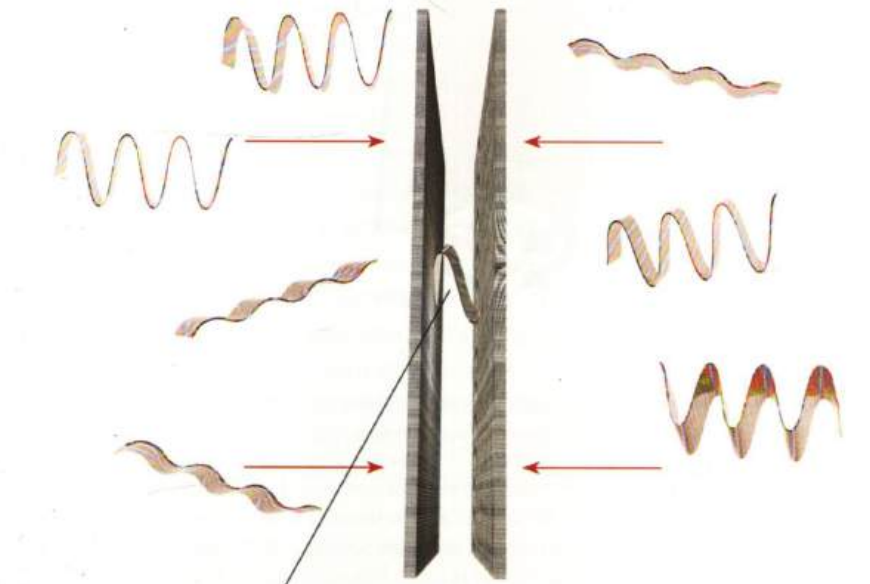
¹Здесь под «максвелловским полем» автор подразумевает гравитационное поле, но пишет «максвелловское» для сохранения общего характера утверждения. — *Прим. ред.*



Длины волн вне пластин

Рис. 2.11. ЭФФЕКТ КАЗИМИРА

Существование нулевых колебаний подтверждено экспериментально. О них свидетельствует так называемый эффект Казимира — слабое притяжение, возникающее между параллельными металлическими пластинами.



Плотность энергии нулевых колебаний снаружи пластин выше

Плотность энергии нулевых колебаний между пластинами меньше, чем снаружи, отчего пластины притягиваются друг к другу

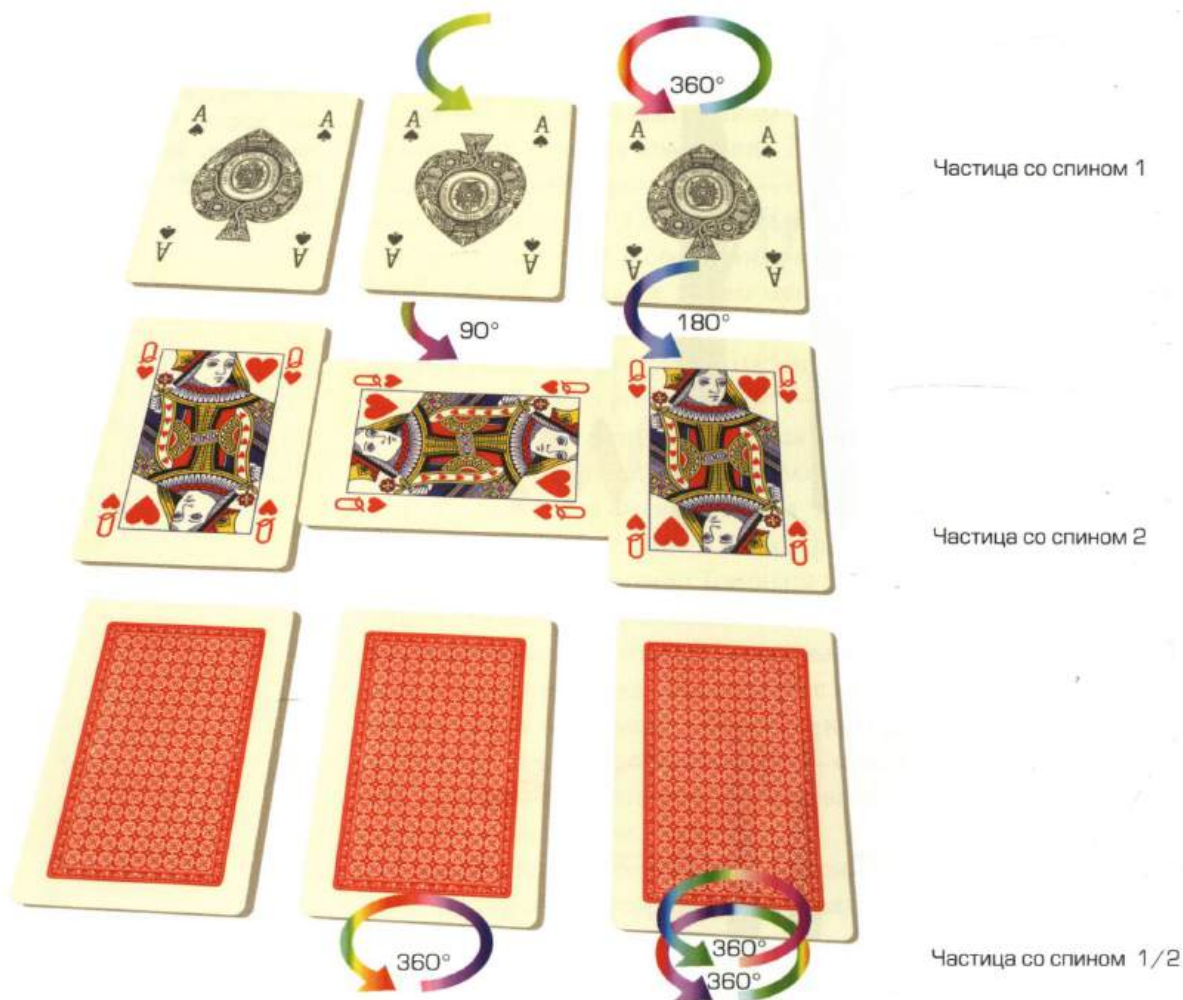


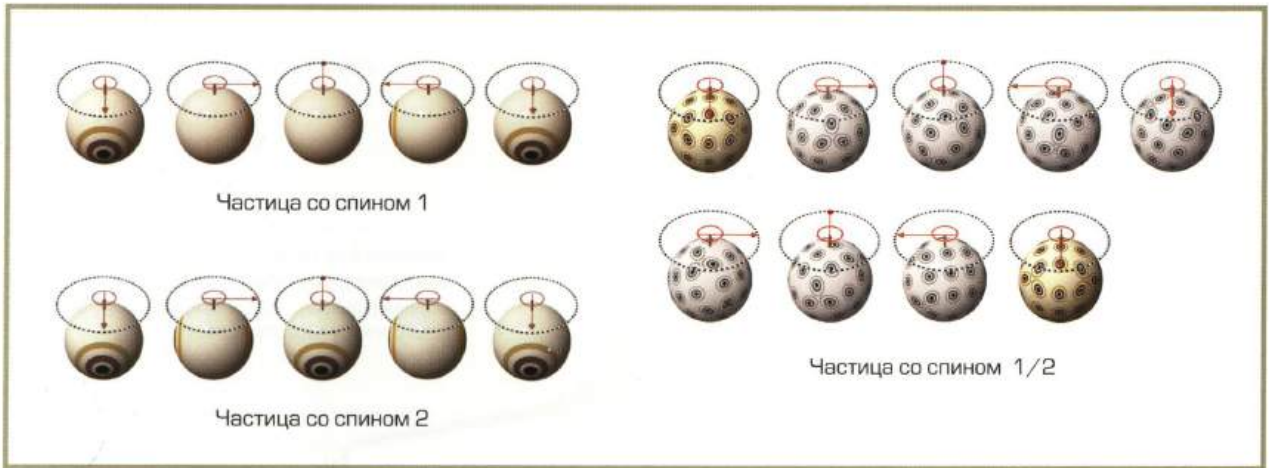
Рис. 2.12. СПИН

У всех частиц есть свойство, которое называется спин; оно определяет, как частица выглядит с разных сторон. Это можно проиллюстрировать на примере колоды карт. Возьмем туза пик. Чтобы он снова выглядел как раньше, нужно повернуть его полностью — на 360 градусов. Поэтому говорят, что у него спин равен 1.

С другой стороны, дама червей нарисована симметрично — с двумя головами. Поэтому, чтобы она выглядела так же, как раньше, достаточно повернуть ее на

180 градусов — на половину оборота. Говорят, что у нее спин равен 2. Аналогичным образом можно представить себе предметы со спином 3 и больше, которые будут выглядеть одинаково даже при небольшом повороте.

Чем больше спин, тем меньше доля полного оборота, на которую нужно повернуть частицу, чтобы она снова выглядела так же, как прежде. Важно отметить, что бывают частицы, которые выглядят по-прежнему только после двух полных оборотов. Говорят, что у таких частиц спин равен $1/2$.



притяжения, чтобы свернуть пространство-время в одну точку, — а этого, очевидно, не произошло.

Казалось бы, можно попытаться решить проблему мнимого противоречия между теорией и наблюдением, заявив, что нулевые колебания не оказывают гравитационного воздействия, но это не поможет. Энергию нулевых колебаний можно зарегистрировать при помощи эффекта Казимира. Если поместить пару металлических пластин на небольшом расстоянии параллельно друг другу в вакууме, окажется, что количество длин электромагнитных волн, возникающих между пластинами, будет немного меньше, чем снаружи¹. Это значит, что плотность энергии нулевых колебаний между пластинами, оставаясь бесконечной, оказывается меньше, чем бесконечная плотность энергии снаружи, и разница между ними конечна (рис. 2.11). Разница в плотности энергии обеспечивает силу, притягивающую пластины друг к другу, и эту силу можно измерить экспериментально. Согласно общей теории относительности силы — это такой же источник гравитации, как и вещество, поэтому было бы нелогично игнорировать гравитационное воздействие такой разницы в энергиях.

Есть и другое возможное решение проблемы: предположить, что существует космологическая константа вроде той, которую ввел в свои уравнения Эйнштейн, когда пытался создать статичную модель вселенной. Если значение этой константы будет равно минус

ОБЫЧНЫЕ ЧИСЛА

$$A \times B = B \times A$$

ГРАССМАНОВЫ ЧИСЛА

$$A \times B = -B \times A$$

¹ Это происходит из-за того, что пластины образуют своего рода резонатор, где могут возбуждаться электромагнитные волны только определенных длин. — Прим. ред.



СУПЕРПАРТНЕРЫ



Фермионы с полуцелым спином (например, со спином) составляют обычное вещество. Энергия основного состояния у них отрицательна.

Бозоны — частицы с целым спином (например 0, 1, 2), соответствующие супергравитации с $N = 8$. Энергия основного состояния у них положительна.

Рис. 2.13

Все известные частицы во Вселенной делятся на два типа — на фермионы и бозоны. Фермионы — частицы с полуцелым спином (например $1/2$), из них состоит обычное вещество. Энергия основного состояния у них отрицательна.

Бозоны — частицы с целым спином (например 0, 1, 2), они обеспечивают взаимодействие между фермионами, например свет или гравитацию. Энергия основного состояния у них положительна. Теория супергравитации предполагает, что у каждого фермиона и каждого бозона есть суперпартнер со спином либо на $1/2$ больше,

либо на $1/2$ меньше. Например, у фотона (это бозон) спин равен 1. Его энергия основного состояния положительна. Суперпартнер фотона — фотино — обладает спином, то есть представляет собой фермион. Следовательно, его энергия основного состояния отрицательна.

В этой схеме супергравитации бозонов и фермионов у нас всегда поровну. Если на одну чашу весов поместить положительные энергии основного состояния бозонов, а на другую — отрицательные энергии основного состояния фермионов, то эти энергии взаимно уничтожатся, что избавит нас от самых больших бесконечностей.



МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ЧАСТИЦ

1. Если бы точечные частицы и вправду существовали в виде конкретных объектов вроде бильярдных шаров, то при соударении две частицы отражались бы друг от друга и переходили на две другие траектории.



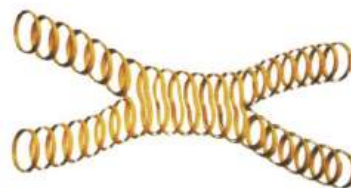
2. Вот что на самом деле происходит, когда взаимодействуют две частицы, хотя эффект гораздо более зрелищный.



3. Соударение двух частиц, например электрона и его античастицы позитрона, с точки зрения квантовой теории поля. Частицы ненадолго аннигилируют, при этом высвобождается огромное количество энергии и создается фотон. Затем фотон исчезает, создавая новую электрон-позитронную пару. Выглядит это так, словно после соударения пара разлетелась по двум новым траекториям.



4. Если частицы представляют собой не точки нулевого измерения, а одномерные струны, в которых осциллирующие петли вибрируют как электрон и позитрон, то при соударении, когда они аннигилируют, они создают новую струну, которая вибрирует иначе. Высвобождая энергию, струна делится надвое, и две новые струны тянутся по новым траекториям.



5. Если представить себе первоначальные струны не в виде отдельных моментов, а в виде непрерывной во времени истории, то в результате получается мировой лист струны.





Рис. 2.14. КОЛЕБАНИЯ СТРУН

Основные объекты теории струн — не частицы, занимающие определенную точку в пространстве, а одномерные струны. Иногда у этих струн есть свободные концы, иногда они замыкаются сами на себя, образуя петли.

Эти струны, подобно скрипичным, могут вибрировать на определенных (резонансных) частотах, когда длины волн точно вписываются между двух концов струны. Однако у скрипичных струн разные резонансные частоты порождают разные музыкальные ноты, а в теории струн разные колебания порождают разные массы и разные заряды, которые мы воспринимаем как отдельные фундаментальные частицы. Грубо говоря, чем короче длина волны, тем больше масса соответствующей частицы.

бесконечности, она может уравновесить бесконечное значение энергии нулевых колебаний в свободном пространстве, но такая космологическая константа все же была бы очень большой натяжкой и требовала бы невероятно точной настройки.

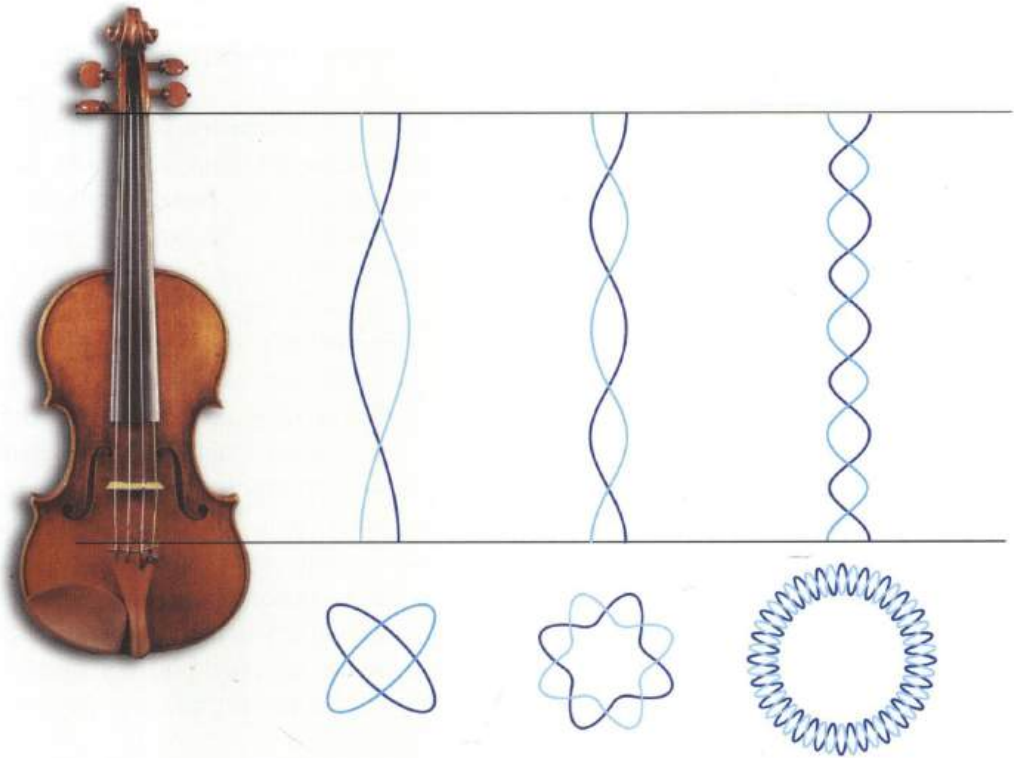
К счастью, в семидесятые годы XX века была открыта симметрия совершенно нового рода, обеспечивающая естественный физический механизм, позволяющий уравновесить бесконечности, возникающие из-за нулевых колебаний. Эта особенность современных математических моделей пространства-времени называется суперсимметрией, и ее можно описать разными способами. В частности, можно сказать, что помимо измерений, которые мы наблюдаем, у пространства-времени есть дополнительные измерения. Они называются измерениями Грассмана, поскольку измеряются в числах, известных как грассмановы переменные, а не в обычных действительных числах. Когда умножаешь действительные числа, их можно менять местами — то есть неважно, в каком порядке умножаешь, поскольку 6 на 4 — это то же самое, что 4 на 6 . А грассмановы переменные, как говорят математики, «антикоммутируют»: x на y будет равно $-y$ на x .

Первоначально суперсимметрию рассматривали как инструмент, позволяющий избавиться от бесконечности в материальных полях и полях Янга–Миллса в пространстве-времени, где и измерения в действительных числах, и грассмановы измерения плоские, а не искривленные. Но было естественно обобщить их и на случаи, когда измерения в действительных числах и грассмановы измерения искривлены. Это породило много теорий «супергравитации», требовавших разного количества суперсимметрии.

В частности, из суперсимметрии следует, что у любого поля или частицы должен быть «суперпартнер» со спином либо на $1/2$ больше, либо на $1/2$ меньше (рис. 2.12).

Энергия основного состояния бозонов, полей с целочисленными спинами ($0, 1, 2$ и так далее), положительна. С другой стороны, энергия основного состояния фермионов, полей с полуцелыми спинами ($1/2, 3/2$ и так далее), отрицательна. Поскольку в теориях супергравитации фермионов и бозонов поровну, величайшие бесконечности взаимоуничтожаются (рис. 2.13).

Остается вероятность, что после этого сохранятся бесконечности поменьше. Ни у кого пока не хватило терпения подсчитать, действительно ли теории супергравитации приводят к конечным числам. Считается, что самому прилежному студенту нужно на это лет двести, и где гарантия, что он не ошибется на второй странице? И все



же до 1985 года большинство ученых было убеждено, что в целом теории суперсимметричной супергравитации позволяют избавиться от бесконечностей.

Тут мода вдруг изменилась. Ученые объявили, что нет никаких причин для уверенности в том, что в теориях супергравитации действительно нет бесконечностей, а из этого сделали вывод, что эти теории в принципе несостоятельны. Взамен предложили другую теорию — суперсимметричную теорию струн: считалось, что это единственный способ увязать гравитацию с квантовой теорией. Струны (как и обычные струны, к которым мы привыкли) — это длинные одномерные объекты. Кроме длины, у них ничего нет. Струны в теории струн движутся сквозь фоновое пространство-время. Дрожание струны интерпретируется как частица (рис. 2.14).

Если струны, помимо обычных измерений, обозначаемых числами, имеют еще и грассмановы измерения, то дрожание соответствует бозонам и фермионам. В таком случае положительная и отрицательная энергия основного состояния взаимоуничтожаются с такой



точностью, что не остается никаких бесконечностей, даже тех, что поменьше. Сторонники теории суперструн объявили ее Теорией Всего.

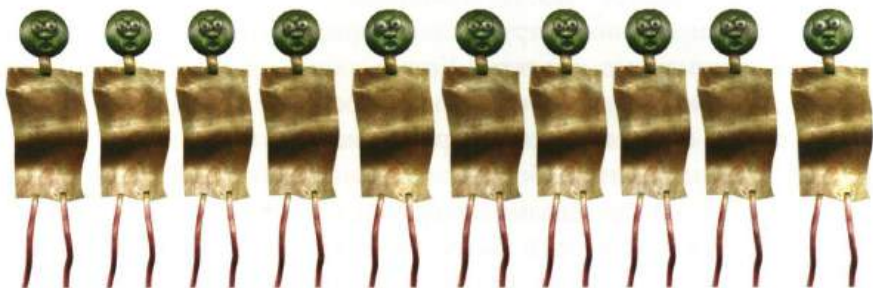
В будущем историкам науки наверняка будет интересно проследить, как менялись мнения среди физиков-теоретиков. В течение нескольких лет теория струн правила безраздельно, а супергравитацию отменили как теорию сугубо приблизительную, которая оправдывается лишь при низких энергиях. Особенно обидно звучали слова «низкие энергии», хотя в таком контексте низкие энергии — это частицы, энергия которых ниже, чем энергия частицы взорвавшегося тринитротолуола, умноженная на миллиард миллиардов. Поскольку супергравитация была лишь приближением для низких энергий, то не могла претендовать на титул фундаментальной теории Вселенной. Считалось, что теорию всего можно построить лишь на основе одной из пяти возможных теорий суперструн. Но которая из них описывала нашу Вселенную? И как сформулировать теорию суперструн, если выйти за рамки приближения, согласно которому струны изображались как поверхности с одним пространственным и одним временным измерением, движущиеся сквозь плоское фоновое пространство-время? Разве в таком случае струны не искривляют фоновое пространство-время?

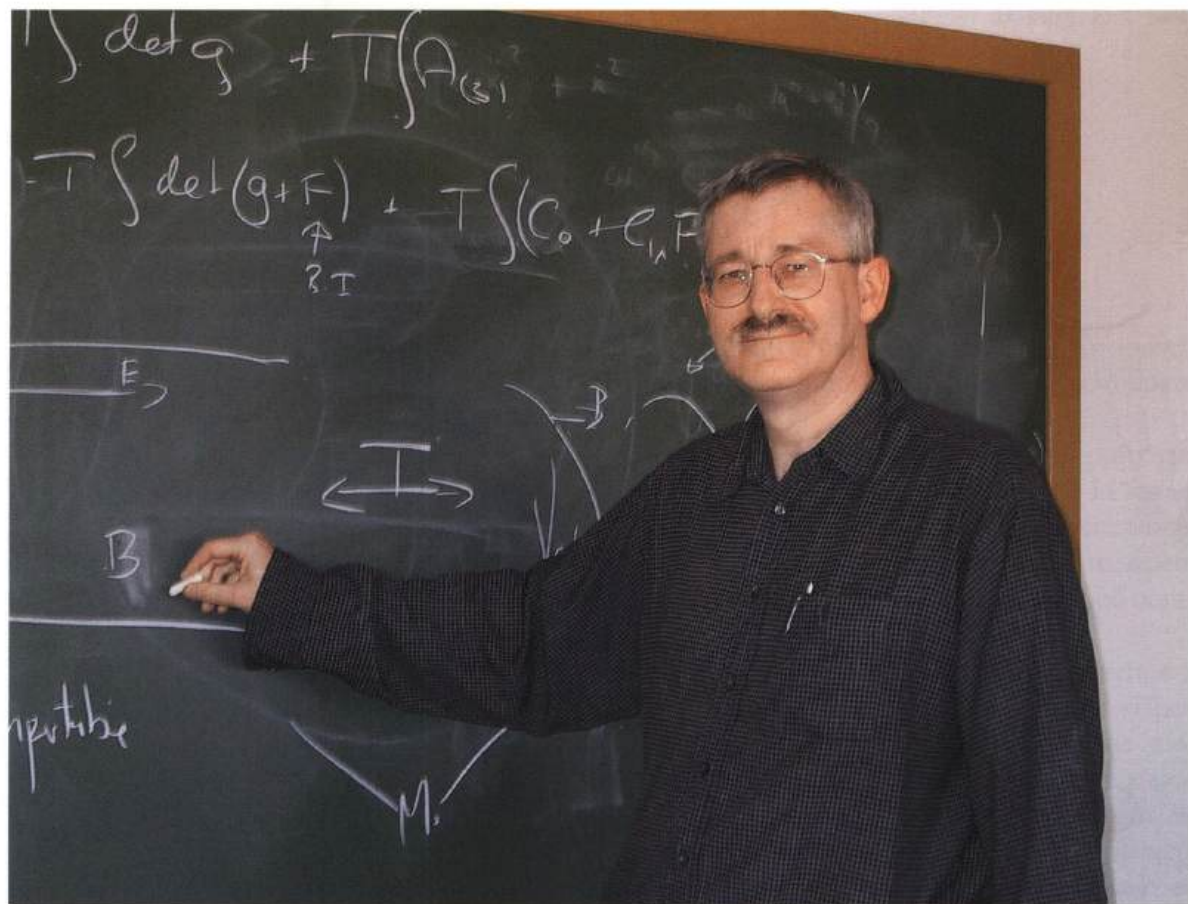
После 1985 года постепенно стало понятно, что теория струн не дает полной картины. Для начала ученые поняли, что струны — лишь один член обширного класса объектов, которые могут насчитывать и больше одного измерения. Пол Таунсенд — как и я, сотрудник факультета прикладной математики и теоретической физики в Кембридже, проделавший фундаментальные исследования в этой области, — назвал эти объекты p -бранами. P -брана обладает длиной в p измерениях. Таким образом, брана $p=1$ — это струна, брана $p=2$ — поверхность или мембрана и так далее (рис. 2.15). Нет ника-

Рис. 2.15. P -БРАНЫ

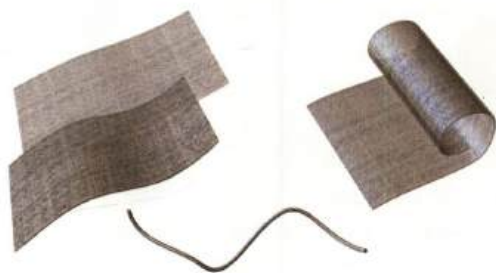
P -браны — это объекты, у которых p измерений. Их частные случаи — струны ($p=1$) и мембраны ($p=2$), однако в десяти- и одиннадцатимерном пространстве возможны и более высокие значения p . Часто некоторые или все p -измерения свернуты в тор.

Мы исходим из той
самоочевидной истины,
что все p -браны созданы
равными!

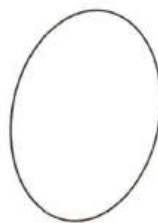




Пол Таунсенд, главный специалист по р-бранам



Пространственная структура нашей Вселенной может содержать как протяженные, так и свернутые измерения. Мембраны лучше видны, когда они свернуты



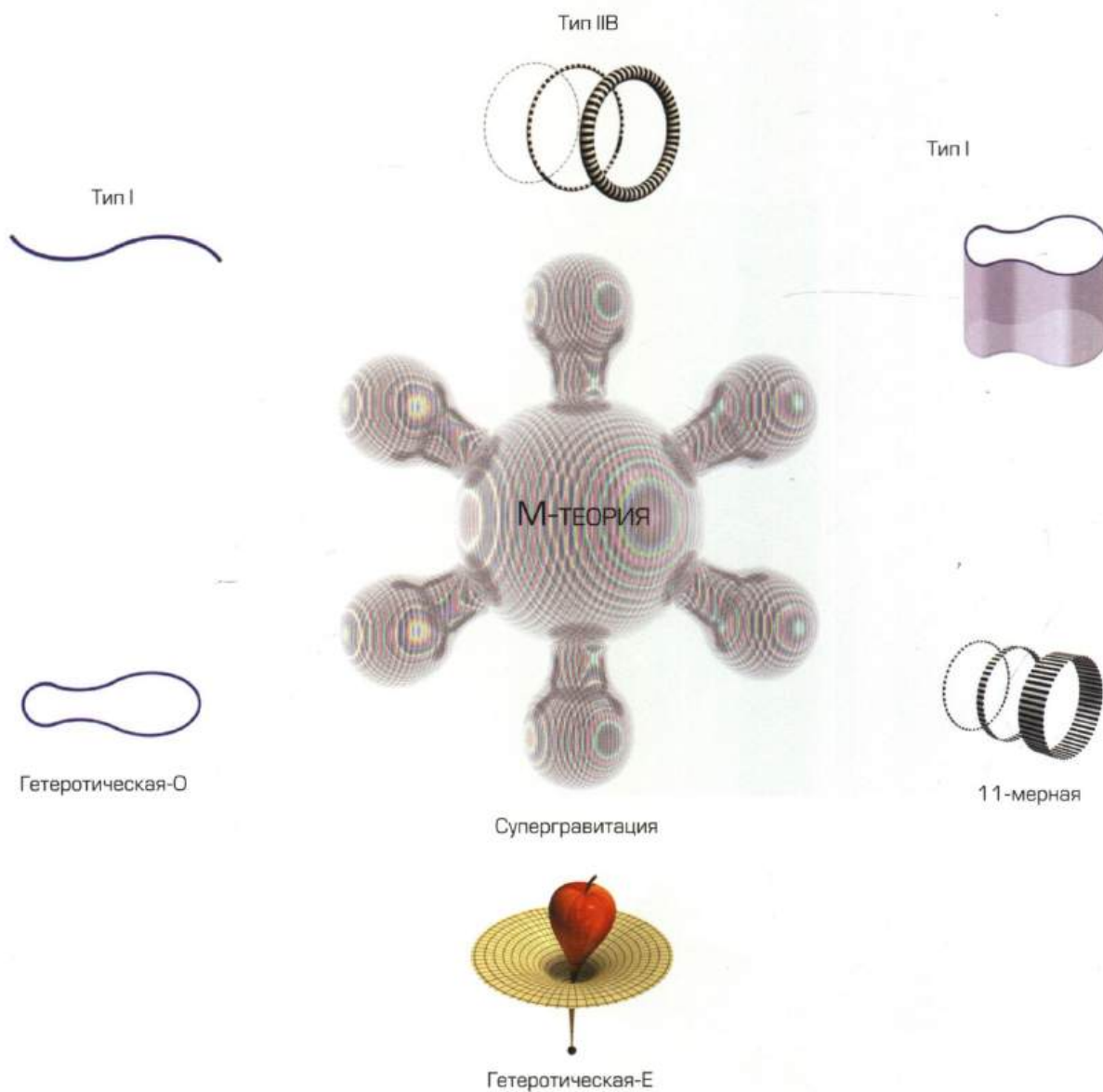
1-брана, она же свернутая струна



2-брана, она же лист, свернутый в тор



Рис. 2.16. ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ?



Все пять теорий струн, а также одиннадцатимерную супергравитацию объединяет сеть взаимоотношений — так называемых дуальностей. Наличие дуальностей показывает, что разные теории струн — лишь разные выражения одной и той же общей теории, получившей название «М-теория».



До начала девяностых казалось, что существует пять отдельных теорий струн, независимых и никак не связанных друг с другом.



М-теория объединяет пять теорий струн в пределах единой теоретической концепции, однако многие ее свойства еще предстоит понять.

ких причин предпочитать случай струны $p=1$ всем другим значениям p . Напротив, надо следовать принципу p -брановой демократии: все p -браны созданы равными.

Все p -браны могут служить решениями уравнений теорий супергравитации в 10 или 11 измерениях. Казалось бы, 10 или 11 измерений — это совсем не похоже на привычное нам пространство-время, однако главная мысль тут в том, что другие 6 или 7 измерений свернуты и так малы, что мы их не замечаем, а знаем лишь об остальных 4, больших и почти плоских.

Должен признаться, что лично мне было трудно поверить в дополнительные измерения. Но я позитивист, поэтому вопрос «Правда ли существуют дополнительные измерения?» для меня не имеет смысла. Формулировать его следует иначе: достаточно ли хорошо математические модели с лишними измерениями описывают Вселенную? Пока что у нас нет никаких наблюдений, для объяснения которых требовались бы дополнительные измерения. Однако есть вероятность, что мы получим их на Большом адронном коллайдере в Женеве¹. Тем не менее многих, в том числе и меня, заставило серьезно относиться к моделям с дополнительными измерениями то обстоятельство, что между моделями существует сеть неожиданных взаимоотношений — так называемых дуальностей. Эти дуальности показывают, что все модели, в сущности, эквивалентны, то есть все они — разные аспекты одной и той же общей теории, которую назвали М-теория. Не считать сеть дуальностей знаком, что мы на верном пути, — все равно что полагать, будто Бог спрятал окаменелости в горные породы, чтобы натолкнуть Дарвина на ошибочную мысль об эволюции.

¹ К настоящему времени эксперименты на Большом адронном коллайдере также не показали, что у Вселенной обязательно должно быть 10 или 11 измерений. — Прим. ред.

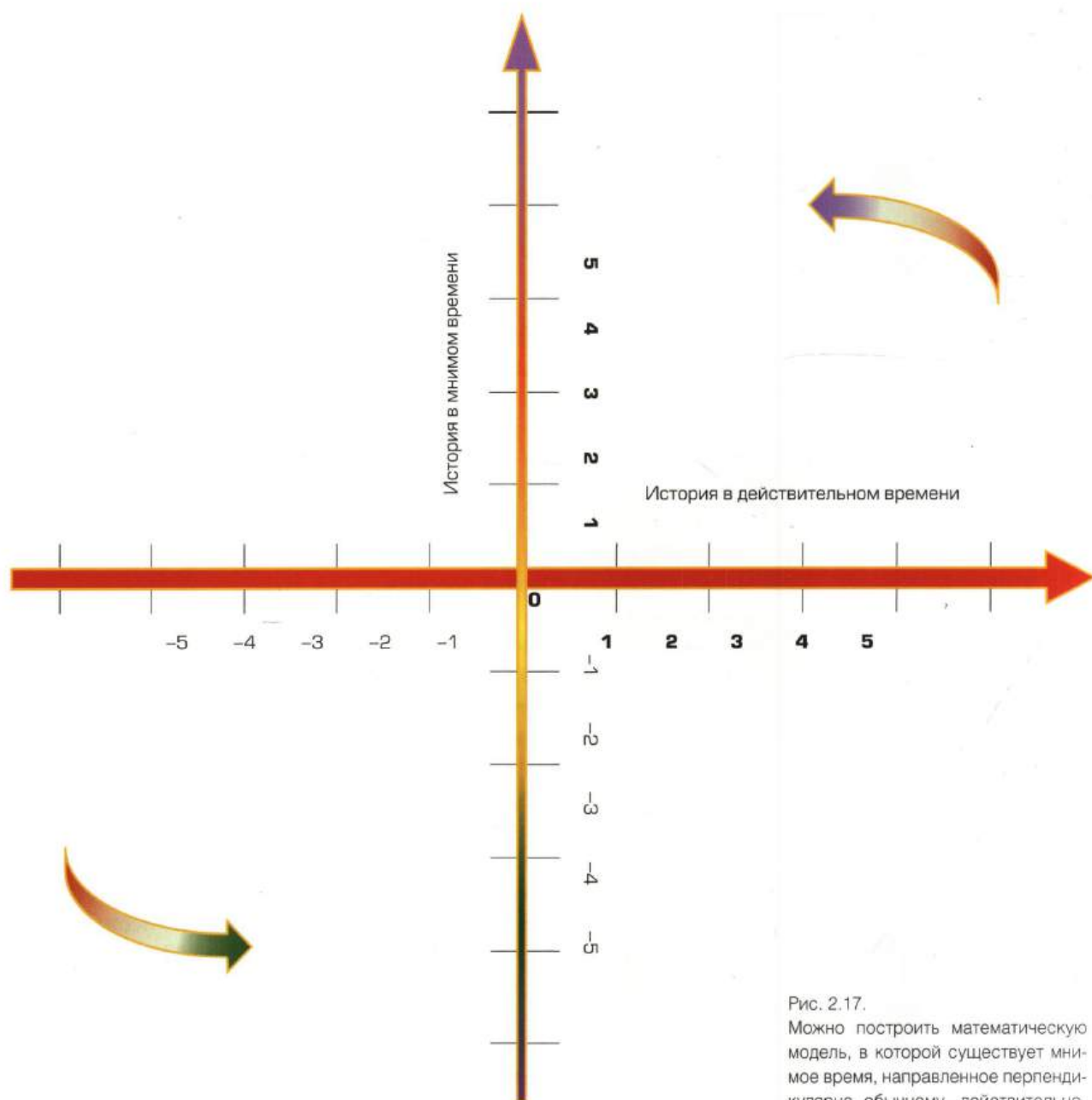
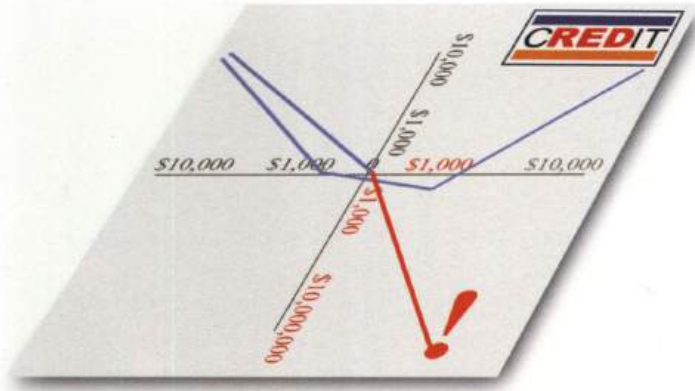


Рис. 2.17.

Можно построить математическую модель, в которой существует мнимое время, направленное перпендикулярно обычному, действительному времени. Законы такой модели позволяют определять историю в мнимом времени через историю в реальном времени и наоборот.



Дуальности показывают, что все пять теорий суперструн описывают одну и ту же физику, а также физически эквивалентны супергравитации (рис. 2.16). Нельзя сказать, что суперструны фундаментальнее супергравитации или наоборот. Нет, это разные выражения одной и той же общей теории: каждая подходит для вычислений в разного рода ситуациях. Поскольку в теориях струн нет бесконечностей, они хороши для того, чтобы сосчитать, что получается при соударении и рассеянии высокоэнергичных частиц. Но они не очень хорошо подходят для описания того, как энергия очень большого числа частиц искривляет Вселенную или создает связанное состояние, например черную дыру. Для таких случаев нужна супергравитация, которая, в сущности, основана на эйнштейновской теории искривленного пространства-времени с некоторыми дополнительными видами вещества. В дальнейшем на страницах этой книги я буду в основном опираться именно на такую картину.

Чтобы описать, какими свойствами квантовая теория наделяет время и пространство, полезно ввести понятие мнимого времени. Казалось бы, это что-то из области фантастики, но на самом деле это общепринятое математическое понятие: время, измеряемое в так называемых мнимых числах. Представьте себе обычные (действительные, вещественные) числа — 1, 2, -3,5 и так далее — на соответствующих точках числовой оси, идущей слева направо: нуль — посередине, положительные действительные числа — справа, отрицательные — слева (рис. 2.17).

Тогда мнимые числа можно изобразить на вертикальной оси: нуль опять же посередине, положительные мнимые числа — на луче, идущем вверх, а отрицательные — на луче, идущем вниз. То есть мни-

Рис. 2.18

Мнимые числа — математическое понятие. Нельзя положить мнимую сумму денег на банковскую карту.

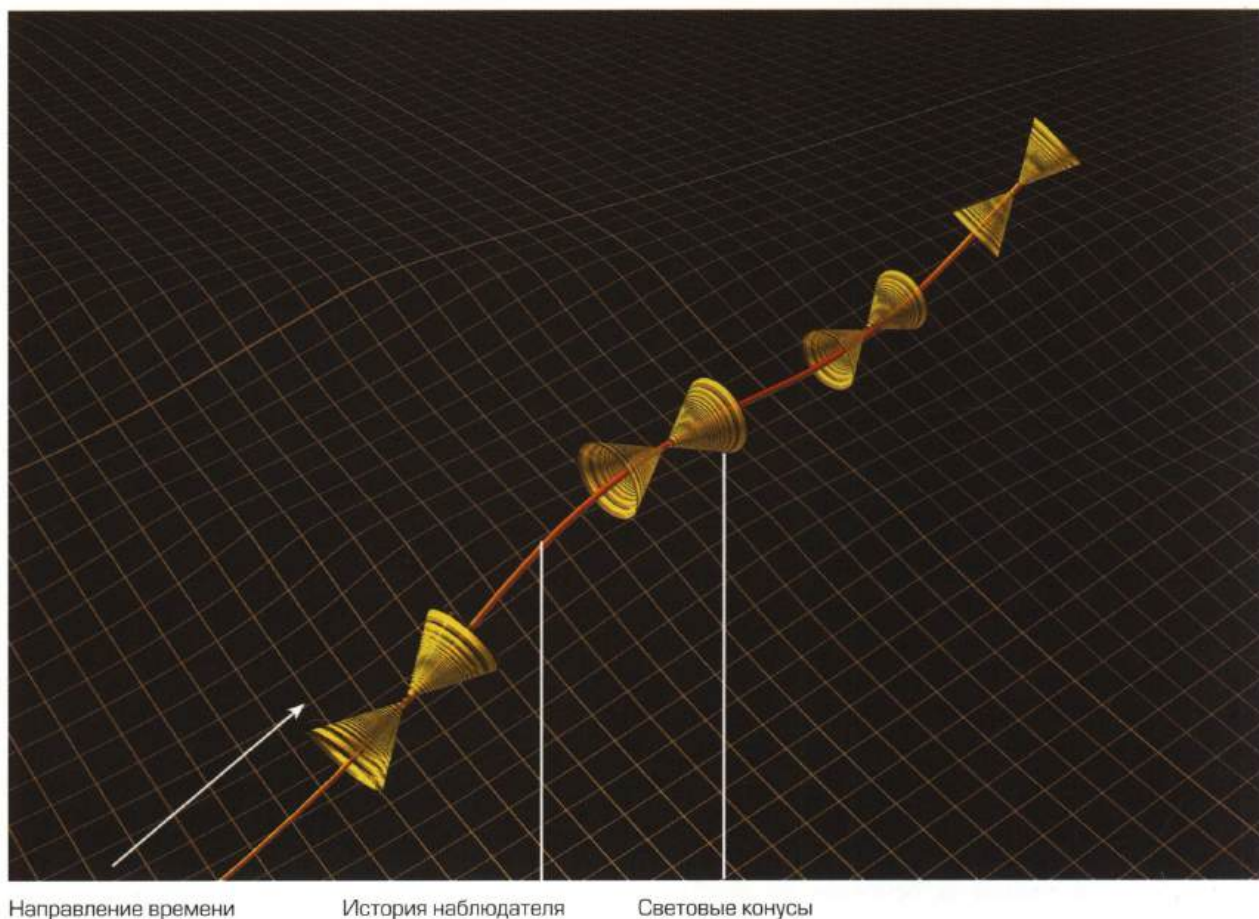


Рис. 2.19

В действительном пространстве-времени классической общей теории относительности время отличается от пространственных измерений, поскольку только увеличивается с ходом истории наблюдателя, в отличие от пространственных измерений, которые могут и увеличиваться, и уменьшаться в ходе этой истории. Но мнимое время квантовой теории ведет себя как еще одно пространственное измерение: оно может и увеличиваться, и уменьшаться.

мные числа — это такая новая разновидность чисел, перпендикулярная обычным действительным числам.

Поскольку мнимые числа — это математическое понятие, им не нужна физическая реализация: нельзя взять мнимое количество яблок или положить мнимую сумму денег на банковскую карту (рис. 2.18).

Казалось бы, из этого следует, будто мнимые числа — это просто математическая забава, не имеющая отношения к реальному миру. Но с точки зрения позитивистской философии нельзя определить, что реально, а что нет. Можно лишь понять, какие математические модели описывают Вселенную, в которой мы живем. Так вот, оказывается, математическая модель с участием мнимого времени предсказывает не только эффекты, которые мы уже наблюдали, но и эффекты, которые мы еще пока не наблюдали, однако у нас есть при-



Рис. 2.20

В мнимом пространстве-времени, представляющем собой сферу, мнимое время может соответствовать расстоянию от южного полюса. При движении на север окружности постоянной широты, то есть параллели, расположенные через равные промежутки от южного полюса, становятся больше, а следовательно, вселенная с ходом мнимого времени расширяется. Она достигает максимальных размеров у экватора, а затем снова уменьшается при увеличении мнимого времени и в конце концов сходится в точку на северном полюсе. Хотя на полюсах размер вселенной равен нулю, эти точки не представляют собой сингулярности, точно так же как Северный и Южный полюса Земли — самые обычные точки на ее поверхности и не более того. А значит, возникновение вселенной в мнимом времени может быть обычной точкой в пространстве-времени, а не сингулярностью.



Мнимое время в градусах широты.

Рис. 2.21

В пространстве-времени, представляющем собой сферу, направление мнимого времени может соответствовать и градусам долготы.

Поскольку все меридианы — линии долготы — пересекаются на южном и северном полюсах, время на полюсах не двигается, и увеличение мнимого времени оставляет наблюдателя на том же месте, точно так же как на Северном полюсе Земли, если пойдешь на запад по девяностой параллели, все равно останешься на Северном полюсе.



Мнимое время в градусах долготы: меридианы пересекаются на северном и южном полюсах.





чины в них верить. Так что же мнимое, а что действительное? Может быть, разница лишь у нас в голове?

Классическая (то есть некантовая) эйнштейновская общая теория относительности сочетает реальное время и три пространственных измерения и рассматривает единое четырехмерное пространство-время. Однако измерение действительного времени отличалось от трех пространственных: мировая линия истории с точки зрения наблюдателя всегда шла в сторону увеличения действительного времени, то есть время всегда шло из прошлого в будущее, но в любом пространственном измерении она могла идти как вверх, так и вниз. То есть в пространстве можно повернуть обратно, а во времени нельзя (рис. 2.19).

С другой стороны, поскольку мнимое время перпендикулярно действительному времени, оно ведет себя как четвертое пространственное измерение. Поэтому и возможностей у него гораздо больше, чем у обычного действительного времени с его «железнодорожной» структурой, в которой есть лишь начало или конец либо можно ездить по кругу. У времени есть форма именно в этом, мнимом смысле.

Чтобы оценить некоторые возможности мнимого времени, представим себе пространство-время с мнимым временем в виде сферы — вроде поверхности Земли. Предположим, что мнимое время — это градусы широты (рис. 2.20). Тогда история Вселенной в мнимом времени начнется на южном полюсе. Нет никакого смысла спрашивать «Что было до начала?». Это время попросту не определено — точно так же, как не определены точки южнее южного полюса. Южный полюс — совершенно обычная точка на поверхности Земли, там действуют те же законы, что и в остальных точках. Это значит, что в мнимом времени момент начала Вселенной мог быть самой обычной точкой пространства-времени, и в нем действовали те же законы, что и во всей остальной Вселенной (о квантовом происхождении и эволюции Вселенной мы поговорим в следующей главе).

Другой вариант поведения мнимого времени можно представить себе, если предположить, что мнимое время соответствует градусам долготы. Все меридианы — линии долготы — пересекаются на северном и южном полюсе (рис. 2.21). Тогда выходит, что время там останавливается — в том смысле, что при увеличении мнимого времени, или градусов долготы, остаешься на том же месте.

Это очень похоже на то, как останавливается время на горизонте черной дыры. Теперь мы понимаем, что остановка мнимого и дей-

$$S = \frac{A k c^3}{4 \hbar G}$$

ФОРМУЛА ЭНТРОПИИ
ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

A — площадь горизонта
событий черной дыры

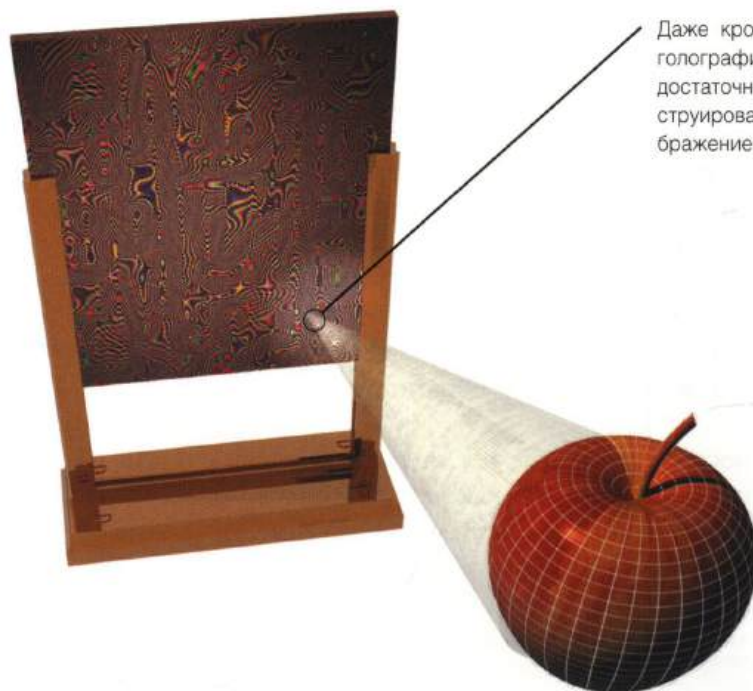
$\hbar$ — постоянная Планка

k — постоянная Больцмана

G — гравитационная
постоянная Ньютона

c — скорость света

S — энтропия



Даже крошечный фрагмент двумерной голографической пластины содержит достаточно информации, чтобы реконструировать целое трехмерное изображение яблока.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП

Когда ученые поняли, что поверхность горизонта событий, окружающего черную дыру, служит мерой энтропии черной дыры, это натолкнуло их на мысль, что максимальная энтропия любой замкнутой области пространства не может быть больше, чем четверть площади внешней поверхности этой области. Поскольку энтропия — это просто мера полной информации, содержащейся в системе, из этого следует, что информация, связанная со всеми феноменами трехмерного пространства, может храниться на ее двумерной границе — как голографическое изображение. В каком-то смысле мир двумерен.

ствительного времени (они останавливаются только оба сразу) означает, что у пространства-времени есть температура, как и у черных дыр (температура черных дыр — мое открытие). Черная дыра не просто имеет температуру — она ведет себя так, словно у нее есть параметр, который принято называть энтропией. Энтропия — мера количества внутренних состояний (способов организации системы изнутри), в которых может находиться черная дыра, не меняясь с точки зрения стороннего наблюдателя, который наблюдает только ее массу, вращение и заряд. Энтропия черной дыры описывается очень простой формулой, которую я вывел в 1974 году. Энтропия равна площади горизонта событий черной дыры — на каждую единицу площади этого горизонта (выраженную в фундаментальных единицах площади) приходится бит информации о внутреннем состоянии черной дыры. Это свидетельствует о глубокой взаимосвязи квантовой гравитации и термодинамики, науки о тепле (которая в том числе изучает и энтропию). Кроме того, это означает, что квантовая гравитация может проявляться в форме голографического принципа (рис. 2.22).

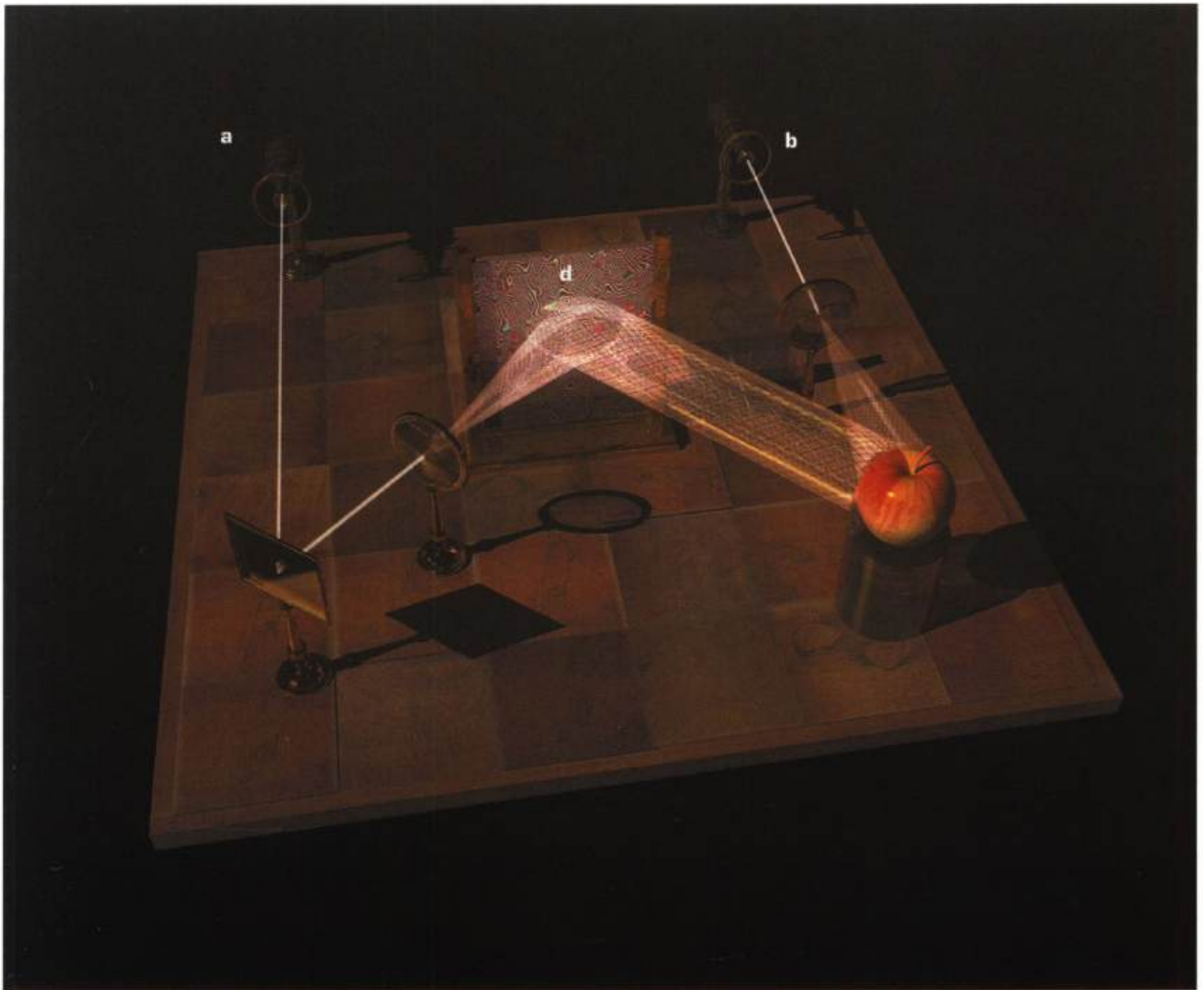


Рис. 2.22.

Голография — это, в сущности, явление интерференции световых волн. Чтобы создать голограмму, свет одного и того же лазера расщепляют на два разных луча — (a) и (b). Луч (b) отражается от предмета (c) на фоточувствительную пластину (d). Луч (a) проходит через линзу (e) и интерферирует с отраженным светом (b), отчего на пластине возникает интерференционная картина.

Если теперь просветить полученную пластину лазером, возникает полное трехмерное изображение первоначаль-

ного предмета. Наблюдатель может обойти это голографическое изображение со всех сторон и разглядеть все скрытые поверхности, которых не видно на обычном фотоснимке.

Двумерная поверхность пластины слева, в отличие от обычной фотографии, обладает удивительным свойством: любой, самый маленький фрагмент этой поверхности содержит всю информацию, необходимую, чтобы полностью реконструировать изображение предмета.



Информация о квантовых состояниях в некоторой области пространства-времени может быть как-то закодирована на границе этой области, то есть в пространстве, у которого на два измерения меньше. Это похоже на голограмму, которая содержит на двумерной поверхности информацию о трехмерном изображении. Если квантовая гравитация включает в себя голографический принцип, это, вероятно, означает, что мы можем проследить за объектами, находящимися внутри черных дыр. Без этого невозможно предсказать, каково будет излучение черных дыр. В свою очередь, без такого предсказания мы не сможем и рассчитывать будущее так точно, как мы хотим. Об этом говорится в главе 4. К голографии мы вернемся в главе 7. Похоже, мы живем на 3-бране — четырехмерной поверхности (три пространственных измерения плюс одно временное), представляющей собой границу пятимерной области, а остальные измерения свернуты и очень малы. Состояние мира на бране — это код, который содержит информацию о событиях, происходящих внутри пятимерной области.



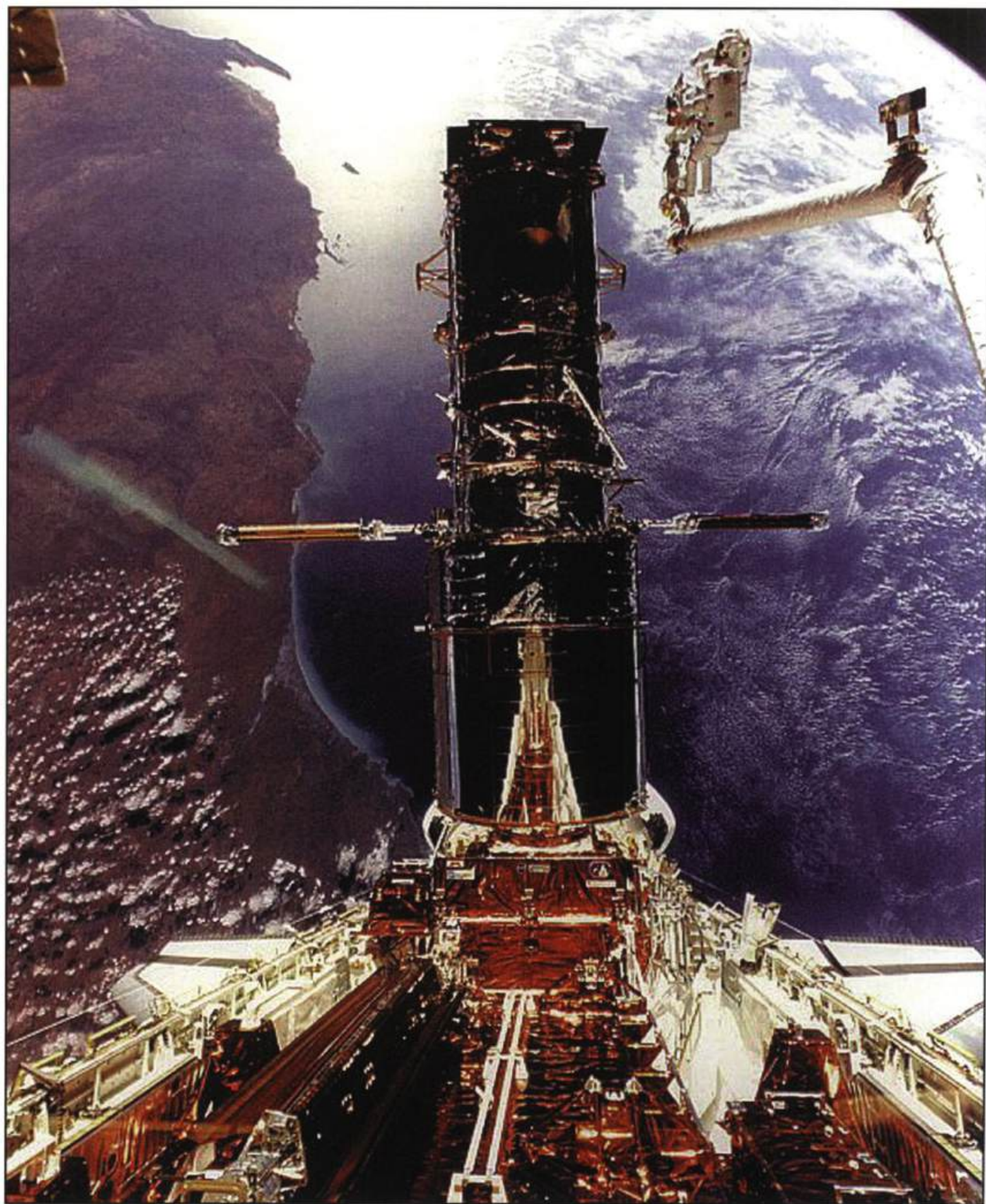
ГЛАВА 3

О ВСЕЛЕННОЙ В ДВУХ СЛОВАХ

У Вселенной множество историй, но каждую можно расколоть,
как орешек, и пересказать в двух словах¹.



¹ В оригинале — игра слов, основанная на выражении *in a nutshell* — «в двух словах» — и буквальном смысле слова *nutshell* — «скорлупа ореха». — Прим. перев.





Себя я даже в скорлупе ореха
Считал бы повелителем Вселенной...

Шекспир, «Гамлет», акт II, сцена 2
(пер. Н. Самойлова)

Вероятно, Гамлет имел в виду, что хотя физические возможности у нас, людей, весьма ограничены, наш разум свободен и может исследовать всю Вселенную, отважно заглядывая даже туда, куда побоялись бы герои «Звездного пути», и помеха ему разве что дурные сны.

Какая она, наша Вселенная, — и правда бесконечная или просто очень большая? Вечная или просто долгоживущая? Как нашим ограниченными умам представить себе бесконечную Вселенную? А может быть, это слишком самонадеянно с нашей стороны и не стоит и пытаться? Не рискуем ли мы повторить судьбу Прометея, который, согласно античной мифологии, украл у Зевса огонь, чтобы подарить его людям и научить их пользоваться им, но в наказание за дерзость был прикован к скале, где орел клевал его печень?

Несмотря на эту поучительную историю, я уверен, что мы можем и должны попытаться понять Вселенную. Мы уже достигли значительного прогресса в понимании космоса, особенно в последние годы. Полной картины у нас еще нет, но, возможно, до нее уже недалеко.

Когда речь идет о пространстве, самое очевидное его качество — то, что оно тянется во все стороны очень далеко. Это подтверждают и современные измерительные инструменты, например космический телескоп имени Хаббла, который позволяет нам заглядывать глубоко в космос. И тогда мы видим миллиарды галактик всевозможных форм и размеров (рис. 3.1). Каждая галактика содержит бесчисленные миллиарды звезд, и вокруг многих из них вращаются планеты. Мы живем на планете, которая вращается вокруг звезды во



Вверху: Прометей. Роспись на этрусской вазе, VI в. до н.э.

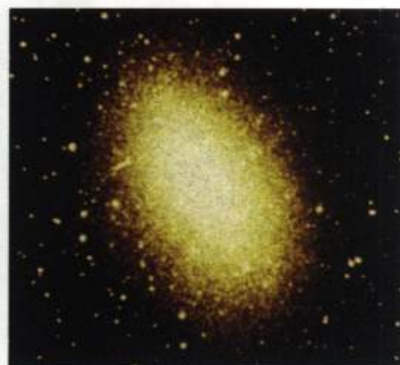
Слева: Экипаж космического челнока обновляет линзу и зеркала орбитального телескопа им. Хаббла. Внизу видна Австралия.



Спиральная галактика NGC 4414



Спиральная галактика с перемычкой
NGC 4314



Эллиптическая галактика NGC 147

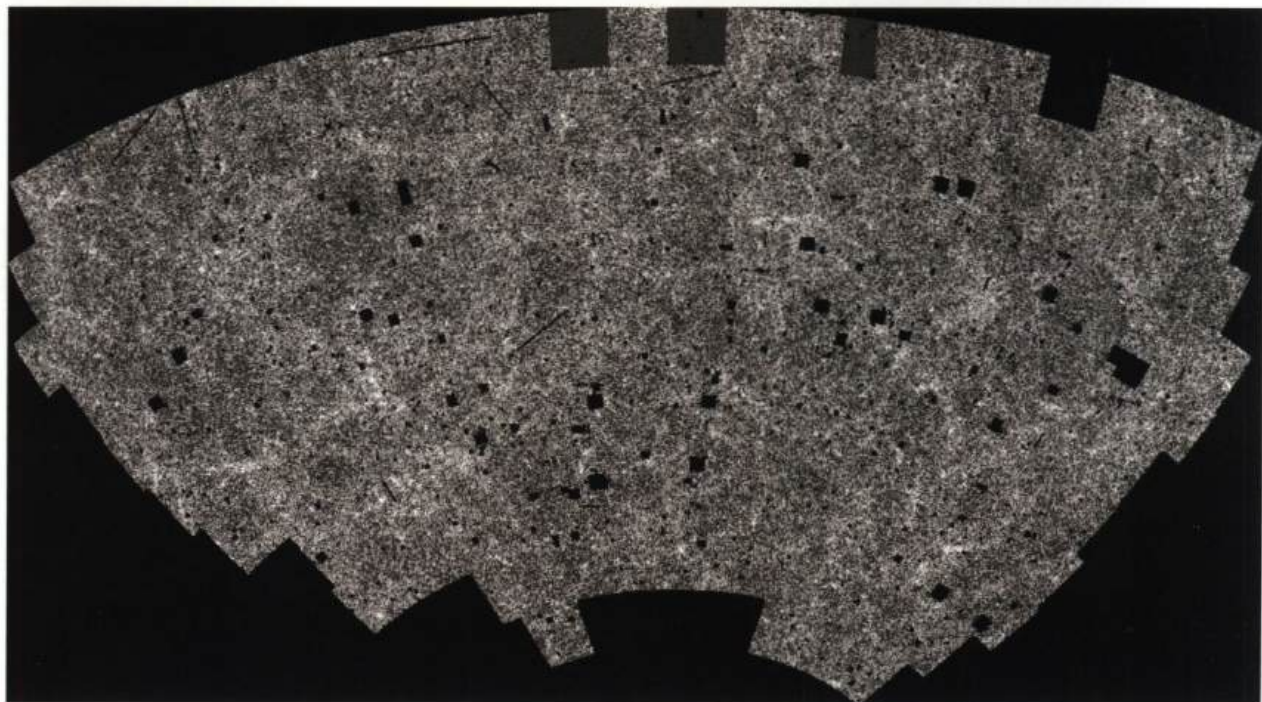
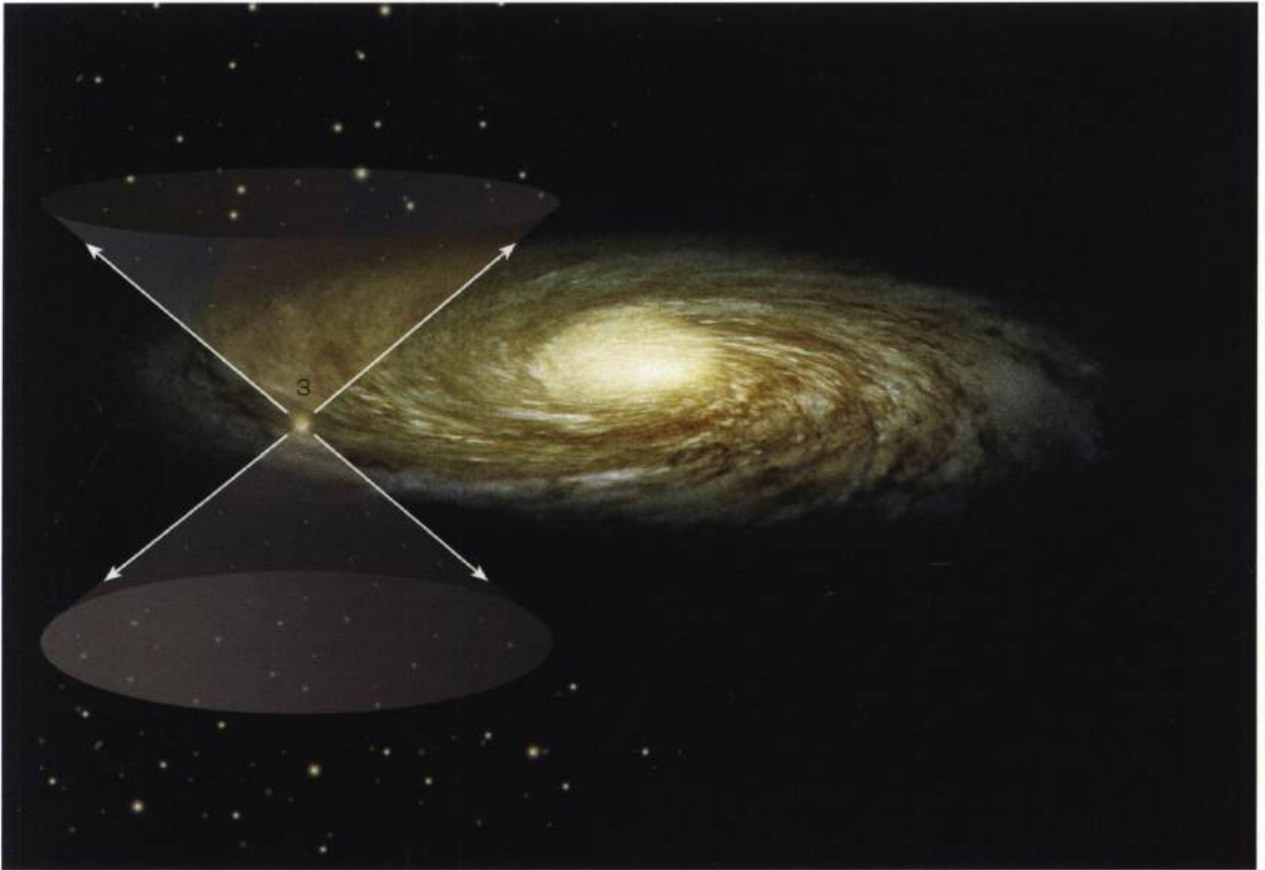


Рис. 3.1. Когда мы заглядываем в глубины Вселенной, то видим миллиарды галактик. Галактики бывают разных форм и размеров, они могут быть и эллиптическими, и спиральными, как наша галактика Млечный Путь.



внешнем спиральном рукаве Млечного Пути. Содержащаяся в спиральных рукавах пыль заслоняет нам обзор в плоскости Галактики, и в этом направлении нам трудно разглядеть, что происходит в глубинах Вселенной, зато в конусах по обе стороны от этой плоскости нам все прекрасно видно, и мы можем определить местоположение далеких галактик (рис. 3.2). Оказывается, галактики распределены по пространству более или менее равномерно, но кое-где есть локальные скопления и пустоты. Плотность галактик на очень больших расстояниях, похоже, снижается, но, возможно, дело в том, что очень далекие и тусклые галактики мы просто не различаем. Насколько мы можем судить, Вселенная простирается в пространстве бесконечно (рис. 3.3).

Хотя Вселенная, похоже, везде примерно одинакова, со временем она определенно меняется. Это начали понимать только в пер-

Рис. 3.2

Наша планета Земля (З) вращается вокруг Солнца во внешней области спиральной галактики Млечный Путь. Звездная пыль, содержащаяся в спиральных рукавах, заслоняет нам обзор в плоскости Галактики, зато нам все хорошо видно по обе стороны этой плоскости.

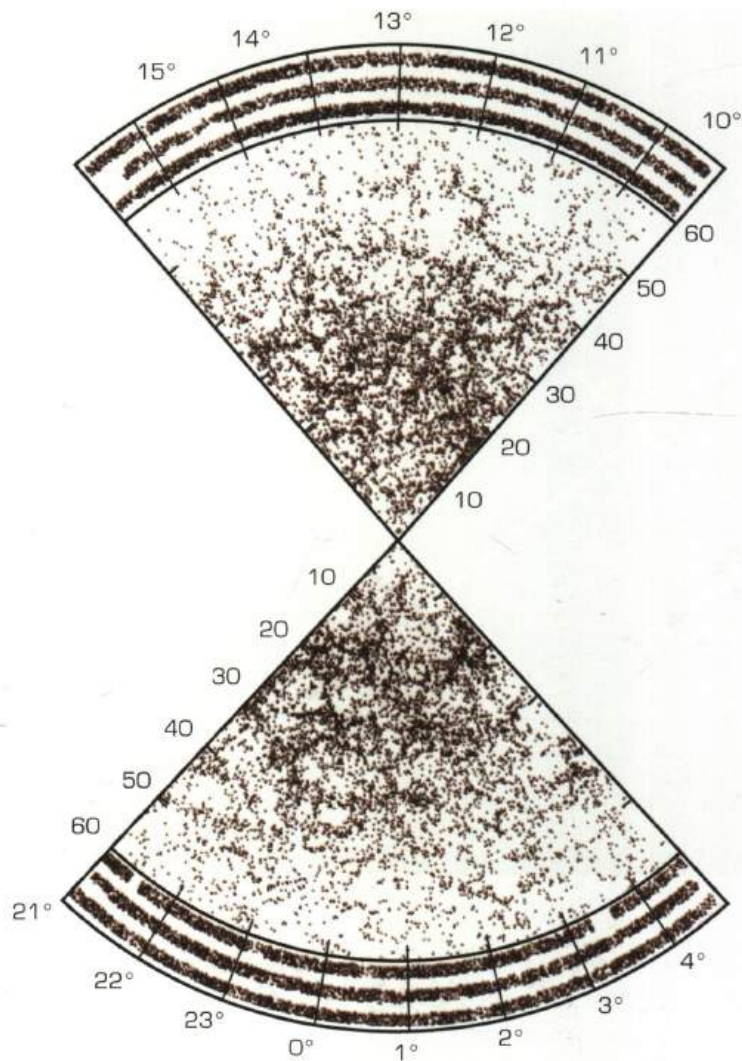
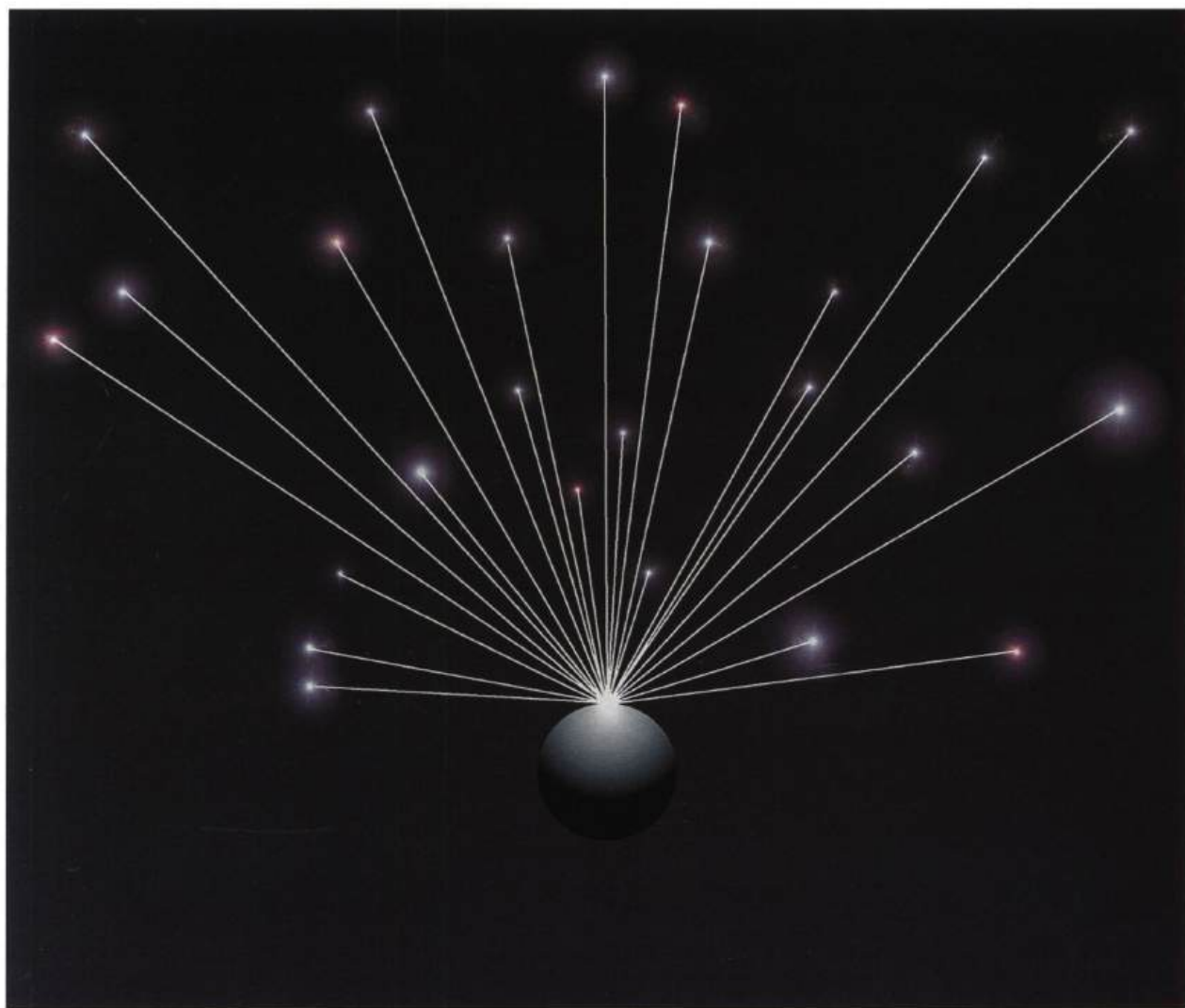


Рис. 3.3.
Если не считать отдельных локальных скоплений, видно, что галактики распределены в пространстве достаточно равномерно.

вые годы XX века. До этого считалось, что Вселенная неизменна и могла существовать бесконечно долго, однако из этого следовали абсурдные выводы. Если звезды светят вечно, они должны были разогреть Вселенную до своей температуры. Даже ночью небо сияло бы ярко, как Солнце, поскольку все лучи зрения упирались бы либо в звезду, либо в облако пыли, раскаленное до температуры звезд (рис. 3.4).

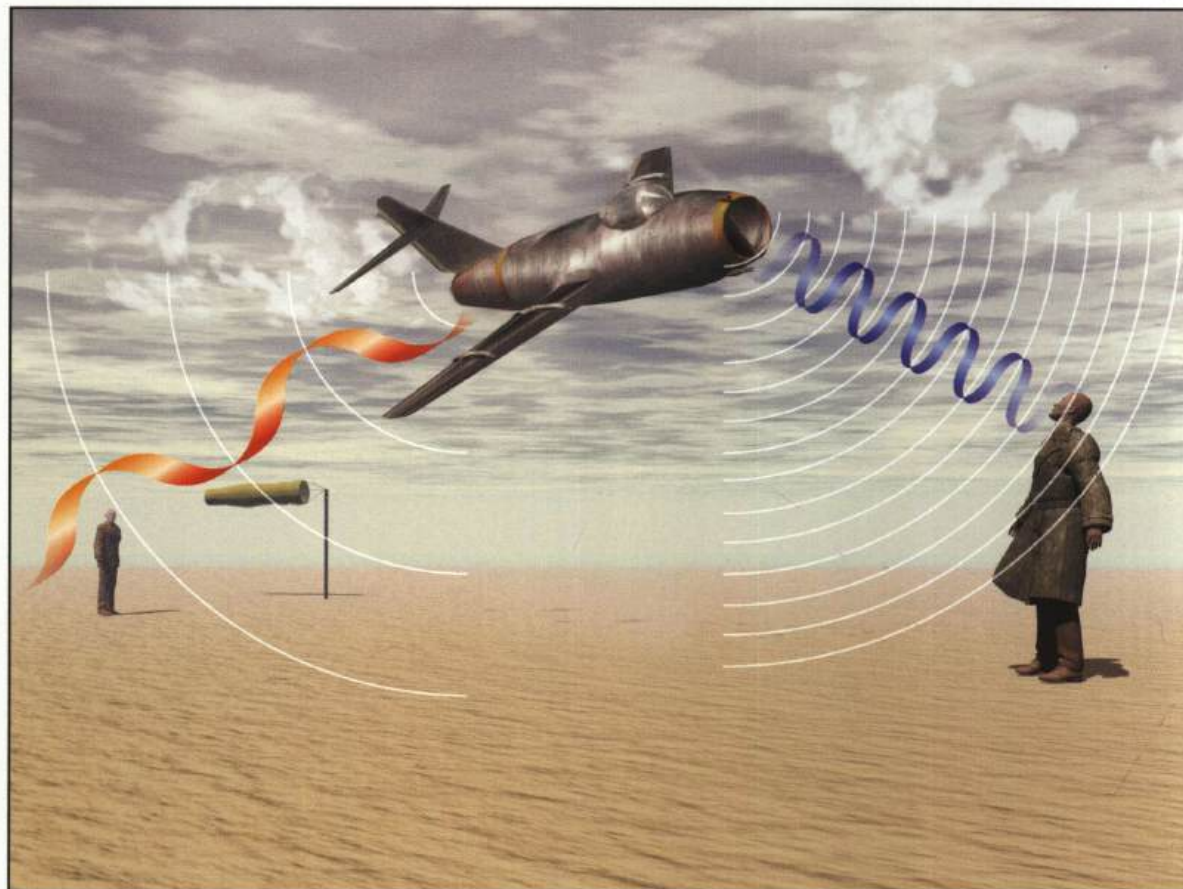
Все мы знаем, что небо по ночам темное, и это очень важное наблюдение. Из него следует, что Вселенная не всегда существовала



в том состоянии, которое мы видим сегодня. В прошлом — конечное время назад — случилось нечто, из-за чего загорелись звезды, а значит, свет очень далеких звезд еще не успел до нас добраться. Это объясняет, почему ночное небо не светится целиком.

Если звезды сидели на своих местах вечно, почему они вдруг загорелись несколько миллиардов лет назад? Что за часы сказали им, что пора сиять? Как мы уже видели, это ставило в тупик тех философов, кто, подобно Иммануилу Канту, считал, что Вселенная существовала вечно. Однако в глазах большинства людей это не противо-

Рис. 3.4. Если бы Вселенная была статична и бесконечна во всех направлениях, все линии зрения упирались бы в звезду, а значит, ночное небо светилось бы, как Солнце.



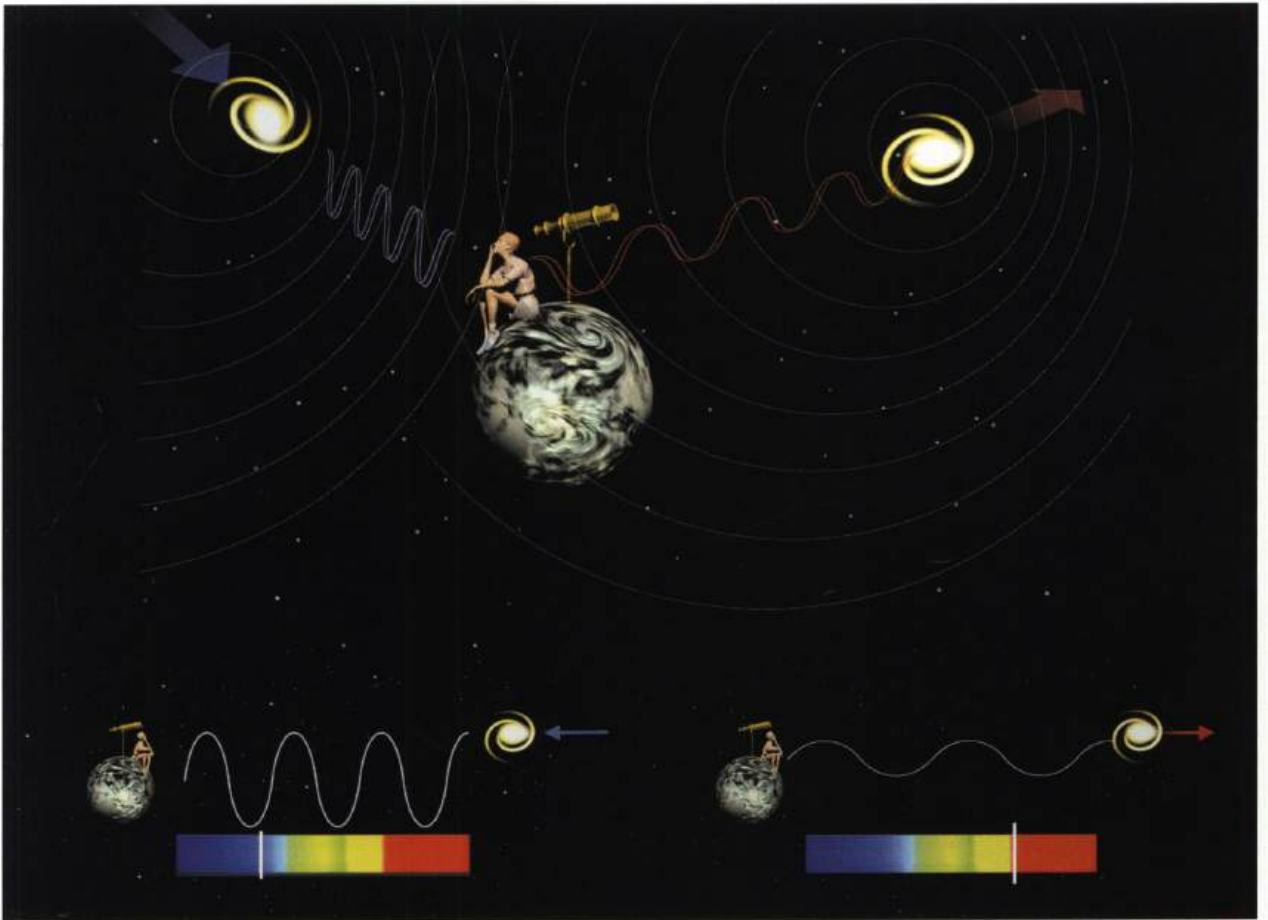
ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Отношение между скоростью источника волн и регистрируемой приемником длиной волны — так называемый эффект Доплера — мы наблюдаем практически каждый день. Прислушайтесь, как пролетает самолет над головой: когда он приближается, гул двигателя звучит выше, а когда он пролетает мимо и скрывается вдаль, шум становится ниже. Более высокий звук — это более короткие звуковые волны (у них меньше расстояние

между соседними пиками) и более высокая частота (количество колебаний в секунду).

Дело в том, что когда самолет движется в вашу сторону, он испускает каждую волну все ближе и ближе к вам, поэтому расстояние между пиками сокращается.

Аналогичным образом, если самолет летит от вас, длины волн увеличиваются и звук, который вы воспринимаете, становится ниже.



речило идее, что Вселенная была создана примерно в нынешнем виде несколько тысяч лет назад.

Но во второй декаде XX века Весто Слайфер и Эдвин Хаббл провели наблюдения, из которых следовало, что модель неизменной Вселенной логически несостоятельна. В 1923 году Хаббл открыл, что многие пятна тусклого света, которые называли туманностями, на самом деле — другие галактики, обширные скопления звезд, похожих на наше Солнце, но очень далеких. Чтобы они казались такими маленькими и тусклыми, расстояние до них должно было быть настолько огромно, что свет от них шел до нас миллионы или даже миллиарды лет. Это означает, что Вселенная никак не могла зародиться всего несколько тысяч лет назад.

Рис. 3.5. Эффект Доплера относится и к световым волнам. Если бы расстояние от Земли до какой-то галактики было постоянно, характерные линии в ее спектре должны были бы находиться на стандартном месте на шкале длин волн. Однако если галактика удаляется от нас, волны покажутся длиннее, растянутся и характерные линии сместятся в красную сторону (*справа*). Если же галактика движется к нам, световые волны сожмутся и линии сдвинутся в синюю сторону (*слева*).



Наша соседка-галактика Андромеда, движение которой измеряли Хаббл и Слайфер.

**ХРОНОЛОГИЯ ОТКРЫТИЙ
СЛАЙФЕРА И ХАББЛА
В 1910–1930 гг.**

1912 — Слайфер проанализировал свет четырех туманностей и обнаружил у трех из них красное смещение, а у Андромеды — синее. Из этого он сделал вывод, что Андромеда движется к нам, а остальные туманности — от нас.

1912–1914 — Слайфер проанализировал свет еще 12 туманностей. У всех, кроме одной, обнаружилось красное смещение.

1914 — Слайфер сделал доклад о своих открытиях в Американском астрономическом обществе. Этот доклад слышал Хаббл.

1918 — Хаббл тоже начал исследовать туманности.

1923 — Хаббл обнаружил, что спиральные туманности, в том числе Андромеда, — это другие галактики.

1914–1925 — Слайфер и другие ученые продолжили анализировать доплеровские смещения.

В 1925 году счет составил 43 красных смещения против 2 синих.

1929 — Продолжив изучать доплеровские смещения и обнаружив, что на больших масштабах все галактики разбегаются друг от друга, Хаббл и Милтон Хьюмсон объявили о своем открытии: Вселенная расширяется.



А затем Хаббл сделал второе открытие — еще более значительное. Проанализировав свет далеких галактик, можно узнать, куда они движутся, к нам или от нас (рис. 3.5). К величайшему изумлению астрономов, оказалось, что почти все галактики движутся от нас. Более того, чем дальше они находятся, тем быстрее разлетаются. Именно Хаббл понял, как поразительны выводы из этого открытия: на больших масштабах все галактики разлетаются друг от друга. Вселенная расширяется (рис. 3.6).

Открытие расширения Вселенной — один из величайших интеллектуальных прорывов XX века. Это стало полнейшей неожиданно-

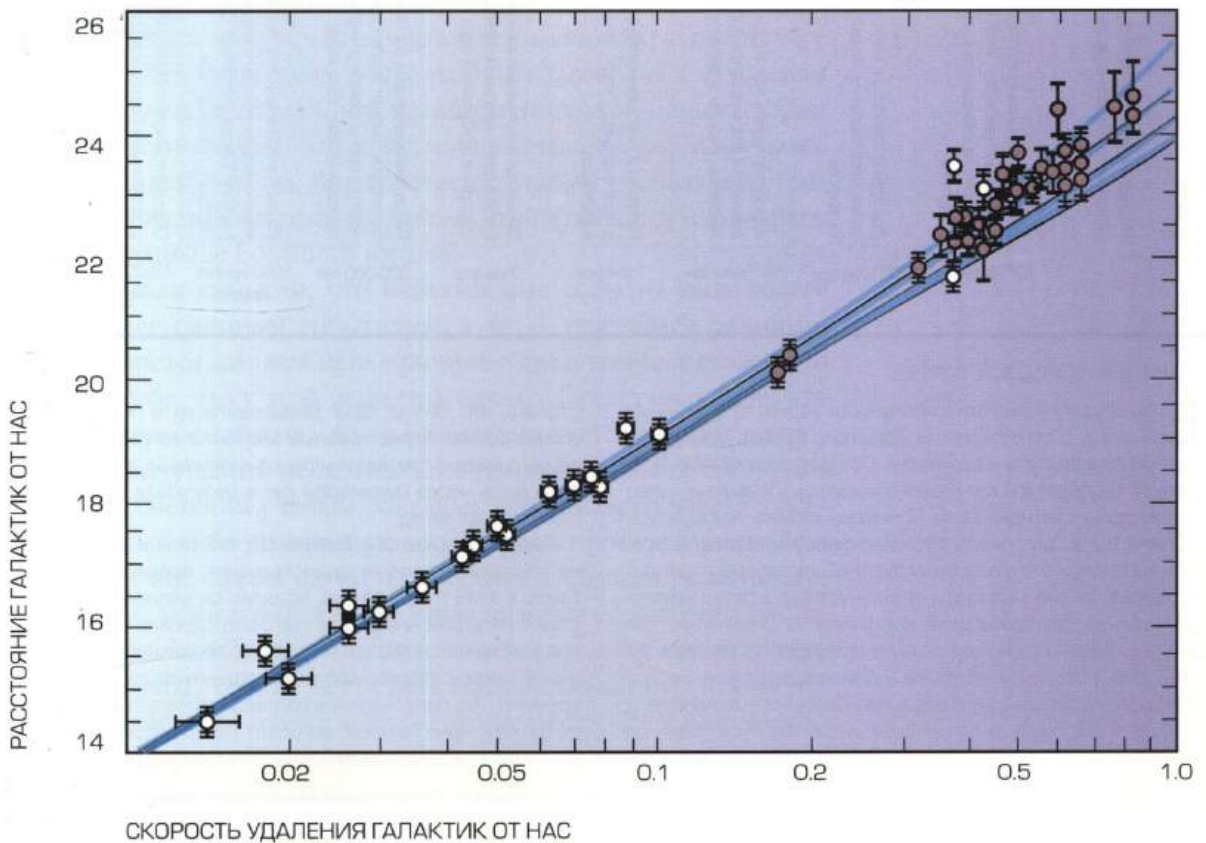


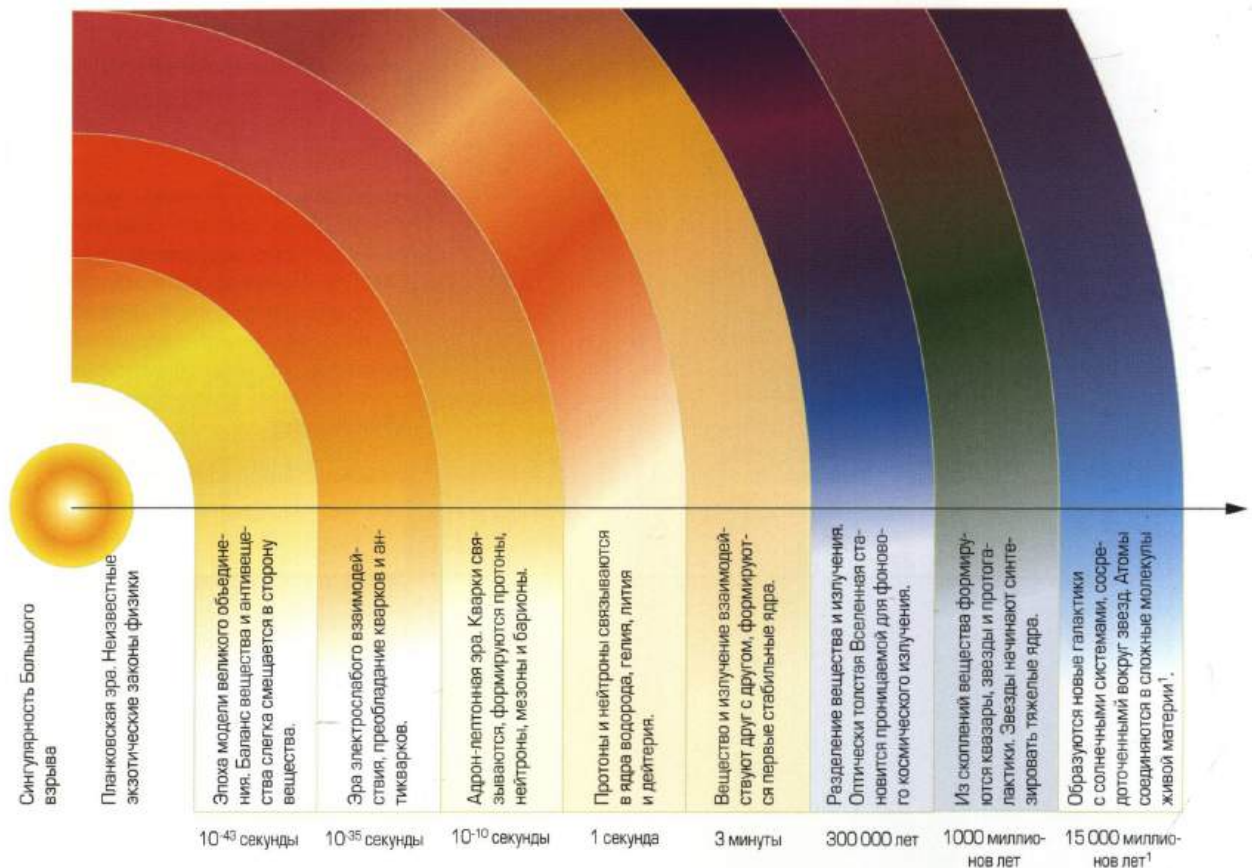
Эдвин Хаббл у столбового телескопа в обсерватории «Маунт-Вилсон» в 1930 году

Рис. 3.6. ЗАКОН ХАББЛА

Проанализировав свет от других галактик, Эдвин Хаббл в двадцатые годы открыл, что почти все галактики удаляются от нас со скоростью V , пропорциональной их расстоянию R от Земли: $V = H \times R$. Это важное наблюдение, названное «законом Хаббла», показывает, что Вселенная расширяется, а постоянная Хаббла H задает темп расширения.

На графике внизу отражены недавние наблюдения красного смещения галактик, которые подтверждают закон Хаббла на очень больших расстояниях от нас. Легкий изгиб графика вверх на самых дальних расстояниях говорит о том, что расширение ускоряется, что, вероятно, вызвано наличием энергии вакуума.





ГОРЯЧИЙ БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

Если общая теория относительности верна, то Вселенная началась с сингулярности Большого взрыва при бесконечной температуре и плотности. По мере расширения Вселенной температура излучения снижалась. Примерно через сотую долю секунды после Большого взрыва температура должна была быть около 100 миллиардов градусов, а Вселенная содержала в основном фотоны, электроны и нейтрино (самые легкие частицы) и их античастицы, а также некоторое количество протонов и нейтронов. В следующие три минуты, когда Вселенная остыла примерно до миллиарда градусов, протоны и нейтроны начали соединяться и образовывать ядра гелия, водорода и других легких элементов.

Еще через сотни тысяч лет, когда температура упала до нескольких тысяч градусов, электроны замедлились на

столько, что легкие ядра захватывали их и образовывали атомы. Однако более тяжелые элементы, из которых состоим мы с вами, в том числе углерод и кислород, сформировались лишь через миллиарды лет в результате сгорания гелия в недрах звезд.

Первым эту картину Вселенной, плотной и раскаленной на начальном этапе ее существования, предложил Георгий Гамов в 1948 году в статье, которую он написал в соавторстве с Ральфом Альфером, где было сделано выдающееся предсказание о том, что излучение, возникшее на этой горячей ранней стадии, должно сохраниться до настоящего времени. Это предсказание подтвердилось в 1965 году, когда физики Арно Пензиас и Роберт Уилсон зарегистрировали космическое микроволновое фоновое излучение.

¹По современным представлениям, возраст Вселенной составляет около 13,8 миллиарда лет, так что последний из приведенных здесь масштабов несколько завышен. — *Прим. ред.*



стью и полностью изменило ход дискуссии о происхождении Вселенной. Если галактики разбегаются, значит, в прошлом они были ближе друг к другу. При нынешнем темпе расширения, по нашим оценкам, десять-пятнадцать миллиардов лет назад они располагались очень тесно. Как говорилось в предыдущей главе, мы с Роджером Пенроузом сумели показать, что из эйнштейновской общей теории относительности следует, что у Вселенной было начало и началась она с мощнейшего взрыва. Вот, собственно, почему ночью небо темное: звезды зажглись не раньше, чем десять-пятнадцать миллиардов лет назад, не раньше Большого взрыва.

Мы привыкли к мысли, что наблюдаемые события вызываются другими, более ранними событиями, а те — еще более ранними. В прошлое тянется длинная цепь причинно-следственных связей. Но представьте себе, что у этой цепи есть начало. Представьте себе, что было самое первое событие. А что тогда вызвало его? К этому вопросу ученые подступались неохотно. Они пытались обойти его — либо, подобно советским ученым, заявляли, что никакого начала у Вселенной не было, либо утверждали, что вопрос о происхождении Вселенной лежит вне сферы науки и относится к области религии или метафизики. С моей точки зрения, такая позиция не достойна настоящего ученого. Если законы физики не действовали в самом начале Вселенной, почему они не могут дать сбой в любой другой момент? Если закон действует только иногда, это не закон. Нам надо *постараться понять, каким было начало Вселенной, опираясь на научные данные. Возможно, эта задача нам не по силам, но попытаться мы обязаны.*

Из теорем, которые доказали мы с Пенроузом, следует, что у Вселенной было начало, но о природе этого начала они говорили мало.



Эти теоремы показывали, что началом Вселенной был Большой взрыв, момент, когда вся Вселенная и все, что в ней содержится, было сжато в точку бесконечной плотности.

В этом месте эйнштейновская общая теория относительности рассыпалась и не могла ничего рассказать о начале Вселенной. Оставалось заключить, что происхождение Вселенной, очевидно, лежит вне сферы науки.

Но ученые не должны довольствоваться подобного рода выводами. Как видно из глав 1 и 2, общая теория относительности не действует в момент Большого взрыва и сразу после него, поскольку в нее не включен принцип неопределенности, случайный элемент квантовой теории, против которого возражал Эйнштейн, убежденный, что «Бог не играет в кости». Однако все указывает на то, что Бог тот еще игрок. Можно представить себе Вселенную в виде гигантского казино, где все события регулируются броском костей или запуском рулетки (рис. 3.7). Казалось бы, управлять казино — рискованный бизнес, ведь можно потерять деньги каждый раз, когда бросают кости или крутят рулетку. Но при очень большом числе ставок проигрыши и выигрыши усредняются и дают результат, который можно предсказать, хотя результат каждой конкретной игры угадать невозможно (рис. 3.8). Владельцы казино следят, чтобы средний результат был в их пользу. Вот почему они так богаты. Шанс выиграть у тебя появляется, только если ставишь все свои деньги на несколько бросков костей или запусков рулетки.

То же самое и во Вселенной. Когда Вселенная велика, как сегодня, бросков костей очень много, и результаты усредняются, так что их можно предсказать. Вот почему классические законы действуют только для больших систем. Но когда Вселенная очень мала, например в момент Большого взрыва и сразу после него, бросков костей мало, и тут важнейшую роль играет принцип неопределенности.

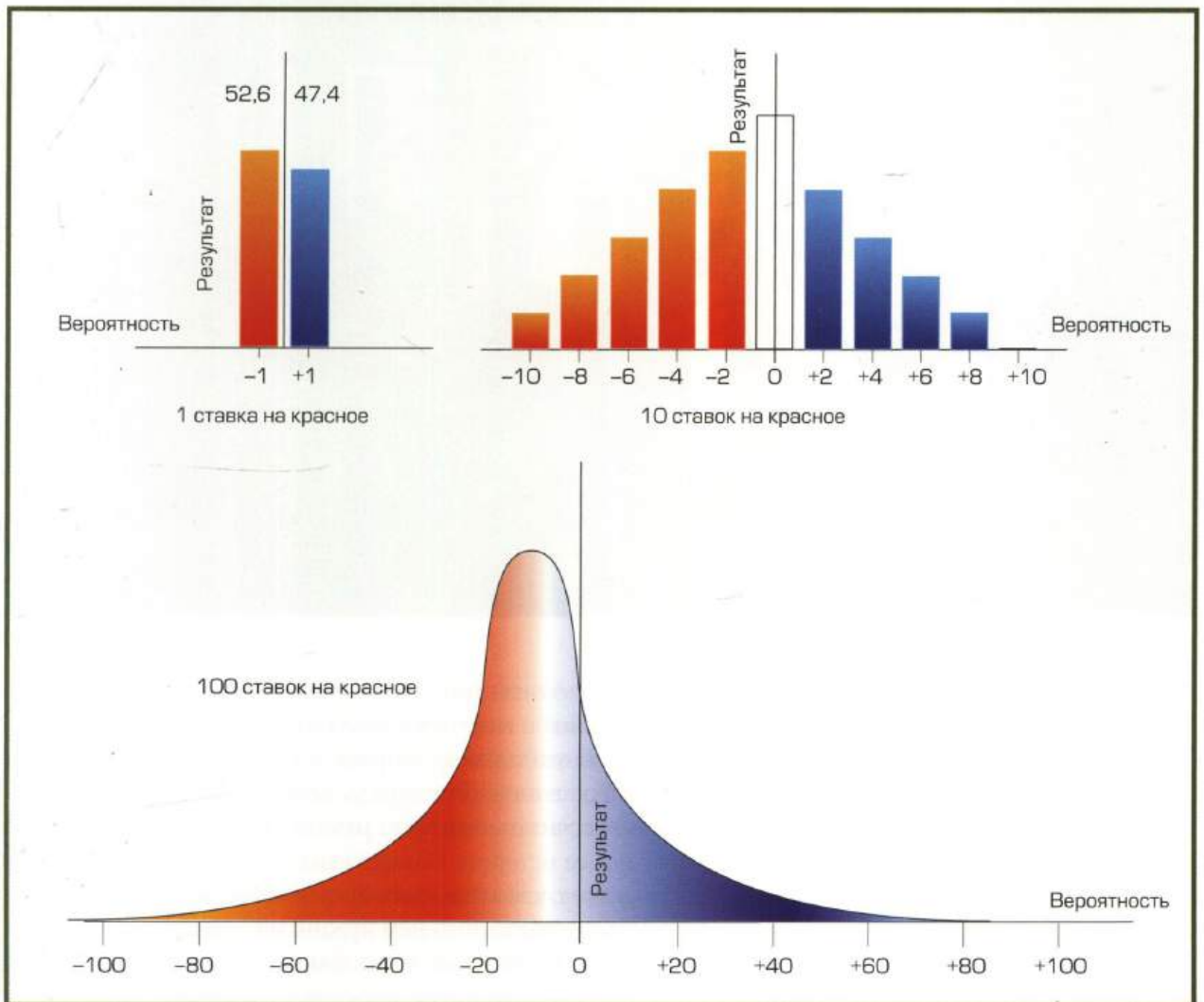
Поскольку Вселенная постоянно бросает кости, чтобы узнать, что теперь будет, у нее не одна история, как можно было бы подумать. Нет, во Вселенной должны содержаться все возможные истории — каждая со своей вероятностью. Должна быть история Вселенной, в которой все золотые медали на Олимпиаде получила сборная Белиза, как ни мала вероятность подобного развития событий.

Мысль, что у Вселенной множество историй, — это, казалось бы, что-то из области фантастики, однако в наши дни это считается доказанным научным фактом. Эту гипотезу выдвинул Ричард Фейнман — великий физик и большой оригинал.



Рис. 3.7 (вверху), и рис. 3.8 (слева) Если игрок ставит на красное при большом числе запусков рулетки, можно вполне точно предсказать, что он получит в итоге, поскольку результаты отдельных запусков усредняются.

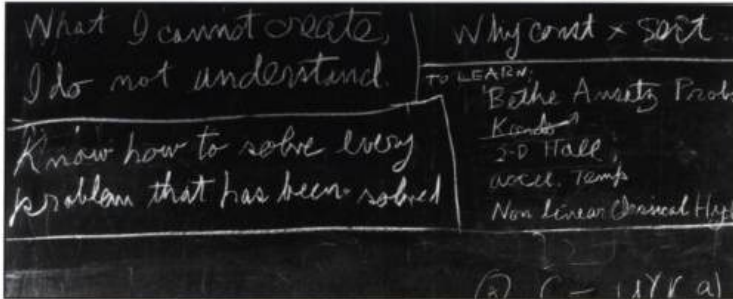
Однако результаты каждой конкретной ставки предсказать невозможно.



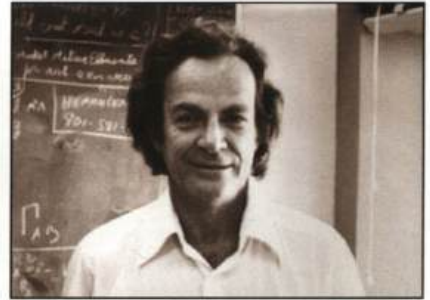


Если бы граница Вселенной была просто точкой в пространстве-времени, мы могли бы все время пересекать и отодвигать ее.

Сегодня мы работаем над тем, чтобы увязать общую теорию относительности Эйнштейна и гипотезу о множественной истории Вселенной Фейнмана в единую полную теорию, которая описывала бы все происходящее во Вселенной. Эта модель великого объединения даст нам возможность рассчитать, как будет развиваться Вселенная, если мы знаем, как начались ее истории. Однако сама по себе модель великого объединения не скажет, как зародилась Вселенная и каким было ее первоначальное состояние. Для этого нам нужны так называемые граничные условия — правила, которые устанавливают, что происходит на границах Вселенной, на самом краю пространства и времени.



Доска в Калтехе в день смерти Фейнмана в 1988 году



Ричард Фейнман

ФЕЙНМАНОВСКИЕ ИСТОРИИ

Ричард Фейнман родился в Нью-Йорке, в Бруклине, в 1918 году и защитил диссертацию под руководством Джона Уилера в Принстонском университете в 1942 году. Вскоре после этого его привлекли к работе над Манхэттенским проектом. Там он прославился и бурным характером, и склонностью к розыгрышам, например он обожал взламывать сверхсекретные сейфы в лабораториях Лос-Аламоса, а также незаурядными научными достижениями: он стал одним из основных авторов теории атомной бомбы.

Самой сутью характера Фейнмана была неуемная любознательность. Она не только служила движущей силой его научных успехов, но и вдохновляла на самые удивительные авантюры, в том числе — на дешифровку письменности майя.

После Второй мировой войны Фейнман нашел принципиально новый и очень перспективный подход к квантовой механике, за который и получил Нобелевскую премию в 1965 году. Фейнман усомнился в фундаментальном классическом предположении о том, что у каждой частицы есть

только одна история. Он предположил, что частицы перемещаются с места на место по всем возможным траекториям в пространстве-времени. Каждую траекторию Фейнман характеризовал двумя величинами: одна — размер, то есть амплитуда волны, вторая — ее фаза, то есть пик или минимум. Вероятность, что частица перейдет из точки А в точку В, рассчитывается исходя из суммы волн, ассоциируемых с каждой из возможных траекторий между А и В.

Тем не менее повседневный опыт учит, что предметы между отправной и конечной точкой проходят по какой-то одной траектории. Это соответствует гипотезе Фейнмана о множественной истории (или сумме историй), поскольку для больших объектов его закон, приписывающий каждой траектории численные характеристики, приводит к тому, что при учете всей совокупности траекторий все они, кроме одной, взаимоуничтожаются. При движении макроскопических тел роль играет лишь одна из бесконечного множества траекторий, и это именно та траектория, которую задают классические законы Ньютона.

Если бы граница Вселенной была обычной точкой в пространстве и времени, мы бы могли перейти ее и объявить территорию за ней частью Вселенной. С другой стороны, если бы граница Вселенной была неровным краем, где пространство и время сжаты и плотность бесконечна, определить осмысленные пограничные условия было бы очень трудно.

Однако мы с коллегой Джимом Хартлом поняли, что есть и третий вариант. Может быть, у Вселенной нет границ в пространстве и времени. На первый взгляд это прямо противоречит теоремам, которые доказали мы с Пенроузом: из них следует, что у Вселенной

Классическая траектория частицы



Согласно фейнмановскому интегралу по траекториям, частица проходит все возможные траектории.

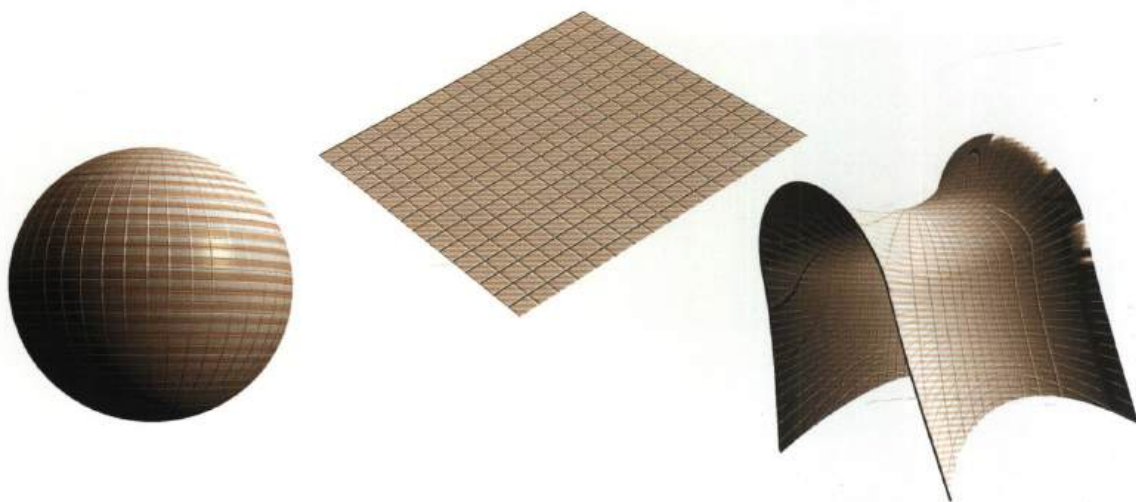


Рис. 3.9. ИСТОРИИ ВСЕЛЕННОЙ

Если истории во Вселенной уходят в бесконечность, как на седловидной поверхности, определить, каковы будут граничные условия на бесконечности, не удастся. Если же все исто-

рии во Вселенной в мнимом времени представляют собой замкнутые поверхности вроде поверхности Земли, определять граничные условия не приходится.

ЗАКОНЫ ЭВОЛЮЦИИ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Начальное состояние системы меняется со временем в соответствии с законами физики. Например, если подбросить камень, его дальнейшее движение точно опишут законы гравитации.

Однако на основании этих законов невозможно точно предсказать, где приземлится камень. Для этого нам нужно знать, с какой скоростью и в каком направлении он был брошен. Иначе говоря, надо знать начальные условия — граничные условия — движения камня.

Космология пытается на основании тех же законов физики описать эволюцию всей Вселенной. Но для этого нам нужно задаться вопросом, каковы были начальные условия во Вселенной, чтобы было к чему применять эти законы.

Начальное состояние, вероятно, оказало глубочайшее воздействие на основные черты Вселенной, а может быть, и на свойства элементарных частиц и взаимодействий, необходимых для возникновения биологической жизни.

Одна из гипотез — «гипотеза отсутствия границ» — гласит, что время и пространство конечны, образуют замкнутую поверхность без границ, точно так же как поверхность Земли конечна по размеру, но безгранична. «Гипотеза отсутствия границ» основана на мысли Фейнмана о множественной истории, но теперь вместо истории частицы в сумме Фейнмана фигурирует все пространство-время, отражающее историю всей Вселенной. Условие «без границ» как раз и позволяет ограничить все возможные истории Вселенной теми вариантами пространства-времени, у которых нет границ в мнимом времени. Иными словами, граничные условия Вселенной состоят в отсутствии границ.

Сейчас космологи исследуют, не может ли быть такого, что начальные конфигурации, предпочтительные согласно «гипотезе отсутствия границ», возможно с учетом слабого антропного принципа, порождают именно такую Вселенную, какую мы наблюдаем сейчас.



должно быть начало, граница во времени. Однако, как рассказано в главе 2, есть и другое время, так называемое мнимое, перпендикулярное обычному действительному, ход которого мы ощущаем. История Вселенной в действительном времени определяет его историю в мнимом времени и наоборот, но это могут быть две совершенно разные истории. В частности, Вселенной в мнимом времени не нужны ни начало, ни конец. Мнимое время ведет себя просто как еще одно пространственное измерение. Значит, истории Вселенной во мнимом времени можно представить себе как искривленные поверхности — мяч, плоскость или седло, — но не с двумя измерениями, а с четырьмя (рис. 3.9).



Если истории Вселенной уходят в бесконечность — как бывает на плоскости или седловидной поверхности, — трудно определить, каковы на бесконечности граничные условия. Но можно и обойти это препятствие и вообще не определять граничные условия, если все истории Вселенной в мнимом времени — это замкнутые поверхности вроде поверхности Земли. У поверхности Земли нет ни границ, ни краев. Вроде бы с нее никто никогда не падал.



Если истории Вселенной в мнимом времени и в самом деле представляют собой замкнутые пространства, как предположили мы с Хартлом, это требует фундаментального пересмотра философии и наших представлений о собственном происхождении. В таком случае Вселенная полностью самодостаточна, ей не нужны никакие внешние воздействия, чтобы завести и запустить ее механизмы. Напротив, все во Вселенной определяется законами физики и бросками костей в пределах самой Вселенной. Как бы ни самонадеянно это звучало, но именно такой видится картина мира и мне, и многим другим ученым.



Даже если граничные условия Вселенной в том и состоят, что у нее нет границ,

У поверхности Земли нет ни границ, ни краев. Все рассказы о том, как с нее кто-то свалился, — художественное преувеличение.



АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП

Грубо говоря, антропный принцип гласит, что мы видим Вселенную именно такой — по крайней мере, отчасти, — потому что мы существуем. Эта точка зрения диаметрально противоположна мечте о единой теории, однозначно предсказывающей все на свете, в рамках которой законы природы совершенны, а мир таков, какой он есть, поскольку иначе быть не может. Есть несколько версий антропного принципа — одни слабы до тривиальности, другие сильны до абсурда. Большинство ученых не спешит признать сильную версию антропного принципа, однако некоторые слабые антропные аргументы так полезны, что их едва ли станут оспаривать.

Слабый антропный принцип сводится к объяснению того, в какие эпохи и в каких частях Вселенной мы могли бы жить. Например, причина, по которой Большой взрыв произошел около десяти миллиардов лет назад, состоит в том, что с момента возникновения Вселенной должно было пройти достаточно времени для завершения эво-

люции некоторых звезд, иначе они не вырабатывали бы химические элементы вроде кислорода и углерода, из которых мы созданы, однако Вселенная должна быть еще относительно молода, иначе не осталось бы звезд, обеспечивающих энергию жизни.

В рамках «теории отсутствия границ» можно опереться на правило Фейнмана приписывания величин каждой истории Вселенной и понять, какие качества Вселенной более вероятны. В этом контексте антропный принцип применяют в том смысле, что эти истории должны учитывать разумную жизнь. Разумеется, к антропному принципу можно было бы относиться с большим доверием, если бы удалось показать, что несколько разных начальных конфигураций Вселенной могли в результате эволюции привести к возникновению приблизительно той Вселенной, которую мы наблюдаем. Из этого следовало бы, что начальное состояние той части Вселенной, где мы живем, не нужно было подбирать очень точно и тщательно.



Рис. 3.10 (на соседней странице)
Слева на рисунке — вселенные (а), которые схлопнулись и стали замкнутыми. Справа — открытые вселенные (b), которые будут расширяться вечно.

Важные для нас вселенные, которые балансируют между коллапсом и вечным расширением (с1) или двойной инфляцией (с2), способны поддерживать разумную жизнь.

Наша собственная Вселенная (d) пока что способна расширяться дальше.



Двойная инфляция может обеспечить разумную жизнь.



Наша собственная Вселенная пока что способна расширяться дальше.

история у Вселенной не одна. У нее множество историй, как предположил Фейнман. Каждой возможной замкнутой поверхности во Вселенной соответствует история в мнимом времени, а каждая история в мнимом времени определяет историю в действительном времени. Таким образом, во Вселенной налицо переизбыток возможностей. Что же выделяет ту конкретную Вселенную, в которой мы живем, из множества всех возможных вселенных?

Во-первых, можно отметить, что многие возможные истории Вселенной не прошли стадию формирования галактик и звезд, без которой мы с вами не могли возникнуть. Хотя, конечно, нельзя исключить, что разумные существа могут возникнуть и эволюционировать без галактик и звезд, все же это маловероятно. То есть история, в которой мы живем, задается, в частности, уже тем, что в ней есть мы — существа, способные задать вопрос «Почему Вселенная именно такая?». Следовательно, она принадлежит к меньшинству историй, где есть галактики и звезды.

Перед нами образчик так называемого антропного принципа. Антропный принцип гласит, что Вселенная должна быть примерно такой, как мы наблюдаем, потому что иначе некому было бы ее наблюдать (рис. 3.10).

Многим ученым антропный принцип не нравится, поскольку не слишком строг и, похоже, не обладает предска-



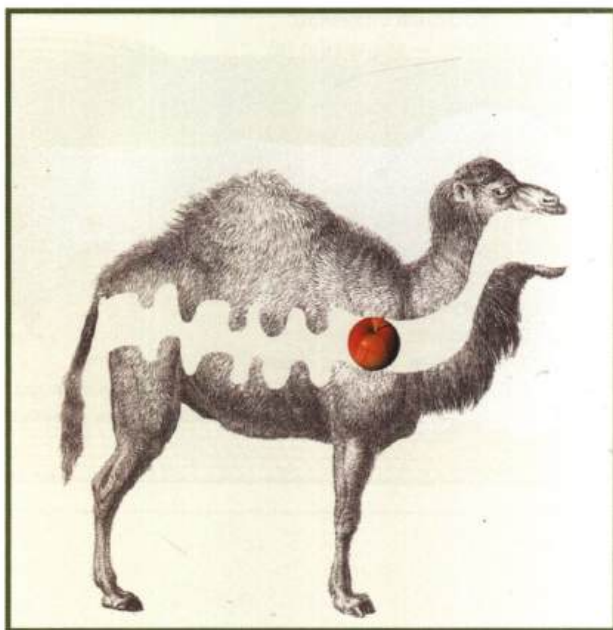
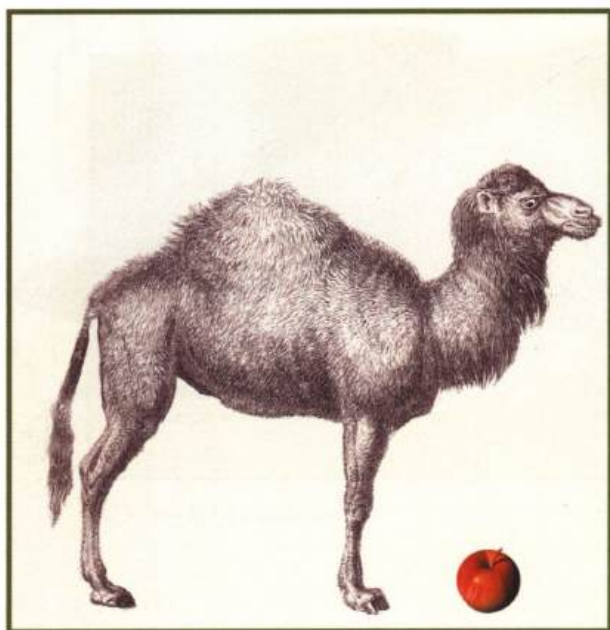


Рис. 3.11
Трубочка для коктейля издалека
кажется одномерной линией.

тельной силой. Зато он поддается точной формулировке, а без этого, похоже, невозможно ответить на вопрос о происхождении Вселенной. М-теория, описанная в главе 2, допускает очень много возможных историй Вселенной. Большинство этих историй не предполагает возникновения разумной жизни: такие вселенные либо пусты, либо живут совсем немного, либо слишком искривлены, либо не подходят еще по каким-то параметрам. Однако, согласно Ричарду Фейнману и его идее множественной истории, необитаемые истории, вероятно, обладают высокой вероятностью (рис. 3.9).

Более того, не очень важно, сколько именно возможно историй, в которых нет места разумным существам. Нас интересует только то подмножество историй, в которых появилась разумная жизнь. Причем разумная жизнь — это не обязательно что-то похожее на людей. Годаются и маленькие зеленые пришельцы. Может, они даже и лучше. Люди, как правило, ведут себя не очень-то разумно.

В качестве примера антропного принципа рассмотрим количество пространственных измерений. Повседневный опыт учит, что мы живем в трехмерном пространстве. То есть мы можем описать положение точки в пространстве тремя числами — ну, например, широтой, долготой и высотой над уровнем моря. Но почему оно



Рис. 3.12А

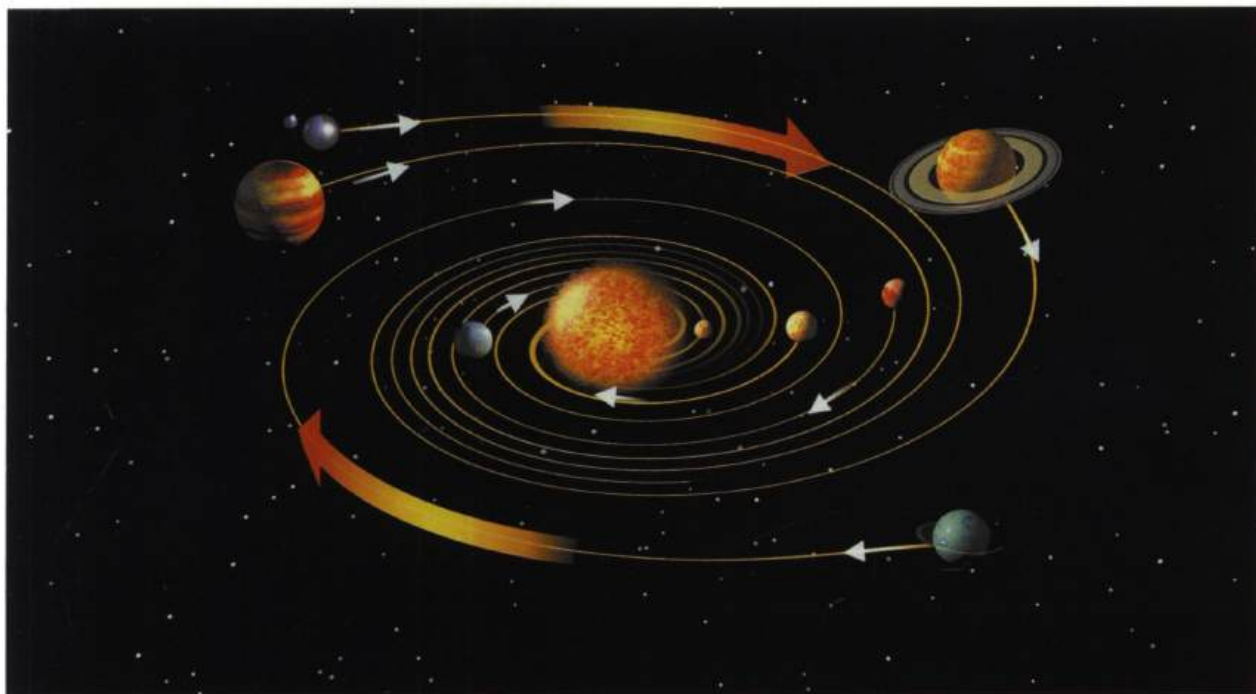


Рис. 3.12В

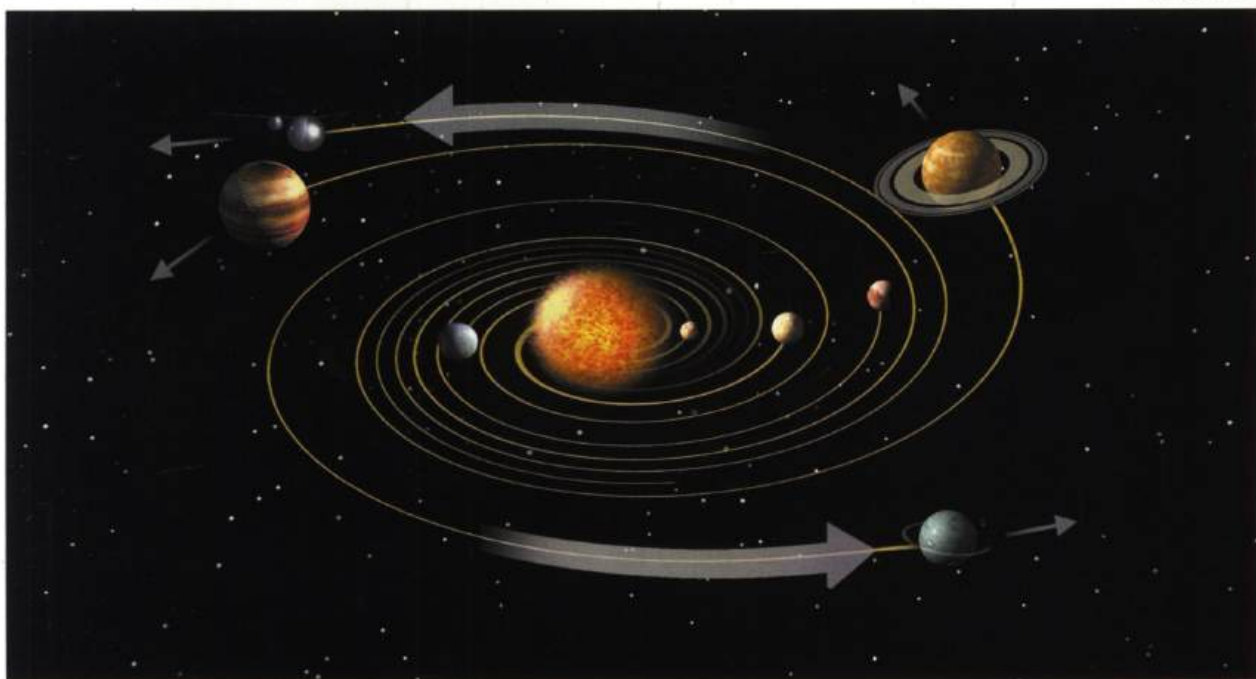




Рис. 3.13

Самая простая история в мнимом времени без границ — это сфера. Она определяет историю в действительном времени, которая расширяется по инфляционному сценарию.

трехмерное? Почему в нем не два, не четыре, не еще сколько-то измерений, как в научной фантастике? Согласно М-теории, у пространства девять или десять измерений, однако шесть или семь из них свернуты и очень малы, так что остается всего три, большие и практически плоские (рис. 3.11).

Почему мы живем не в той истории, в которой восемь измерений свернуты, и замечаем мы только оставшиеся два? Двумерному животному было бы трудно переваривать пищу. Пищеварительный тракт проходил бы у него прямо насквозь, и бедное создание разделилось бы напополам и развалилось. Поэтому двух плоских измерений мало для такого сложного организма, как разумная жизнь. С другой стороны, если бы у нас было четыре или еще больше почти плоских измерений, гравитационная тяга между двумя телами быстрее усиливалась бы при их сближении. То есть у планет не было бы стабильных орбит вокруг звезд. Они или падали бы на свое солнце (рис. 3.12A), или вылетали бы в холод и темноту межзвездного пространства (рис. 3.12B).

Подобным же образом не было бы стабильных орбит у электронов в атомах, так что не существовало бы вещества в том виде, в каком мы его знаем. Таким образом, хотя теория множественных историй допускает любое количество почти плоских измерений, разум-



Рис. 3.14

Энергия вещества

Энергия гравитации

ные существа могут жить лишь в историях с тремя плоскими измерениями. Только в таких историях есть кому задать вопрос: «Почему у пространства три измерения?»

Самая простая история Вселенной в мнимом времени — это сфера вроде поверхности Земли, но еще с двумя измерениями (рис. 3.13). Она определяет вот такую историю Вселенной в реальном времени, которое мы воспринимаем: Вселенная одинакова в любой точке пространства и расширяется во времени. В этом смысле она похожа на ту Вселенную, где мы живем. Но при этом темп расширения получается очень большим и со временем еще ускоряется. Такое расширение с ускорением называется «инфляция», поскольку это похоже на то, как растут цены, — все время и чем дальше, тем быстрее.

Принято считать, что ценовая инфляция — это плохо, однако в случае Вселенной инфляция — это очень полезно. Сильное расширение сглаживает все ухабы и неровности, которые, вероятно, были в ранней Вселенной. Расширяясь, Вселенная заимствует энергию у гравитационного поля, чтобы создать дополнительное вещество.

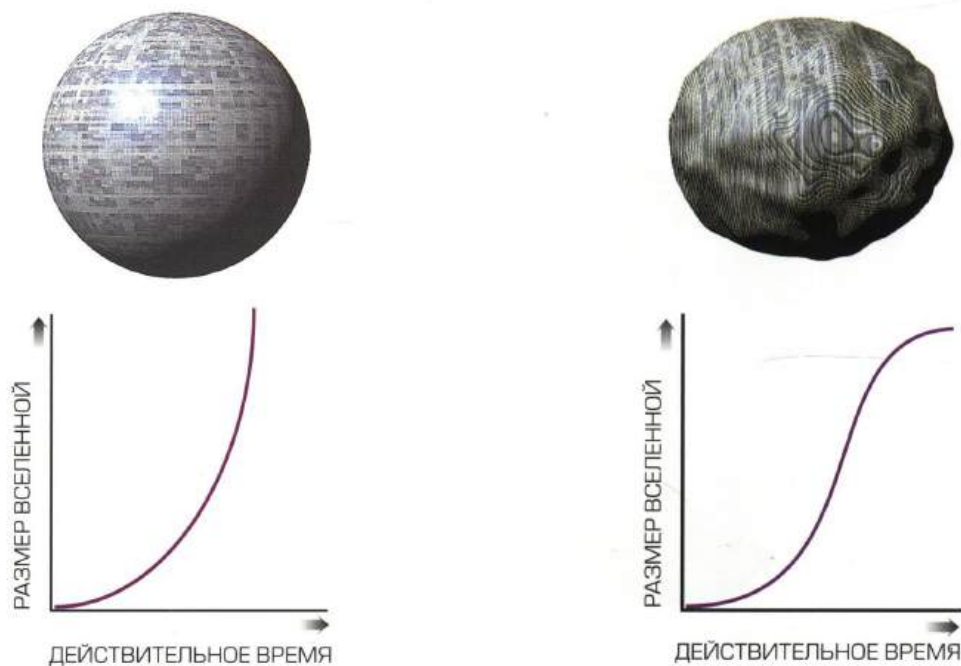


Рис. 3.15. ИНФЛЯЦИОННАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Согласно модели горячего Большого взрыва, у тепла в ранней Вселенной не было времени, чтобы перетекать из одной области в другую. Тем не менее мы наблюдаем, что, куда бы мы ни посмотрели, температура фонового микроволнового излучения одинакова. Это значит, что в начальном состоянии температура Вселенной везде была в точности одна и та же.

В попытке найти модель, где много разных начальных конфигураций развивались бы во что-то похожее на нынешнюю Вселенную, было выдвинуто предположение, что ранняя Вселенная, вероятно, прошла период очень быстрого расширения. Такое расширение называют инфляционным, поскольку его темп постоянно ускоряется, а не замедляется, как показывают сегодняшние наблю-

дения за расширением Вселенной¹. Наличие подобной инфляционной фазы помогло бы ответить на вопрос о том, почему Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях, поскольку у света в ранней Вселенной хватило бы времени, чтобы перемещаться из одной области в другую.

История Вселенной, которая постоянно расширяется с ускорением на инфляционный манер, в мнимом времени соответствует идеальной сфере. Но в нашей Вселенной инфляционное расширение через долю секунды после Большого взрыва замедлилось, и смогли образоваться галактики. А значит, в мнимом времени наша Вселенная — это сфера с чуть-чуть приплюснутым южным полюсом.

¹ Современные данные о распределении и светимости сверхновых типа Ia, вероятно, говорят о том, что наша Вселенная и сегодня расширяется с ускорением. За это открытие в 2011 году американцам Сону Перамуттеру и Адаму Риссу и австралийцу Брайану Шмидту была присуждена Нобелевская премия. — *Прим. ред.*



ИНДЕКС ОПТОВЫХ ЦЕН — ИНФЛЯЦИЯ И ГИПЕРИНФЛЯЦИЯ

Июль 1914 года —	1,0		Одна немецкая марка 1914 года
Январь 1919 года —	2,6		
Июль 1919 года —	3,4		
Январь 1920 года —	12,6		Десять тысяч марок 1923 года
Январь 1921 года —	14,4		
Июль 1921 года —	14,3		Два миллиона марок 1923 года
Январь 1922 года —	36,7		
Июль 1922 года —	100,6		Десять миллионов марок 1923 года
Январь 1923 года —	2785,0		
Июль 1923 года —	194 000,0		Миллиард марок 1923 года
Ноябрь 1923 года —	726 000 000 000,0		

Положительная энергия вещества идеально уравновешена отрицательной энергией гравитации, так что общая энергия равна нулю. Когда размер Вселенной удваивается, удваиваются и энергии вещества и гравитации, но дважды ноль все равно ноль (рис. 3.14). Если бы только в банковском деле все было так просто!

Если бы история Вселенной в мнимом времени была идеально круглой сферой, соответствующая история в действительном времени представляла бы собой Вселенную, которая вечно расширяется с ускорением на инфляционный манер. Пока Вселенная инфляционно расширяется, вещество не может сгущаться в галактики и звезды, и жизнь — не говоря уже о разумной жизни вроде нас — не развивается. Так что хотя идея множественной истории вполне допускает истории Вселенной в мнимом времени, представляющие собой идеальные сферы, они нас не

Рис. 3.16
ВЕРОЯТНО, ИНФЛЯЦИЯ —
ЭТО ЗАКОН ПРИРОДЫ

Инфляция в Германии росла после окончания войны, и к февралю 1920 года уровень цен был в пять раз выше, чем в 1918 году. После июля 1922 года началась фаза гиперинфляции. Деньгам окончательно перестали доверять, и индекс цен рос все быстрее и быстрее на протяжении года и трех месяцев, обгоняя печатные станки, которые не успевали за обесцениванием денег. К концу 1923 года 300 типографий работали на полной мощности, 2000 станков, принадлежавших 150 печатным компаниям, не выключались круглые сутки и бесперебойно поставляли купюры.



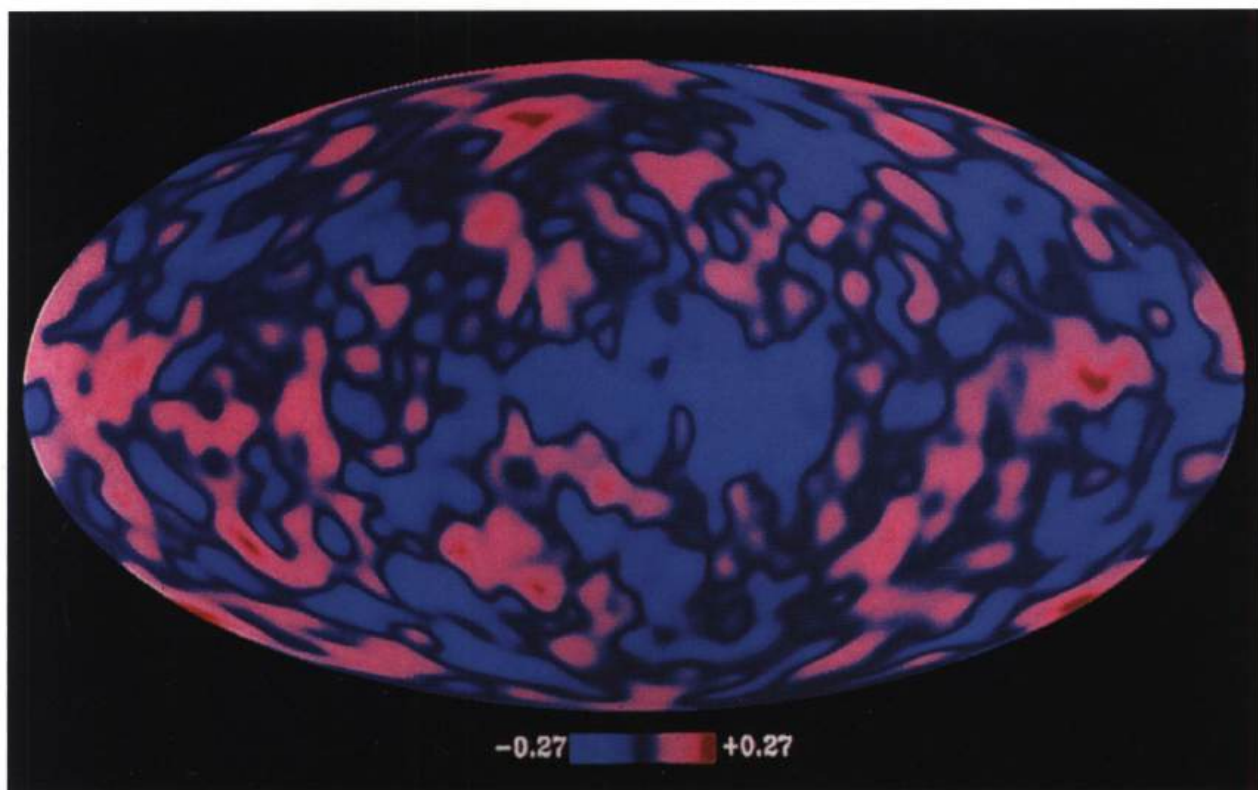
Рис. 3.17. ВЕРОЯТНЫЕ
И НЕВЕРОЯТНЫЕ ИСТОРИИ

Гладкие истории вроде (а) — самые вероятные, но их очень мало.

Каждая из слегка неправильных историй типа (b) и (c) менее вероятна, однако их так много, что самые вероятные истории Вселенной будут не вполне гладкими.

очень интересуют. А вот истории в мнимом времени, которые представляют собой сферы, слегка приплюснутые с южного полюса, для нас гораздо более актуальны (рис. 3.15). В этом случае соответствующая история в действительном времени будет сначала расширяться с ускорением — то есть по инфляционному сценарию. А затем расширение замедляется, и могут образовываться галактики. Чтобы развилась разумная жизнь, приплюснутость на южном полюсе должна быть очень маленькой. Она означает, что поначалу Вселенная расширится невероятно сильно. Рекорд денежной инфляции зарегистрирован в Германии в период между мировыми войнами, когда цены выросли в миллиарды раз, но инфляция в ранней Вселенной должна была быть как минимум в миллиард миллиардов миллиардов раз сильнее (рис. 3.16).

Благодаря принципу неопределенности разумная жизнь во Вселенной могла возникнуть в ходе не одной, а нескольких историй. Среди историй в мнимом времени есть целое семейство слегка де-



формированных сфер, каждая из которых соответствует истории в действительном времени, где инфляция Вселенной происходит долго, но все же не бесконечно. Теперь можно задаться вопросом, какие из этих допустимых историй наиболее вероятны. Оказывается, что самые вероятные истории не совсем гладкие, на них есть небольшие бугорки и впадинки (рис. 3.17). Бугорки на самых вероятных историях прямо-таки микроскопические. Отклонение от гладкости составляет порядка одной стотысячной доли. Но при всей их миниатюрности мы сумели зарегистрировать их в виде мелких вариаций фонового микроволнового излучения, приходящего к нам с разных сторон космоса. В 1989 году был запущен спутник COBE, который составил карту неба в микроволновом диапазоне. Разным цветом на этой карте отмечены разные температуры, однако весь диапазон от красного до синего составляет всего около одной десятитысячной градуса. Но этих вариаций между разными областями ранней Вселенной достаточно, чтобы в более

Карта неба, выполненная радиометром DMR на спутнике COBE. На ней видны «морщинки времени».

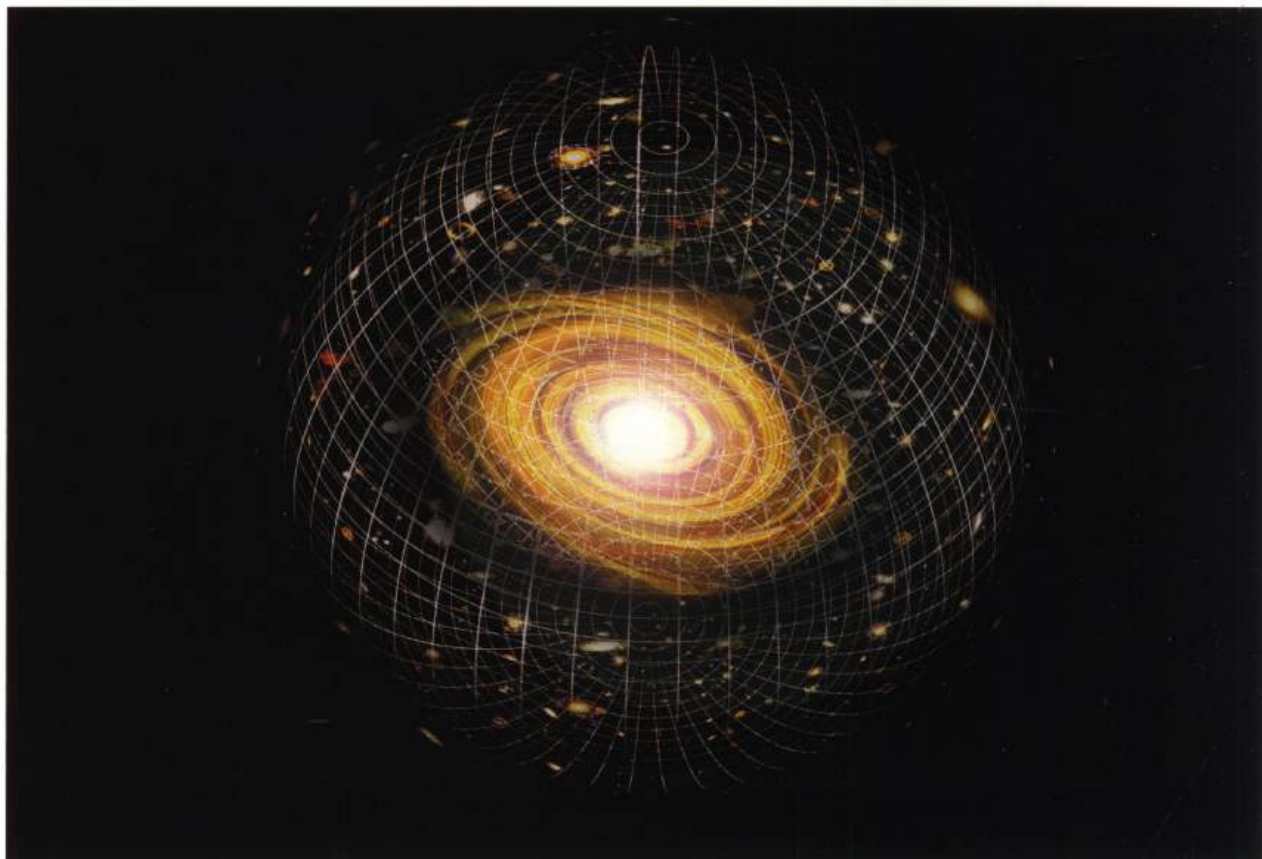


Рис. 3.18 (вверху)

Один из вариантов конца Вселенной — «Большое сжатие», когда все вещество засосется в огромную катастрофическую гравитационную яму.

Рис. 3.19 (справа)

Долгое холодное угасание: все мало-помалу отключается, гаснут последние звезды, израсходовав все свое топливо.

плотных областях возникла дополнительная гравитационная тяга, которая в конце концов не позволяет им расширяться и заставляет схлопываться под собственной тяжестью, в результате чего и образуются галактики и звезды. Так что — хотя бы в принципе — карта COBE представляет собой отпечаток всех крупномасштабных структур Вселенной.

Как же поведут себя в будущем самые вероятные истории Вселенной, совместимые с появлением разумных существ? Вариантов, похоже, много, и все зависит от количества вещества во Вселенной. Если оно больше определенной критической величины, то гравитационная тяга между галактиками замедлит их и в конце концов не даст разлетаться. Затем они начнут падать друг на друга и в конце истории Вселенной в действительном времени получится куча-мала — «Большое сжатие» (рис. 3.18).



Если плотность Вселенной ниже критического значения, гравитация слишком слаба и не может помешать галактикам разлетаться вечно. Все звезды выгорят, Вселенная будет становиться все более холодной и пустой. Но потом опять же все кончится — просто не так зрелищно. Так или иначе, Вселенной хватит еще на добрых несколько миллиардов лет (рис. 3.19).

Вероятно, Вселенная, помимо вещества, содержит еще и так называемую энергию вакуума — энергию, которая присутствует даже в пустом на первый взгляд пространстве. Согласно знаменитому уравнению Эйнштейна $E = mc^2$, у энергии вакуума есть масса. Это значит, что она оказывает на расширение Вселенной гравитационное воздействие. Однако примечательно, что воздействие энергии вакуума противоположно воздействию вещества. Вещество замедляет расширение Вселенной и в конечном итоге способно остановить

БЫЛА ЛИ
КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ
КОНСТАНТА
МОЕЙ ВЕЛИЧАЙШЕЙ
ОШИБКОЙ?

Альберт Эйнштейн

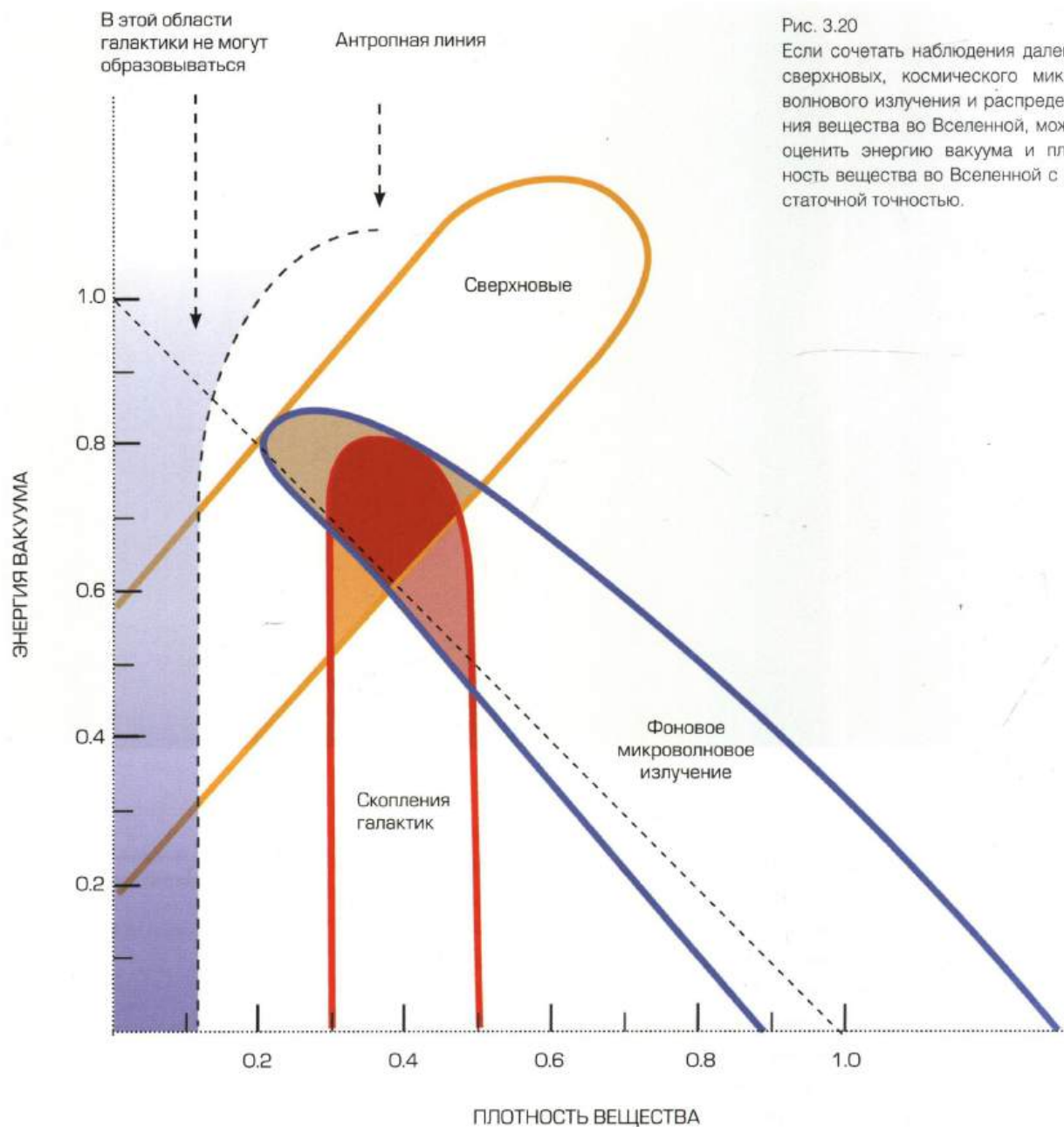


Рис. 3.20

Если сочетать наблюдения далеких сверхновых, космического микроволнового излучения и распределения вещества во Вселенной, можно оценить энергию вакуума и плотность вещества во Вселенной с достаточной точностью.



его и обратить вспять. А энергия вакуума, напротив, вызывает ускорение расширения — инфляцию. В сущности, энергия вакуума действует как космологическая константа, о которой мы говорили в главе 1, — та самая, которую Эйнштейн добавил в первоначальные уравнения в 1917 году, когда понял, что они не допускают решения, отражающего статичную Вселенную. Когда Хаббл открыл, что Вселенная расширяется, отпала необходимость добавлять в уравнения еще один член, и Эйнштейн отказался от космологической константы, решив, что ошибся.

Но может статься, что он вовсе не ошибался. Как рассказано в главе 2, теперь мы понимаем, что из квантовой теории следует, что пространство-время полно квантовых флуктуаций. Согласно суперсимметричной теории, бесконечные положительные и отрицательные энергии нулевых колебаний частиц с разными спинами взаимоничтожаются. Но нельзя ожидать, чтобы положительные и отрицательные энергии взаимоуничтожились с такой точностью, что не осталось ни малейшего конечного количества энергии вакуума: состояние Вселенной не суперсимметрично. Единственная неожиданность — энергия вакуума так близка к нулю, что некоторое время назад ее существование было незаметно. Вероятно, это еще один пример антропного принципа. В истории, где энергии вакуума больше, не формируются галактики, поэтому там нет существ, которые задали бы вопрос: «Почему мы наблюдаем именно такое количество энергии вакуума?»

Количество вещества и энергии вакуума во Вселенной можно измерить на основании различных наблюдений. Результаты можно представить в виде графика, на котором плотность вещества отложена по горизонтальной оси, а энергия вакуума — по вертикальной. Пунктиром обозначена граница области, где возможно развитие разумной жизни (рис. 3.20).

Результаты наблюдений сверхновых звезд, скоплений галактик и фонового микроволнового излучения показаны на этом графике как области сложной формы. К счастью, все они пересекаются. Если плотность вещества и энергия вакуума попадают в это пересечение, значит, расширение Вселенной снова начало ускоряться после длительного периода замедления. Похоже, инфляция — это закон природы.

В этой главе мы увидели, как можно понять поведение огромной Вселенной с точки зрения ее истории в мнимом времени, которая представляет собой крошечную, чуть-чуть приплюснутую сферу.



Совсем как скорлупа ореха, о которой говорит Гамлет, просто в ней зашифровано все, что происходит в действительном времени. Так что Гамлет был совершенно прав. Даже в скорлупе ореха мы можем считать себя повелителями бесконечной Вселенной.

Себя я даже в скорлупе ореха
Считал бы повелителем Вселенной...

Шекспир, «Гамлет», акт II, сцена 2
(пер. Н. Самойлова)



ГЛАВА 4

КАК ПРЕДСКАЗАТЬ БУДУЩЕЕ

*Почему черные дыры, поглощая информацию,
мешают нам предсказывать будущее.*





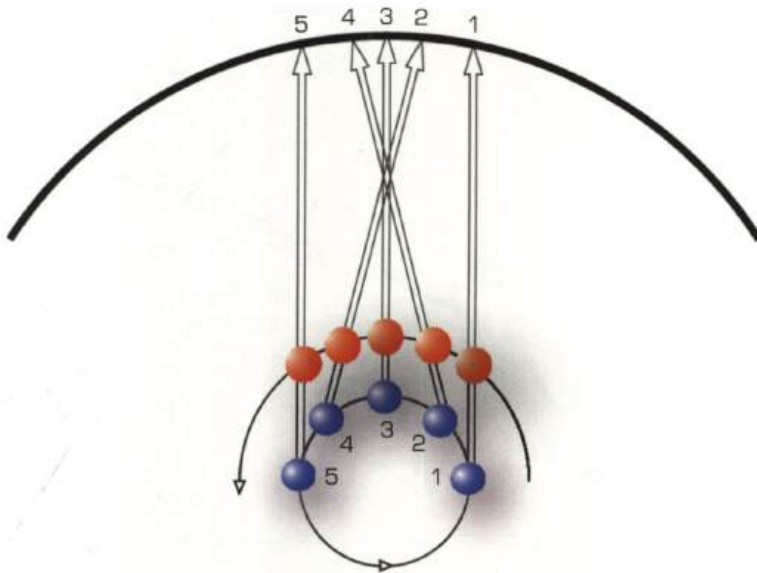


Рис. 4.1

Наблюдатель с Земли (голубой шарик), вращающейся вокруг Солнца, смотрит на Марс (розовый шарик) на фоне созвездий.

Наблюдаемое движение планет по небосводу только кажется сложным, а на самом деле определяется законами Ньютона и никак не влияет на судьбы конкретных людей.

Людям испокон веку хотелось управлять будущим или по крайней мере предсказывать его. Вот почему астрология так популярна. Астрология утверждает, что события на Земле связаны с движением планет по небу. Эту гипотезу можно проверить научно, точнее, можно было бы, если бы астрологи набрались храбрости делать четкие предсказания, поддающиеся проверке. Однако они поступают осмотрительно и формулируют свои прогнозы так расплывчато, что они применимы к любому результату. Утверждения вроде «возможна напряженность в отношениях с близкими» или «не упустите возможности поправить свое финансовое положение» нельзя опровергнуть.

Однако подлинная причина, по которой большинство ученых не верят в астрологию, — не научные данные или их недостаток, а несоответствие с другими теориями, которые проверены экспериментально.

Когда Коперник и Галилей обнаружили, что планеты движутся по орбитам не вокруг Земли, а вокруг Солнца, а Ньютон открыл законы, управляющие их движением, астрология стремительно утратила правдоподобие. С какой стати положение планет на фоне неба с точки зрения земного наблюдателя должно иметь какую-то связь с макромолекулами на одной планетке, которые называют себя разумной



«В ближайший месяц Марс будет в созвездии Стрельца, и для вас наступит время самопознания. Марс велит жить так, как считаете нужным вы, а не окружающие. И так и будет.

Двадцатого числа Сатурн окажется в той части вашей карты солнечного возвращения, которая отвечает за постоянство и карьерный рост, и вы научитесь брать на себя ответственность и правильно вести себя при сложностях во взаимоотношениях.

Однако в полнолуние вас ждет чудесное озарение, и вы сумеете по-новому посмотреть на свою жизнь, что полностью преобразит вас».

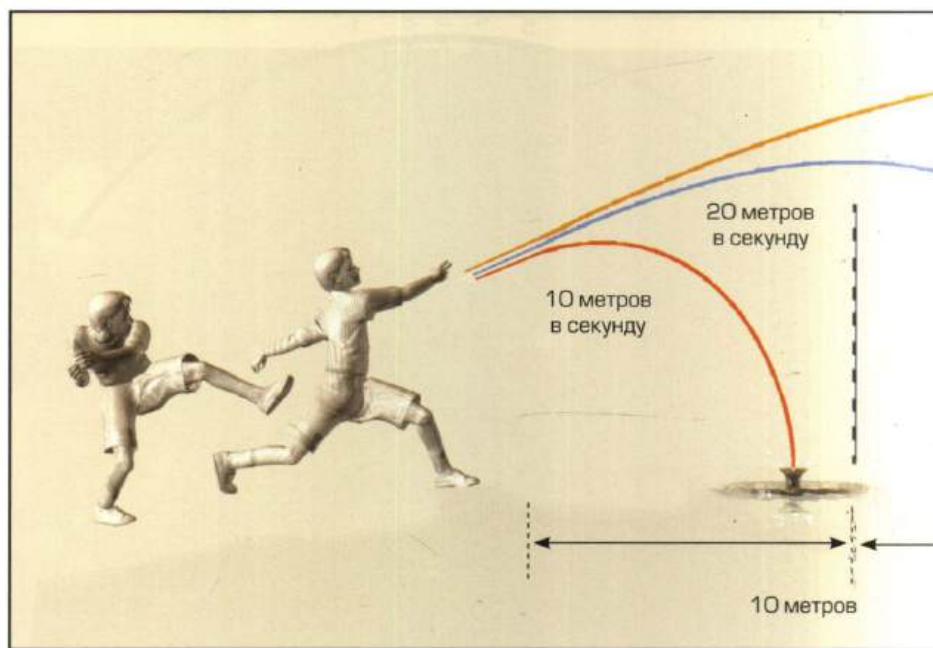


Рис. 4.2

Если знаешь, откуда и с какой скоростью бросили бейсбольный мяч, можешь предсказать, куда он полетит.

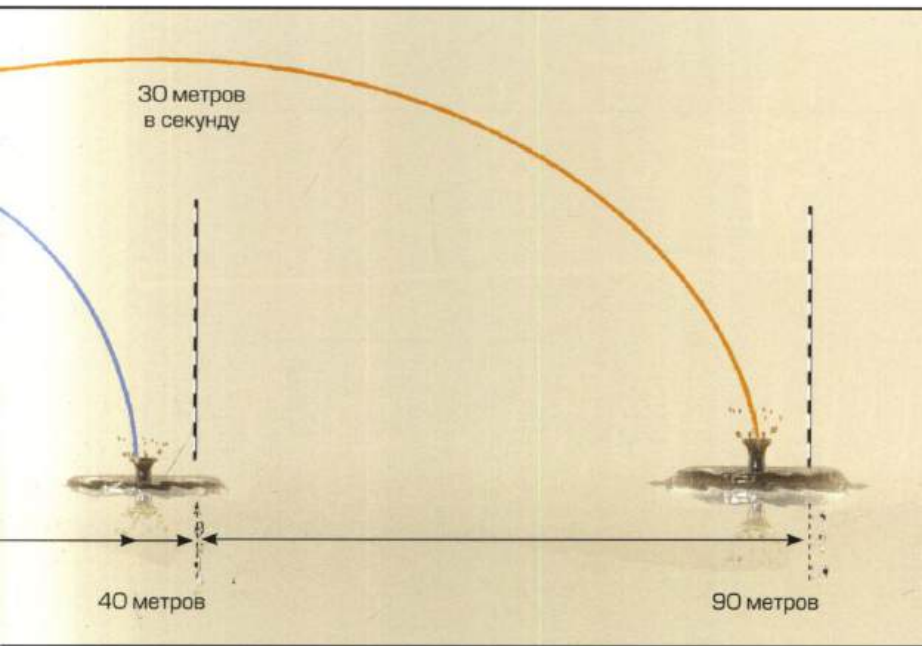


Рис. 4.3

жизнью (рис. 4.1)? Однако именно в этом убеждает нас астрология. Экспериментальных доказательств в пользу некоторых теорий, описанных в этой книге, не больше, чем в пользу астрологии, однако мы в них верим, поскольку они соответствуют другим теориям, прошедшим проверку.

Успех законов Ньютона и других физических теорий привел к идее научного детерминизма, которую первым сформулировал в начале XIX века французский ученый маркиз де Лаплас. Лаплас предположил, что если бы мы знали положение и скорость всех частиц во Вселенной в данный момент времени, законы физики позволили бы нам определить состояние Вселенной в любой другой момент и в прошлом, и будущем (рис. 4.2).

Иначе говоря, если научный детерминизм себя оправдывает, мы, в принципе, должны уметь предсказывать будущее безо всякой астрологии. На практике, разумеется, даже самая несложная теория вроде ньютонова закона всемирного тяготения дает уравнения, которые мы не можем решить для системы, состоящей больше чем из двух частиц. Более того, зачастую у уравнений появляется качество, которое мы называем «хаотизация», когда крошечное изменение в положении или скорости в один момент времени может привести



к огромным изменениям в поведении системы в последующие моменты. Всякий, кто видел «Парк Юрского периода», знает, что крошечное изменение в одном месте порождает колоссальные перемены в другом. Бабочка, взмахнувшая крылышками в Токио, может вызвать дождь в нью-йоркском Центральном парке (рис. 4.3). Беда в том, что эту последовательность событий невозможно повторить. Когда бабочка взмахнет крылышками в следующий раз, множество других факторов окажутся иными и повлияют на погоду совсем по-другому. Вот почему прогнозы погоды так ненадежны.

Таким образом, хотя законы квантовой электродинамики в принципе должны позволять нам рассчитывать в химии и биологии решительно все, мы не добились особых успехов в прогнозах человеческого поведения с помощью математических уравнений. Тем не менее, несмотря на практические сложности, большинство ученых утешаются мыслью, что будущее — опять же в принципе — предсказуемо.

На первый взгляд представляется, что принцип неопределенности — это угроза для детерминизма, поскольку он гласит, что мы не

ВВОД



?!



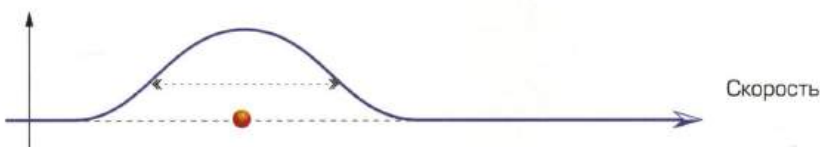
ВЫВОД



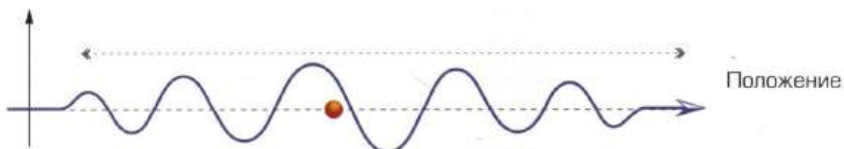
ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ
С РЕЗКИМ ПИКОМ Ψ



ВЕРОЯТНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
СКОРОСТИ ЧАСТИЦЫ



ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВОЛН Ψ



ВЕРОЯТНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
СКОРОСТИ ЧАСТИЦЫ



Рис. 4.4

Волновая функция определяет вероятность того, что у частицы будут некоторые положения и скорости, но такие, что x и v подчиняются принципу неопределенности.

можем точно измерить и положение, и скорость частицы одновременно. Чем точнее мы измеряем положение, тем с меньшей точностью измеряем скорость — и наоборот. Лапласовская версия научного детерминизма гласила, что если мы знаем положение и скорость частиц в данный момент, то можем определить их положение и скорость в любой момент в будущем. Но с чего, собственно, начать, если принцип неопределенности не позволяет точно узнать одновременно и положение, и скорость? Каким бы мощным ни был наш компьютер, если ввести в него негодные данные, получатся негодные прогнозы.

Однако детерминизм восстановили в правах, несколько видоизменив, в рамках новой теории — квантовой механики, которая учитывает и принцип неопределенности. Грубо говоря, в квантовой механике можно точно предсказать половину того, что обещает нам классическая лапласовская точка зрения. В квантовой меха-



$$\psi_0 \bar{\psi}_0 = \sqrt{\frac{m}{\hbar}} e^{-2(\sqrt{\alpha} \vec{x}_i^2 + A x)}$$

$$i\hbar \frac{d}{dt} \psi(\vec{x}, t) = H \psi(\vec{x}, t)$$

нике у частицы нет точно определенного положения и скорости, зато ее состояние можно задать так называемой волновой функцией (рис. 4.4).

Волновая функция — это число в каждой точке пространства, соответствующее вероятности того, что в этом месте будет обнаружена частица. Темп изменения волновой функции от точки к точке говорит, насколько вероятны разные скорости частиц. Некоторые волновые функции в какой-то точке пространства имеют резкий пик. В таких случаях неопределенность положения частицы очень мала. Но еще на графике видно, что в таких случаях волновая функция поблизости от этой точки очень быстро меняется — вверх с одной стороны и вниз с другой. Это значит, что распределение вероятности для скорости имеет большой диапазон. То есть неопределенность скорости высока. А теперь рассмотрим непрерывную последовательность волн (волновой пакет). Здесь высока неопределенность положения,

Рис. 4.5
УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА

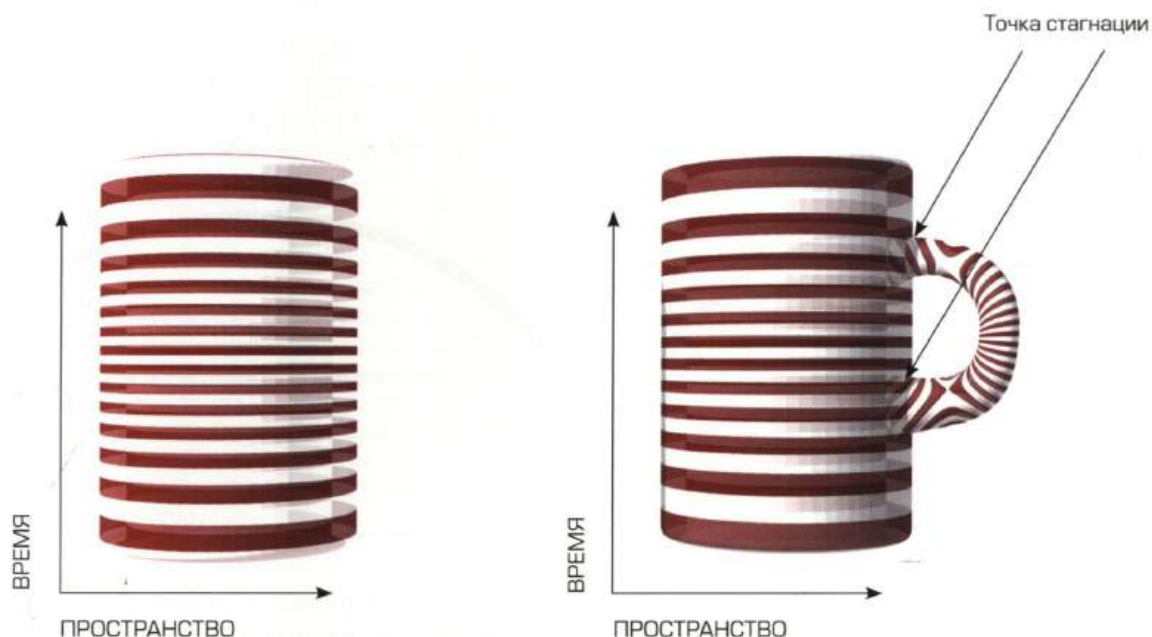
Эволюция во времени волновой функции определяется гамильтонианом H , оператором, ассоциируемым с энергией рассматриваемой физической системы.



Рис. 4.6. В плоском пространстве-времени специальной теории относительности наблюдатели, двигающиеся с разной скоростью, измеряют разное время, но при помощи уравнения Шрёдингера каждый из них может в любой из моментов времени определить, какой будет волновая функция в будущем.

зато невелика неопределенность скорости. Так что описание частицы при помощи волновой функции не предполагает точного описания ее положения или скорости. Оно удовлетворяет принципу неопределенности. Теперь мы понимаем, что хорошо определить мы можем только одно — волновую функцию. Мы не можем даже предположить, что у частицы есть положение и скорость, известные Богу, но скрытые от нас. Такие теории «скрытой переменной» предсказывают результаты, не соответствующие наблюдениям. Даже Бог подчиняется принципу неопределенности и не знает одновременно скорость и положение частицы; Он знает только волновую функцию.

Темп изменения волновой функции со временем задается так называемым уравнением Шрёдингера (рис. 4.5). Если мы знаем волновую функцию в данный момент, то можем при помощи уравнения Шрёдингера вычислить ее в любой другой момент в прошлом или будущем. Поэтому и в квантовой теории есть детерминизм, просто редуцированный. Мы можем предсказать только волновую функцию, а не положение и скорость одновременно. А это дает возможность предсказать либо положение, либо скорость, но не и то, и другое точно. То есть в квантовой теории способность делать точные прогнозы — ровно половина от того, что предполагает классическое

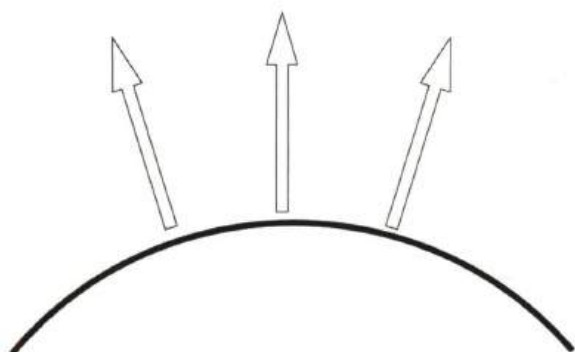


лапласовское мировоззрение. Но и в этих рамках все равно можно утверждать, что существует детерминизм.

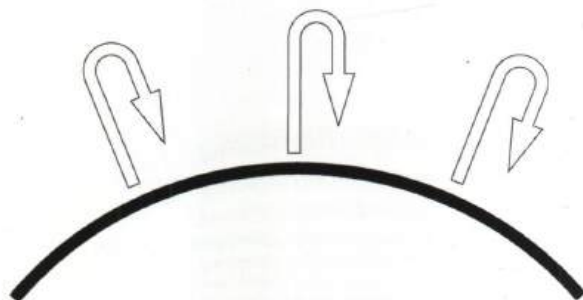
Тем не менее применение уравнения Шрёдингера для вычисления эволюции волновой функции во времени (то есть для предсказания, что произойдет в будущем), по сути дела, предполагает, что время везде течет гладко и вечно. В ньютоновской физике, несомненно, так и есть. Время абсолютно, то есть каждому событию в истории Вселенной приписана метка, которая называется время, и череда таких меток плавно течет из бесконечного прошлого в бесконечное будущее. Казалось бы, именно так выглядит время с точки зрения здравого смысла, и именно такая картина времени присутствует в сознании большинства людей и даже большинства физиков. Однако, как мы уже знаем, в 1905 году понятие абсолютного времени было опровергнуто специальной теорией относительности, где время перестало быть независимой величиной, а превратилось просто в одно из измерений четырехмерного континуума под названием пространство-время. В специальной теории относительности разные наблюдатели, перемещающиеся с разными скоростями, движутся сквозь пространство-время по разным траекториям, и каждый из них по-своему измеряет время на своей траектории, причем у раз-

Рис. 4.7.
ВРЕМЯ ОСТАНОВЛИВАЕТСЯ

При измерении времени обязательно должны быть точки стагнации, где ручка входит в главный цилиндр, — точки, где время стоит. В этих точках время не увеличивается ни в каком направлении, поэтому невозможно рассчитать волновую функцию в будущем при помощи уравнения Шрёдингера.



Свет, исходящий от звезды



Свет, захваченный массивной звездой

Рис. 4.9

Рис. 4.8



ных наблюдателей получатся разные промежутки времени между одними и теми же событиями (рис. 4.6).

Таким образом, в специальной теории относительности нет единого абсолютного времени, при помощи которого мы можем ставить метки на события. Однако пространство-время специальной теории относительности плоское. А значит, в рамках специальной теории относительности время, измеряемое свободно движущимся наблюдателем, плавно увеличивается в пространстве-времени от минус бесконечности в бесконечном прошлом до плюс бесконечности в бесконечном будущем. Все эти меры времени мы можем применять в уравнении Шрёдингера, чтобы проследить изменения волновой функции. Так что в рамках специальной теории относительности мы по-прежнему располагаем квантовой версией детерминизма.

В общей теории относительности все обстоит иначе, поскольку там пространство-время не плоское, а искривленное и искажено содержащимися в нем веществом и энергией. В нашей Солнечной системе искривление пространства-времени совсем невелико, по крайней мере, на макроскопическом масштабе, поэтому оно не влияет на наше представление о времени¹. В этой ситуации мы мо-

¹ Тем не менее искривление пространства-времени в околоземном пространстве с необходимостью учитывается в работе широко используемых в наше время систем позиционирования, скажем GPS и ГЛОНАСС. — Прим. ред.



ЧЕРНАЯ ДЫРА ШВАРЦШИЛЬДА

В 1916 году немецкий астроном Карл Шварцшильд нашел решение уравнений эйнштейновской общей теории относительности, соответствовавшее сферической черной дыре. Работа Шварцшильда выявила поразительное следствие из общей теории относительности. Она продемонстрировала, что если масса звезды сосредоточена в достаточно маленькой области, гравитационное поле на поверхности звезды становится настолько сильным, что оттуда не может вырваться даже свет. Именно это мы теперь называем черной дырой, областью пространства-времени, ограниченную так называемым горизонтом событий, откуда не может вырваться ничто, в том числе свет, и далекий наблюдатель ее не видит.

Долгое время большинство ученых, в том числе и сам Эйнштейн, скептически относились к тому, что подобные

экстремальные конфигурации вещества могут встречаться в реальной Вселенной. Но теперь мы понимаем, что когда любая достаточно тяжелая неврашающаяся звезда — независимо от сложности ее формы и внутренней структуры — пережигает все свое ядерное топливо, она неизбежно схлопывается в идеально сферическую черную дыру Шварцшильда. Радиус горизонта событий черной дыры R зависит только от ее массы и задается формулой

$$R = 2GM/c^2$$

В этой формуле c — это скорость света, G — гравитационная постоянная Ньютона, M — масса черной дыры. Черная дыра с такой же массой, как у Солнца, имела бы радиус всего три километра!

жем по-прежнему опираться на это время в уравнении Шрёдингера, чтобы получать детерминистскую эволюцию волновой функции. Но как только мы допустим, что пространство-время искривлено, то откроем двери возможности, что у пространства-времени есть структура, которая не допускает, чтобы время плавно увеличивалось в любой системе отсчета, как нам хотелось бы думать. Например, предположим, что пространство-время имеет форму вертикального цилиндра (рис. 4.7).

По высоте цилиндра откладывается время, увеличивающееся с точки зрения любого наблюдателя и идущее от минус бесконечности до плюс бесконечности. А теперь представьте себе, что пространство-время имеет форму цилиндра с ручкой («кротовой норой»), которая отходит от него, а потом входит обратно. Тогда любое измерение времени обязательно даст точки стагнации там, где ручка входит в главный цилиндр, — точки, где время стоит. В этих точках время с точки зрения любого наблюдателя не увеличивается. В таком пространстве-времени невозможно детерминистски рассчитать волновую функцию в будущем при помощи уравнения Шрёдингера. Остерегайтесь кротовых нор, никогда не знаешь, что из них вылезет!

Причина, по которой мы считаем, что время не для всех наблюдателей увеличивается, — это черные дыры. Впервые о них заговорили в 1783 году. Джон Мичелл, в прошлом кембриджский преподаватель, рассуждал следующим образом. Если запустить какое-то тело, на-



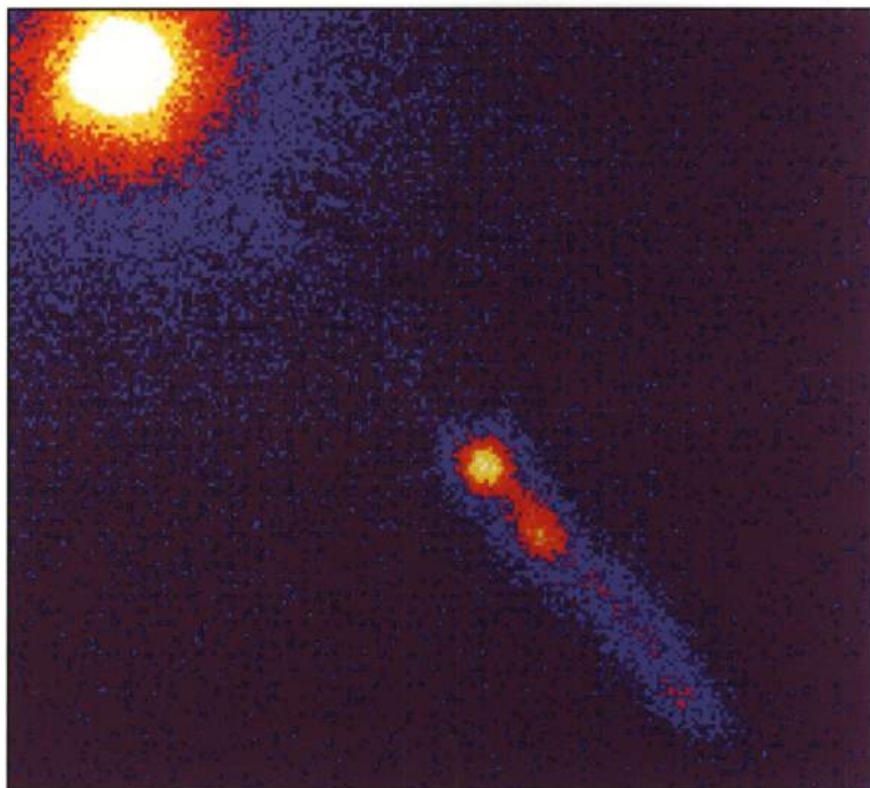


Рис. 4.10
Квазар 3C273, первый открытый квазизвездный радиоисточник, вырабатывает очень много энергии в небольшой области. Похоже, такую высокую светимость может обеспечить только вещество, падающее в черную дыру.

ДЖОН УИЛЕР

Джон Арчибалд Уилер родился в 1911 году во Флориде, в городе Джексонвиле. В 1933 году он получил докторскую степень в Университете Джонса Хопкинса за исследование рассеяния света атомом гелия. В 1938 году Уилер вместе с датским физиком Нильсом Бором работал над теорией расщепления атома. Через некоторое время Уилер вместе со своим студентом-старшекурсником Ричардом Фейнманом сосредоточился на исследованиях в области электродинамики, но вскоре Америка вступила во Вторую мировую войну, и оба — и Уилер, и Фейнман — были привлечены к работе над Манхэттенским проектом.

В начале пятидесятых годов Уилер, вдохновленный статьями Роберта Оппенгеймера о гравитационном коллапсе массивной звезды, опубликованной в 1939 году, занялся эйнштейновской общей теорией относительности.

В то время большинство физиков так или иначе занимались исследованиями в области ядерной физики, а общая теория относительности считалась не слишком важным направлением исследований в физике. Однако Уилер практически в одиночку изменил положение вещей — как своими исследованиями, так и преподавательской деятельностью: он читал в Принстоне первый курс лекций по теории относительности.

Значительно позднее, уже в 1969 году, Джон Уилер ввел в обращение термин «черная дыра». Так он называл вещество в состоянии коллапса, однако тогда почти никто не верил, что такое бывает. Вдохновленный работами Вернера Исраэля, Уилер заключил, что «у черных дыр нет волос», то есть любая невращающаяся массивная звезда в состоянии коллапса может быть описана решением Шварцшильда.



пример пушечное ядро, вертикально вверх, его подъем замедлится из-за гравитации, и в конце концов тело перестанет двигаться вверх и упадет обратно вниз (рис. 4.8). Но если первоначальная вертикальная скорость больше критического значения — второй космической скорости, — силы гравитации не хватит, чтобы остановить тело, и оно улетит. Вторая космическая скорость (скорость убегания) для Земли составляет около 12 километров в секунду, а для Солнца — около 618 километров в секунду.

Эти скорости убегания гораздо выше скорости настоящего пушечного ядра, но очень малы по сравнению со скоростью света — 300 000 километров в секунду. То есть свет улетает с Земли без особого труда. Однако Мичелл отметил, что наверняка существуют звезды гораздо массивнее Солнца, у которых вторая космическая скорость больше скорости света (рис. 4.9). И этих звезд мы не увидим, поскольку весь свет, который они испускают, притягивается обратно гравитацией звезды. Такие звезды Мичелл назвал темными звездами, а мы называем их черными дырами.

Гипотеза Мичелла о темных звездах была основана на ньютоновой физике, в которой время абсолютно и идет вперед невзирая ни на что. Поэтому в классической ньютоновой картине темные звезды не мешали нам предсказывать будущее. Однако в общей теории относительности, где массивные тела искривляют пространство-время, все совсем иначе.

В 1916 году, вскоре после того, как Эйнштейн выдвинул свою теорию, Карл Шварцшильд (незадолго до смерти — он умер от болезни, которой заболел в России во время Первой мировой войны) нашел решение уравнений общей теории относительности, которое описывало черную дыру. Много лет ученые не понимали ни сути, ни важности открытия Шварцшильда. Сам Эйнштейн так и не поверил в черные дыры, и его отношение разделяло большинство старой гвардии специалистов по общей теории относительности. Помню, как однажды я приехал в Париж, чтобы рассказать на семинаре о своем открытии, которое состояло в том, что из квантовой теории следует, что черные дыры не совсем черные. Мой семинар, в сущности, провалился, поскольку в то время в Париже в черные дыры почти никто не верил. К тому же французы считали, что в переводе — «trou noir» — у словосочетания «черная дыра» появляются сомнительные сексуальные коннотации, поэтому его следует заменить термином «astre osclu» — «скрытая звезда». Однако ни это выражение, ни прочие варианты названия не будоражили воображение публики, равно как



Рис. 4.11.
Звезды формируются из облаков газа и пыли, например вроде тех, которые находятся в туманности Орион.

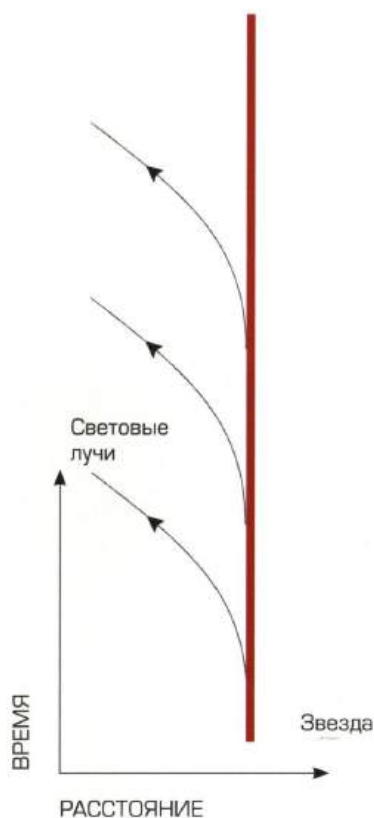


Рис. 4.12

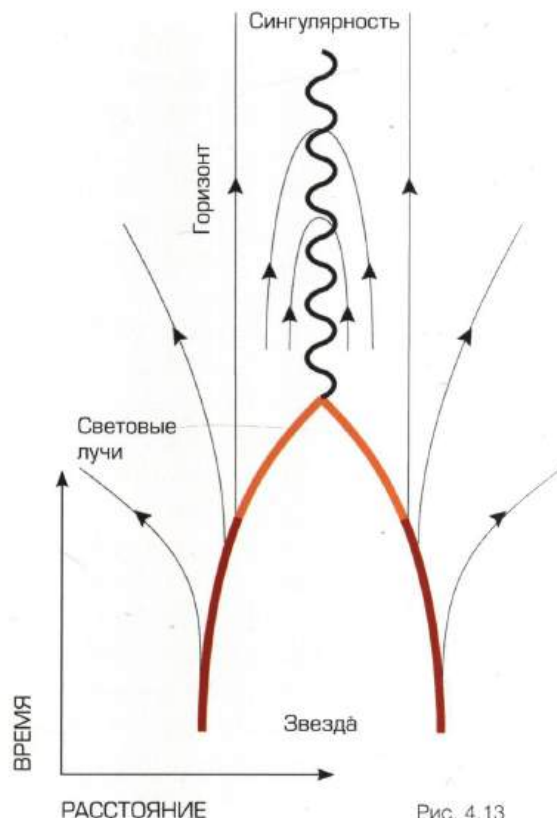


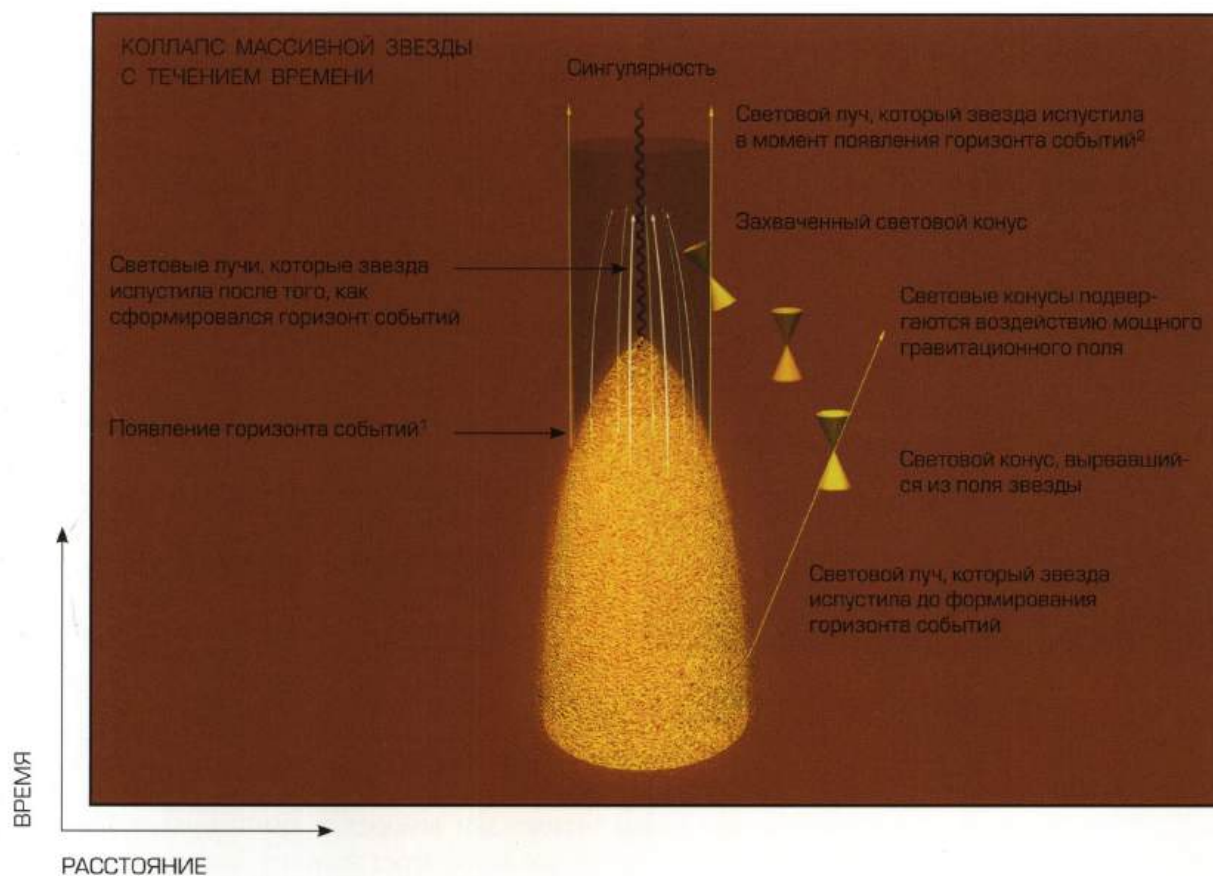
Рис. 4.13

Рис. 4.12. Пространство-время в окрестностях не коллапсирующей звезды. Лучи света выходят с поверхности звезды (красные вертикальные линии). Вдали от звезды световые лучи образуют с вертикалью угол 45 градусов, но вблизи звезды искажение пространства-времени массой звезды заставляет лучи света отклоняться от вертикали на меньший угол.

Рис. 4.13. Если звезда впадает в коллапс (красные линии, сходящиеся в одной точке), искажение становится таким сильным, что световые лучи, исходящие с поверхности, возвращаются обратно. Образуется черная дыра — область пространства-времени, откуда свет не может вырваться.

и термин «черная дыра», который придумал Джон Арчибальд Уилер, американский физик, стоявший у истоков почти всех современных исследований в этой области.

В 1963 году были открыты квазары, что вызвало лавину теоретических работ по черным дырам и экспериментальных попыток их наблюдения (рис. 4.10). И вот такая сложилась картина. Рассмотрим эволюцию звезды с массой в 20 раз больше массы Солнца. Такие звезды формируются из облаков газа вроде тех, что находятся в туманности Орион (рис. 4.11). Облака газа сжимаются под воздействием собственной гравитации, газ нагревается и в конце концов раскаляется так сильно, что в нем запускается реакция термоядерного синтеза, превращающая водород в гелий. Вырабатываемое в этом процессе тепло создает давление, которое помогает звезде сопротивляться собственной гравитации и не дает сжиматься еще сильнее. В этом состоянии звезда может находиться долго, сжигая водород и испуская в пространство свет.



Гравитационное поле звезды влияет на траектории исходящих из нее световых лучей. Можно нарисовать график, где по вертикальной оси отложено время, а по горизонтальной — расстояние от центра звезды (см. рис. 4.12). На этом графике поверхность звезды показана двумя вертикальными линиями по обе стороны от центра. Договоримся, что время измеряется в секундах, а расстояние в световых секундах (такое расстояние свет проходит за одну секунду). Когда пользуешься такими единицами, скорость света равна 1, то есть скорость света — одна световая секунда в секунду. Это значит, что вдали от звезды и ее гравитационного поля траектория светового луча на этом графике представляет собой линию под углом в 45 градусов к вертикали. Однако ближе к звезде кривизна пространства-вре-

Горизонт — внешняя граница черной дыры — формируется световыми лучами, которым не удастся вырваться из черной дыры, и они остаются на постоянном расстоянии от центра звезды.

¹ Точнее, уход поверхности звезды под горизонт событий. — Прим. ред.

² Над фотосферой. — Прим. ред.



Рис. 4.15
ЧЕРНАЯ ДЫРА В ЦЕНТРЕ
ГАЛАКТИКИ

Изображение галактики NGC 4151, полученное с помощью широкоугольной камеры WFPC на орбитальном телескопе имени Хаббла.

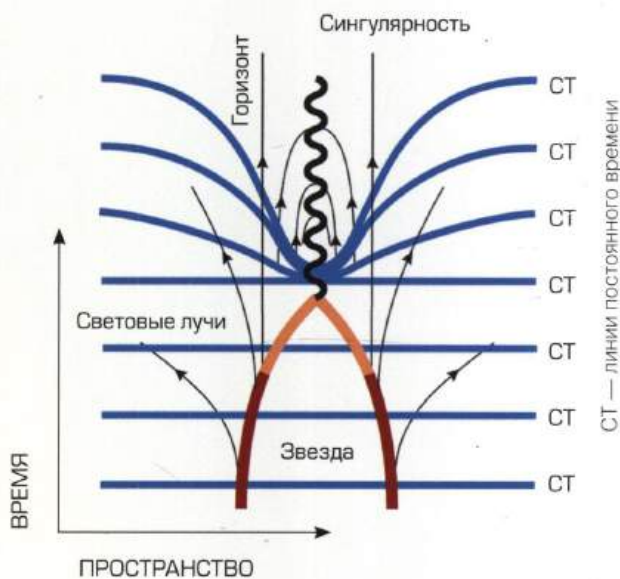
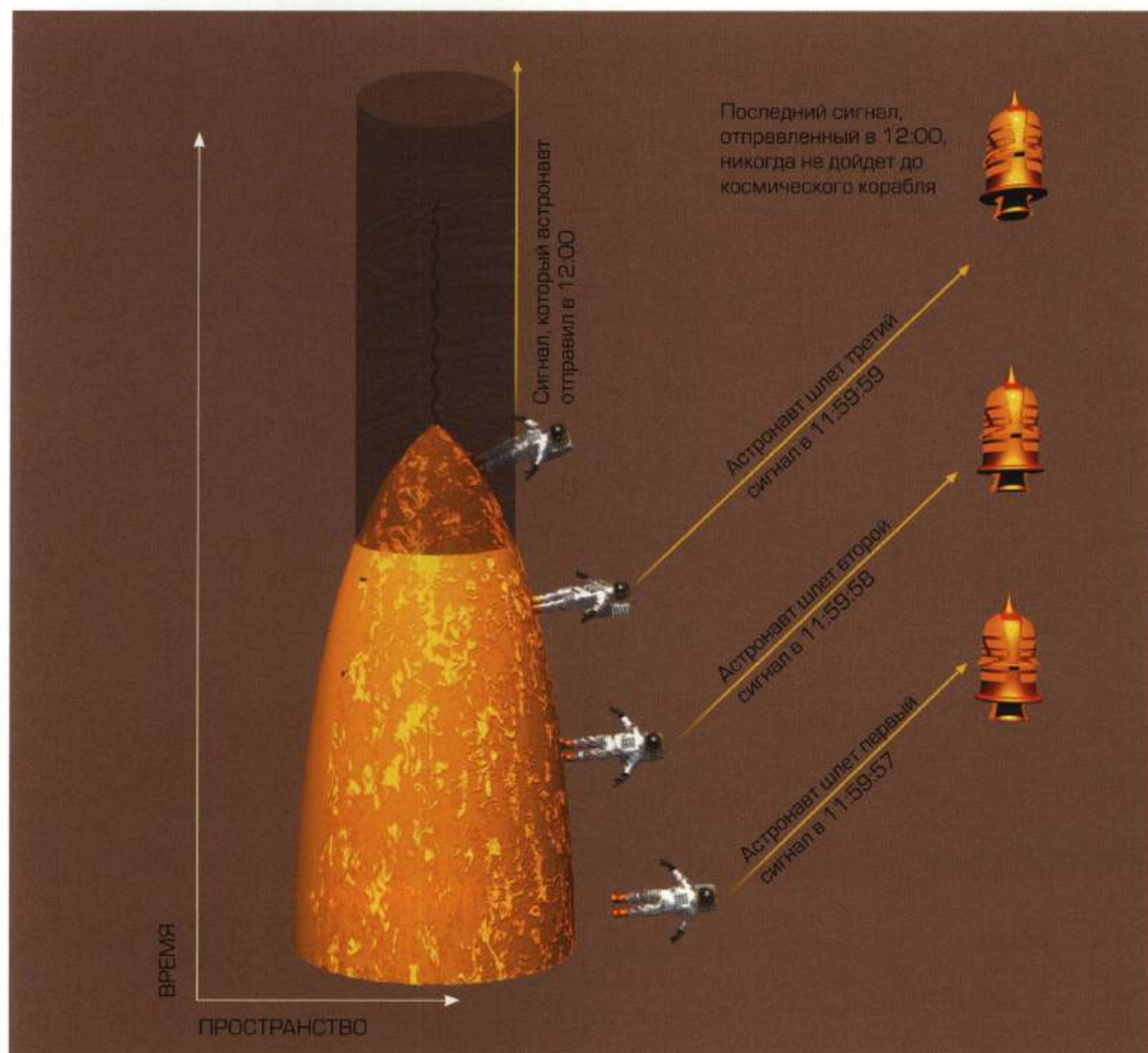


Рис. 4.14

ни, вызванная массой звезды, меняет траектории световых лучей, и угол к вертикали становится меньше.

Массивные звезды пережигают водород в гелий гораздо быстрее, чем Солнце. Это значит, что всего через несколько сотен миллионов лет водород у них кончится. После этого такие звезды оказываются в кризисной ситуации. Они могут сжигать свой гелий и превращать его в более тяжелые элементы, например в углерод и кислород, однако в ходе таких ядерных реакций высвобождается меньше энергии и звезды теряют тепло, а с ним и тепловое давление, которое помогает им сопротивляться гравитации. Поэтому они уменьшаются. Если их масса более чем вдвое превышает массу Солнца, давления не хватит, чтобы остановить сжатие. Такие звезды схлопнутся до нулевого размера и бесконечной плотности, и образуется так называемая сингулярность (рис. 4.13). На диаграмме, где показана зависимость времени от расстояния от центра звезды, видно, что когда звезда сжимается, траектории световых лучей с ее поверхности исходят под меньшими углами к вертикали. Когда звезда достигает определенного критического радиуса, траектория на графике становится вертикальной, а значит, свет зависнет на постоянном расстоянии от центра звезды, но наружу не вырвется. Критическая траектория света замечает поверхность — так называе-



На этом рисунке показана история астронавта, который садится на коллапсирующую звезду в 11:59:57 и попадает на нее как раз тогда, когда она сжимается до размера меньше критического радиуса, где гравитация так сильна, что не выпускает наружу никаких сигналов. Астронавт шлет сигналы со своих часов на косми-

ческий корабль, который с постоянным периодом вращается вокруг звезды. Далекий наблюдатель не увидит, как поверхность звезды пересечет горизонт событий и попадет в черную дыру. С его точки зрения, звезда зависнет на самой границе критического радиуса, а часы на поверхности звезды замедлятся и остановятся.



«И нет волос!»

ТЕМПЕРАТУРА ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Черная дыра излучает как нагретое тело с температурой T , которая зависит только от ее массы. Точнее, температура задается следующей формулой:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M}$$

В этой формуле c — скорость света, $\hbar$ — постоянная Планка, G — гравитационная постоянная Ньютона и k — постоянная Больцмана.

А M — это масса черной дыры, а значит, чем меньше черная дыра, тем выше ее температура. Из этой формулы мы можем узнать, что температура черной дыры массой в несколько масс Солнца составляет всего около одной миллионной доли градуса выше абсолютного нуля.

мый горизонт событий, — которая отделяет область пространства-времени, откуда свет еще может вырваться, от области, откуда он уже не исходит. Любой свет, который испускает звезда, достигает горизонта событий, но там кривизна пространства-времени загибает его обратно к звезде. Такая звезда превращается в темную звезду Мичелла — или, как мы говорим сегодня, в черную дыру.

Как же зарегистрировать черную дыру, если оттуда не может вырваться свет? Ответ состоит в том, что черная дыра служит источником такой же гравитационной силы, какой обладала схлопнувшаяся в нее звезда, и эта сила влияет на соседние объекты. Если бы Солнце превратилось в черную дыру и при этом умудрилось не потерять часть массы, планеты вращались бы вокруг него точно так же, как вращаются сейчас.

Поэтому, чтобы разыскать черную дыру, можно, в частности, поискать вещество, которое вращается по орбите вокруг невидимого компактного массивного объекта. Ученые наблюдали целый ряд подобных систем. Пожалуй, самое сильное впечатление производят гигантские черные дыры, встречающиеся в центрах галактик и квазаров (рис. 4.15).

Все свойства черных дыр, которые мы обсуждали до сих пор, не создают особых препятствий для детерминизма. Для астронавта, попавшего в черную дыру и натолкнувшегося на сингулярность, время остановится. Однако в общей теории относительности можно измерять время по-разному в разных местах. Поэтому можно ускорить часы астронавта, когда тот приблизится к сингулярности, и он намеряет бесконечное время. На диаграмме времени и расстояния (рис. 4.14) поверхности постоянного значения такого времени скопились в центре, ниже точки, где появляется сингулярность. Но они соглашаются с обычным измерением времени в почти плоском пространстве-времени вдали от черной дыры.

Можно ввести это время в уравнение Шрёдингера и рассчитать эволюцию волновой функции. Значит, детерминизм по-прежнему наличествует. Но от него нет никакой пользы, поскольку в дальнейшем часть волновой функции будет заключена внутри черной дыры и ее невозможно будет наблюдать снаружи. То есть наблюдатель, у которого хватит здравого смысла не свалиться в черную дыру, не сможет с помощью уравнения Шрёдингера определить, какой была волновая функция в прошлом. Для этого ему понадобится та часть волновой функции, которая заключена внутри черной дыры. Там сохранилась информация о том, что упало в черную дыру. Потенциально это очень много информации, поскольку черная дыра с конкрет-

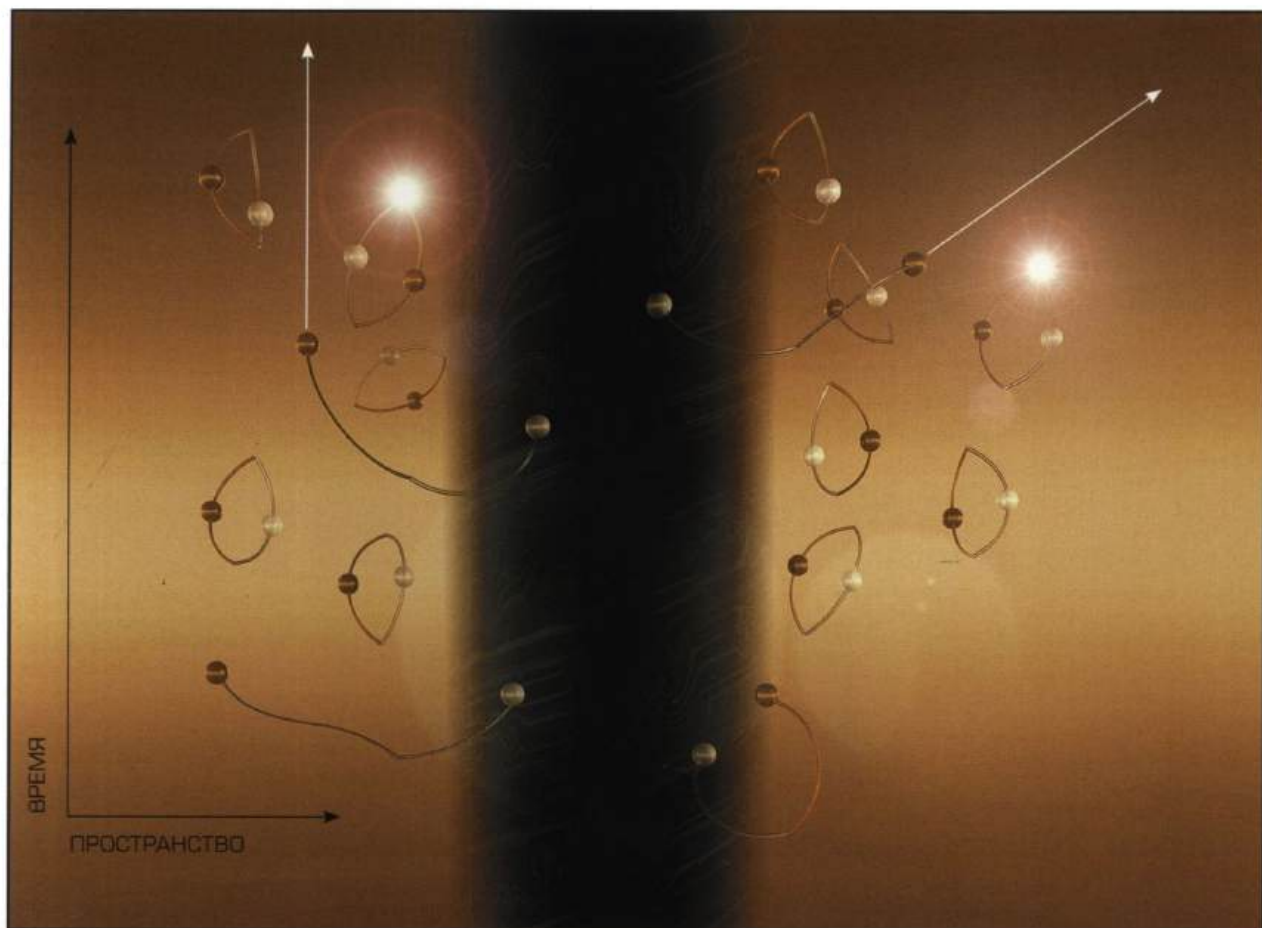


Рис. 4.17 (вверху)

Виртуальные частицы появляются и аннигилируют друг с другом поблизости от горизонта событий черной дыры. Одна частица из пары падает в черную дыру, а ее близнец остается на свободе и улетает. Снаружи, из-за горизонта событий, кажется, что черная дыра излучает частицы, оставшиеся на свободе.

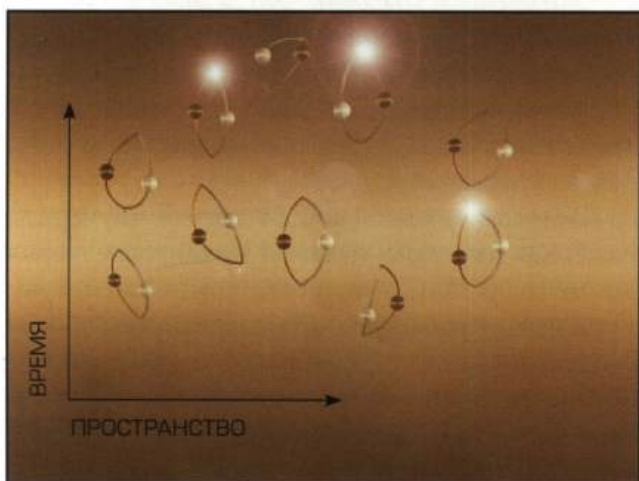


Рис. 4.16 (слева)

В пустом пространстве возникают пары частиц, но живут они недолго, а затем аннигилируют друг с другом.

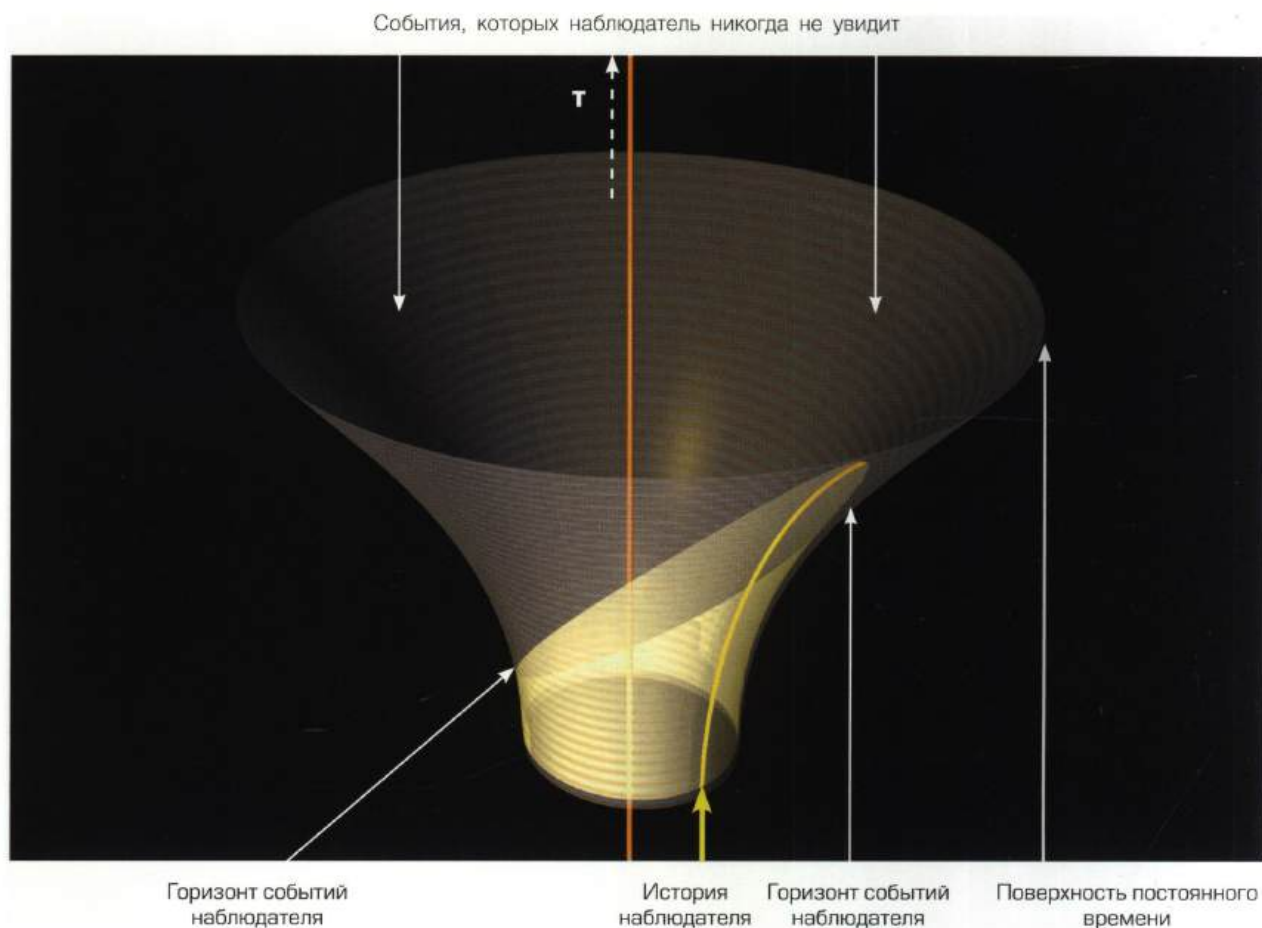


Рис. 4.18.

Решение уравнений общей теории относительности, которое предложил де Ситтер, соответствует инфляционно расширяющейся Вселенной. На графике время отложено по вертикальной оси, а размер Вселенной — по горизонтальной. Пространственные измерения растут так быстро, что свет далеких галактик не доходит до нас, и появляется горизонт событий — граница области, которую мы не можем наблюдать, как черную дыру.

ной массой и скоростью вращения может формироваться из очень большого числа разных наборов частиц: черная дыра не зависит от природы тела, из которого она образовалась в результате коллапса. По этому поводу Джон Уилер сказал: «У черной дыры нет волос». Французы укрепились в своих подозрениях.

Трудности с детерминизмом начались, когда я открыл, что черные дыры не совсем черные. Как мы узнали из главы 2, квантовая теория утверждает, что поля не могут быть в точности равны нулю, даже в вакууме. Если бы они были равны нулю, то у них было бы точное положение — нуль — и точная мера изменения или скорости — тоже нуль. А это нарушало бы принцип неопределенности, согласно которому нельзя точно определить и положение, и скорость. У всех полей должно быть вместо этого определенное количество так назы-



ваемых нулевых колебаний (точно так же, как у маятника в главе 2 должны были быть колебания в нулевой точке). Нулевые колебания можно толковать несколькими способами, на первый взгляд разными, однако с математической точки зрения они эквивалентны. С точки зрения позитивистской философии можно пользоваться любой картиной, если она лучше всех прочих помогает решить ту или иную задачу. В таком случае полезно считать нулевые колебания парами виртуальных частиц, которые появляются одновременно в какой-то точке пространства-времени, расходятся, а затем снова встречаются и аннигилируют. Виртуальными их называют потому, что их невозможно наблюдать непосредственно, зато можно измерить их косвенное воздействие, и результаты этих измерений соответствуют теоретическим предсказаниям с замечательной точностью (рис. 4.16).

В присутствии черной дыры одна из пары частиц может упасть в черную дыру, а вторая останется на свободе и улетит в бесконечность (рис. 4.17). С точки зрения наблюдателя, находящегося далеко от черной дыры, улетающие частицы излучаются черной дырой. Спектр черной дыры в точности такой же, какой мы ожидаем увидеть у любого нагретого тела с температурой, обратно пропорциональной гравитационному полю на горизонте, то есть на границе черной дыры. Иначе говоря, температура черной дыры зависит от ее размера.

Черная дыра массой в несколько масс Солнца имеет температуру примерно в одну миллионную градуса выше абсолютного нуля, а если черная дыра больше, то температура у нее еще ниже. Таким образом, любое квантовое излучение из таких черных дыр полностью перекрывается излучением, оставшимся после Большого взрыва, о котором мы говорили в главе 2, поскольку его температура — 2,7 градуса. Вероятно, можно было бы уловить излучение от значительно более горячих и маленьких черных дыр, но их, похоже, не так уж много. А жаль. Если бы кто-нибудь открыл такую черную дыру, мне дали бы Нобелевскую премию. Однако у нас есть косвенные данные, свидетельствующие о наличии такого излучения, и эти данные относятся к ранней Вселенной. Как рассказано в главе 3, считается, что на очень ранних стадиях Вселенная прошла фазу инфляционного расширения, когда темп расширения постоянно увеличивался. Расширение в этот период было таким стремительным, что некоторые объекты отдалялись от нас настолько, что их свет не дошел бы до нас, поскольку во время его распространения Вселенная расширилась бы слишком сильно и слиш-



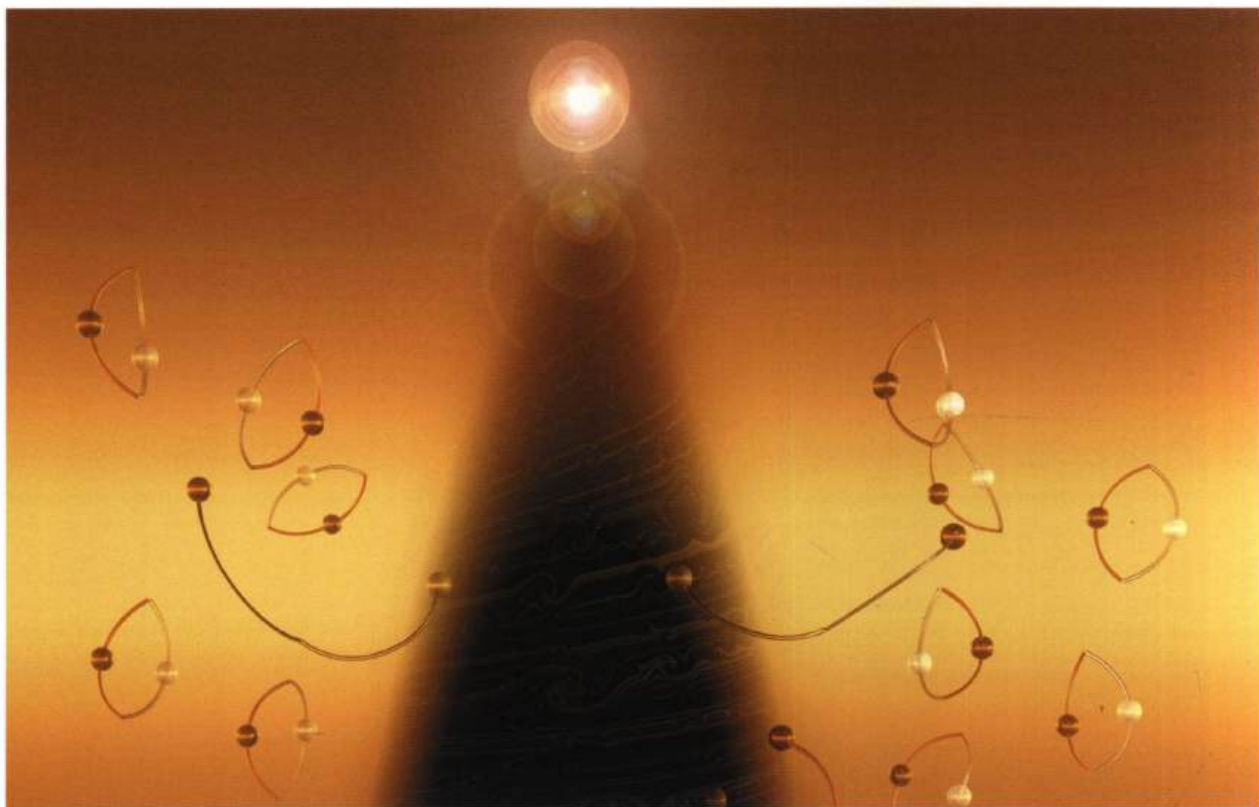


Рис. 4.19

Положительная энергия, уносимая тепловым излучением с горизонта событий, уменьшает массу черной дыры. При потере массы температура черной дыры растет, темп излучения увеличивается и черная дыра теряет массу все быстрее и быстрее. Что будет, когда масса станет очень маленькой, мы не знаем, но, вероятнее всего, черная дыра полностью исчезнет.

ком быстро. То есть во Вселенной существовал горизонт событий, как в черной дыре, и он отделял область, откуда до нас доходил свет, от области, откуда он не доходил (рис. 4.18).

Очень похожие рассуждения показывают, что от этого горизонта должно было исходить тепловое излучение, как и от горизонта событий черной дыры. Мы уже знаем, что у источника теплового излучения должен быть характерный спектр колебаний плотности. В таком случае колебания плотности расширялись бы вместе с Вселенной. Когда их масштаб стал больше размера горизонта событий, они должны были бы заморозиться, и сегодня мы могли бы их наблюдать в виде небольших вариаций температуры фонового микроволнового космического излучения, оставшегося после зарождения Вселенной. И в самом деле, результаты наблюдений этих вариаций очень точно согласуются с предсказанной величиной тепловых колебаний плотности.

Но даже если данные наблюдений излучения черной дыры не совсем прямые, все, кто занимался этой проблемой, согласны, что



излучение все же должно быть, иначе возникнут расхождения с другими нашими теориями, прошедшими проверку наблюдениями. А из этого следуют существенные выводы с точки зрения детерминизма. Излучение из черной дыры уносит энергию, а значит, черная дыра обязательно теряет массу и уменьшается. Это, в свою очередь, значит, что температура черной дыры растет и темп излучения увеличивается. Рано или поздно масса черной дыры уменьшится до нуля. Мы не знаем, как вычислить, что произойдет в этот момент, однако представляется логичным и естественным, что черная дыра просто исчезнет. А что тогда будет с той частью волновой функции внутри черной дыры и с информацией о том, что упало в черную дыру, которая там содержится? Первое, что приходит в голову, — когда черная дыра наконец исчезнет, эта часть волновой функции и информация, которую она несет, появится снова. Однако за перенос информации надо платить, что очевидно хотя бы из счетов за телефон.

Рис. 4.20

В мысленном эксперименте Эйнштейна — Подольского — Розена наблюдатель, измеривший спин одной частицы, узнает направление спина второй частицы.

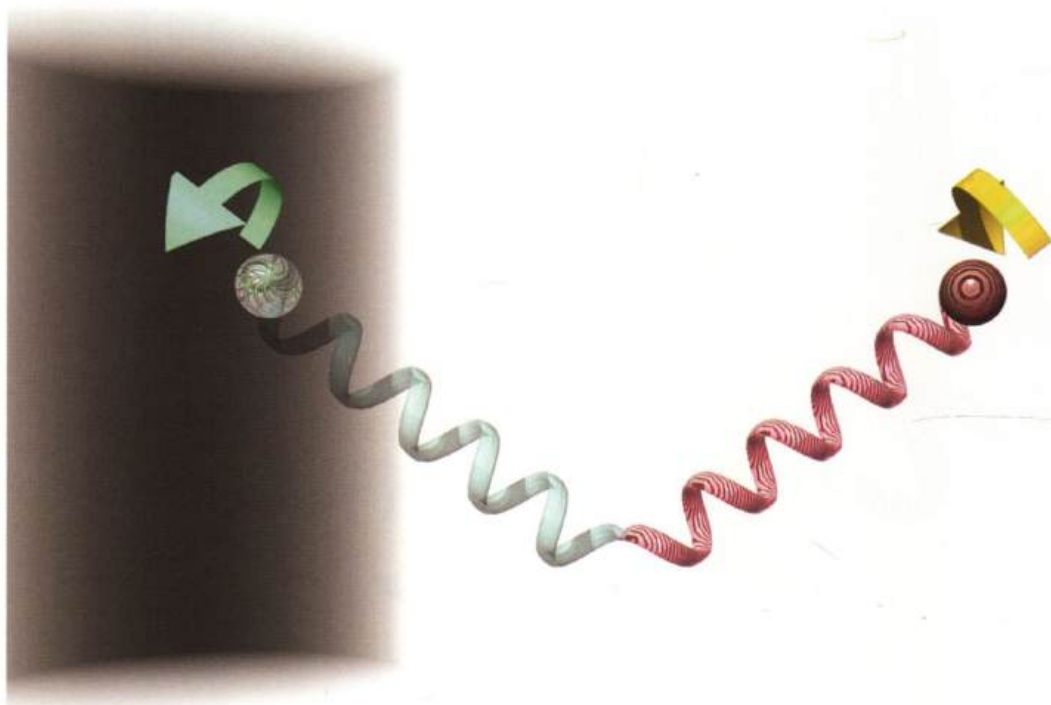


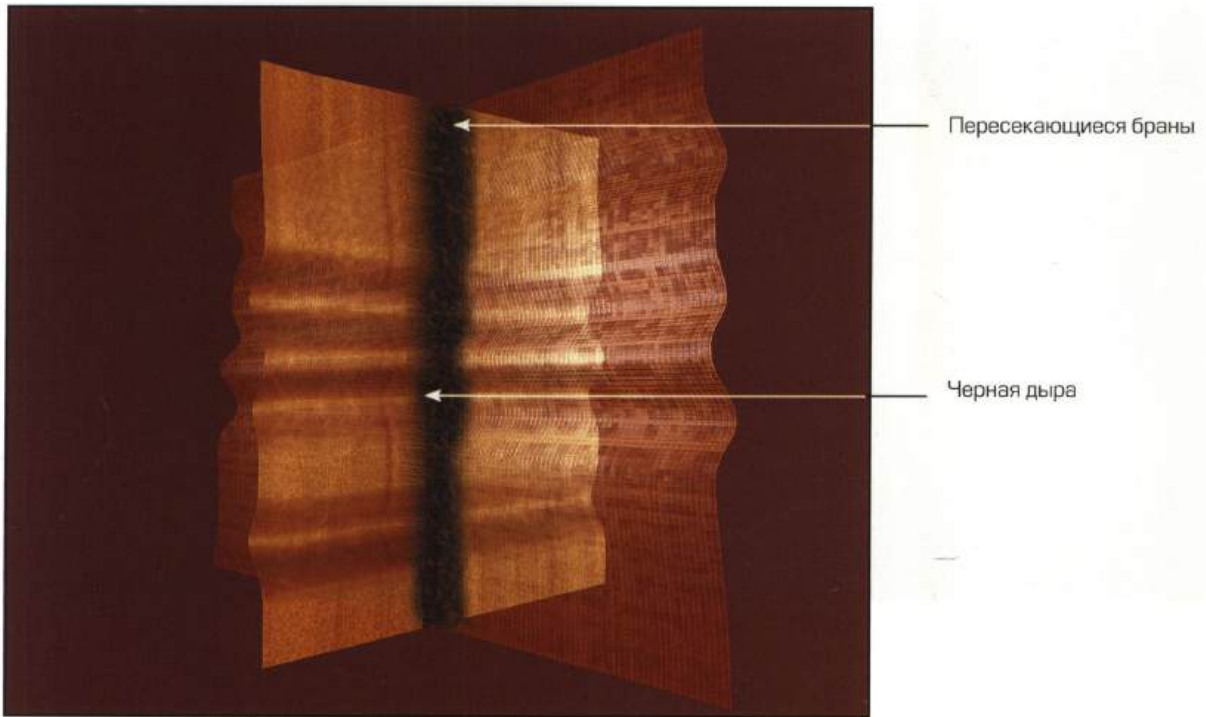
Рис. 4.21

Пара виртуальных частиц обладает волновой функцией, предсказывающей, что у частиц будут противоположные спины. Но если одна из этих частиц упадет в черную дыру, спин оставшейся частицы будет невозможно определить.

Для переноса информации нужна энергия, а на последних этапах жизни черной дыры энергии остается совсем мало. Так что у информации в черной дыре есть только один надежный способ выбраться наружу — не дожидаться последней стадии, а постепенно испускаться вместе с излучением. Однако согласно картине, в которой одна частица из виртуальной пары падает в черную дыру, а другая остается на свободе, нельзя ожидать, что свободная частица как-то связана с упавшей и несит какую бы то ни было информацию о ней. Так что единственный ответ — информация, заключенная в той части волновой функции, которая очутилась в черной дыре, утрачена навсегда (рис. 4.19)¹.

Подобная утрата информации сильно влияет на детерминизм. Прежде всего, мы отметили, что даже если знаешь волновую функцию после исчезновения черной дыры, невозможно обратить уравнение Шрёдингера и вычислить, какой была волновая функция до

¹ В результате многолетней дискуссии, в которой участвовал и С. Хокинг, было признано, что информация не уничтожается в черной дыре, а выходит наружу с ее тепловым излучением. Подробнее об этом можно узнать, например, из книг А. Сасскинда «Битва при черной дыре» и «Космический ландшафт». — Прим. ред.



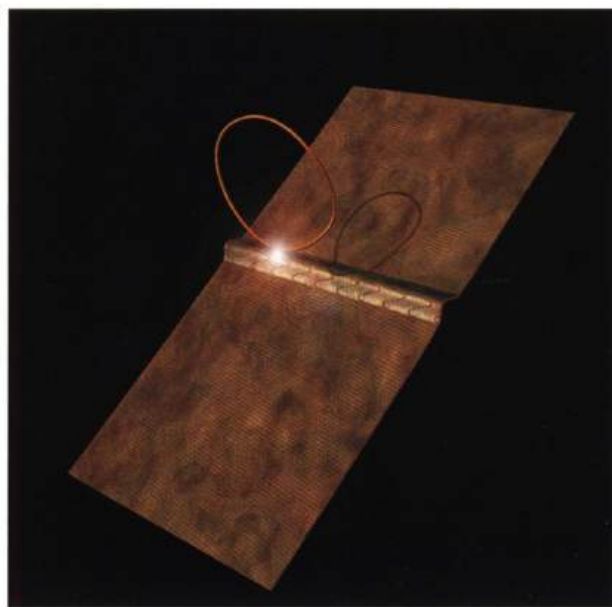
того, как образовалась черная дыра. Это зависит от того фрагмента волновой функции, которая сгинула в черной дыре. Мы привыкли считать, что точно знаем прошлое. Но если информация пропадает в черных дырах, это не так. Могло произойти все что угодно.

Однако в целом люди вроде астрологов и их консультантов больше заинтересованы в предсказании будущего, чем, если можно так выразиться, в пост-сказании прошлого. На первый взгляд кажется, что утрата части волновой функции в черной дыре не мешает нам предсказать, какой будет волновая функция вне черной дыры. Однако оказывается, что эта потеря все-таки препятствует предсказаниям, что становится ясно, если рассмотреть мысленный эксперимент, который предложили Эйнштейн, Борис Подольский и Натан Розен в тридцатые годы.

Представьте себе, что радиоактивный атом распадается и испускает две частицы в противоположных направлениях и с противоположными спинами. Наблюдатель, который смотрит только на одну частицу, не может предсказать, куда она закручена (какой у нее спин) — вправо или влево. Но если он определит, что она закручена

Рис. 4.22

Черные дыры можно представить себе как пересечения p -бран в дополнительных измерениях пространства-времени. Информация о внутреннем состоянии черных дыр, вероятно, хранится в виде волн на p -бранах.



[1]



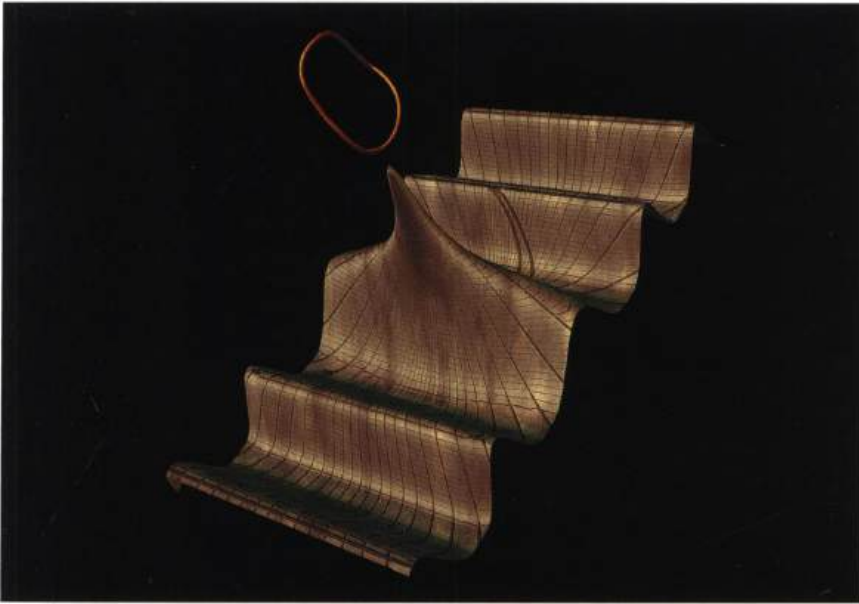
[2]

Рис. 4.23.

Частицу, падающую в черную дыру, можно представить себе в виде замкнутой петли на струне, ударяющейся о p -брану (1). Это возбуждает волны в p -бране (2). Волны могут собраться вместе и заставить часть p -браны отделиться в виде замкнутой струны (3). Это и будет частица, испускаемая черной дырой.

вправо, то сможет точно сказать, что вторая частица закручена влево, и наоборот (рис. 4.20). Эйнштейн думал, что это доказывает нелепость квантовой теории: ведь вторая частица может к этому времени очутиться на другом краю галактики, но наблюдатель мгновенно узнает, в какую сторону она закручена! Тем не менее другие ученые в большинстве своем согласились, что оплошал здесь сам Эйнштейн, а не квантовая теория. Мысленный эксперимент Эйнштейна–Подольского–Розена не показывает, что можно передавать информацию быстрее скорости света. Это было бы нелепо. Нельзя *решить*, что твоя частица закручена вправо, и поэтому заявить, что частица далекого наблюдателя закручена влево.

На самом деле этот мысленный эксперимент описывает именно то, что происходит с излучением черной дыры. Пара виртуальных частиц обладает волновой функцией, которая предсказывает, что у них должны быть противоположные спины (рис. 4.21). Нам хотелось бы предсказать спин и волновую функцию свободной частицы, что мы могли бы сделать, если бы наблюдали частицу, упавшую в черную дыру. Однако теперь эта частица находится внутри черной дыры, и там ее спин и волновая функция не подлежат измерению. Поэтому невозможно предсказать ни спин, ни волновую функцию



(3)

спасшейся частицы. Она может обладать разными спинами и разными волновыми функциями с различной вероятностью, но у нее нет своего уникального спина или волновой функции. То есть может показаться, будто наша способность предсказывать будущее урезана еще сильнее. Классические представления Лапласа о том, что можно предсказать одновременно и положение, и скорость частицы, пришлось видоизменить, когда принцип неопределенности показал, что этого сделать нельзя. Но волновую функцию все равно можно измерить и при помощи уравнения Шрёдингера предсказать, какой она должна быть в будущем. То есть можно точно предсказать одну комбинацию скорости и положения, ровно половину того, что можно было бы знать по мысли Лапласа. Мы способны точно предсказать, что у частиц противоположные спины, но если одна частица упала в черную дыру, мы ничего не можем утверждать с определенностью об оставшейся. Значит, вне черной дыры нет никаких измерений, которые можно определить точно: наша способность делать конкретные прогнозы сводится к нулю. Выходит, астрология предсказывает будущее ничуть не хуже законов физики.

Многим физикам пришлось не по душе такое урезание детерминизма, и поэтому они предположили, что из черной дыры все







же можно добыть информацию о том, что находится внутри. Многие годы это была всего лишь страстная надежда, что удастся найти какой-то способ сохранить информацию. Но вот в 1996 году Эндрю Строминджер и Камран Вафа сделали существенный шаг к решению этой задачи. Они представили себе черную дыру в виде конструкции из множества составных частей под названием p -браны.

Вспомним, что p -браны можно, в частности, представлять себе как листы, которые движутся не только сквозь три пространственных измерения, но и сквозь семь свернутых дополнительных измерений, которых мы не замечаем (рис. 4.22). В некоторых случаях можно доказать, что количество волн в p -бранах равно количеству информации, которая, согласно нашим расчетам, содержится в черной дыре. Соударяясь с p -бранами, частицы возбуждают в них дополнительные волны. Подобным же образом, если волны, движущиеся на p -бранах в разных направлениях, сходятся в какой-то точке, возникает пик такой величины, что часть p -браны отделяется и улетает в виде частицы. Получается, что p -браны могут поглощать и излучать частицы подобно черным дырам (рис. 4.23).

Можно заключить, что p -браны — это эффективная теория, то есть, хотя нам не обязательно представлять себе тоненькие листы, движущиеся в плоском пространстве-времени, и верить в них, черные дыры могут вести себя так, словно состоят из таких листов. Это как вода: да, она состоит из миллиардов миллиардов молекул H_2O , вступающих в сложные взаимодействия, но если мы представим ее себе как однородную жидкость, это будет прекрасная эффективная модель. Математическая модель, согласно которой черные дыры состоят из p -бран, дает примерно те же результаты, что и вышеописанная гипотеза пар виртуальных частиц. А значит, с позитивистской точки зрения эта модель ничем не хуже, по крайней мере для определенных классов черных дыр. Для этих классов модель p -бран предсказывает в точности ту же скорость излучения, что и модель пар виртуальных частиц. Но с одной важной оговоркой: в модели p -бран информация о том, что падает в черную дыру, хранится в волновой функции волн на p -бранах. P -браны рассматриваются как листы в плоском пространстве-времени, а поэтому время будет течь вперед гладко, лучи света не искривятся и информация в волнах не потеряется, а, наоборот, рано или поздно выйдет из черной дыры в виде излучения из p -бран. Таким образом, согласно модели p -бран, можно при помощи уравнения Шрёдингера вы-



числить, какой будет волновая функция в будущем. Ничего не потеряется, время будет плавно течь вперед. Мы получим полный детерминизм в квантовом смысле.

Какая из этих картин верна? Теряется ли часть волновой функции в черной дыре или информация все-таки находит выход, как предполагает модель *p*-бран? Это один из главнейших вопросов современной теоретической физики. Многие полагают, что недавние исследования показывают, что информация не теряется. Мир предсказуем и безопасен, ничего неожиданного не может произойти.

Но это не точно. Если серьезно отнестись к эйнштейновской общей теории относительности, придется допустить вероятность того, что пространство-время завязано в узел, а информация теряется в складках. Когда космический корабль *Enterprise* прошел сквозь кротовую нору, произошло нечто неожиданное. Я это знаю, потому что был на борту — играл в покер с Ньютоном, Эйнштейном и Дейтой. Меня ждал большой сюрприз. Только поглядите, кто у меня на коленях!

Публикуется с разрешения Paramount Pictures
«Звездный путь. Следующее поколение»
© Paramount Pictures, 2001



ГЛАВА 5

КАК ЗАЩИТИТЬ ПРОШЛОЕ

*Возможны ли путешествия во времени?
Может ли развитая цивилизация вернуться в прошлое и изменить его?*





Принимая во внимание, что Стивен У. Хокинг (проигравший предыдущее пари по этому поводу, поскольку не требовал универсальности) по-прежнему твердо убежден, что голые сингулярности — скверна и их следует запретить именем законов классической физики,

и принимая во внимание, что Джон Прескилл и Кип Торн (выиграв предыдущее пари) все так же считают голые сингулярности объектами квантовой гравитации, которые вполне могут существовать, не покрытые горизонтами событий, всей Вселенной напоказ,

Хокинг предлагает, а Прескилл и Торн принимают пари о том, что

когда любая форма классического вещества или поля, которая не может стать сингулярной в плоском пространстве-времени, сочетается с общей теорией относительности посредством классических уравнений Эйнштейна, то

динамическая эволюция от начальных условий общего вида (то есть при открытом наборе начальных данных) никогда не приведет к голой сингулярности (не продлеваемой в прошлое нулевой геодезической из I^+).

Проигравший обязан вознаградить победителя покровом, дабы прикрыть наготу победителя. Покров следует расшить подобающими случаю словесами, свидетельствующими о полной капитуляции¹.



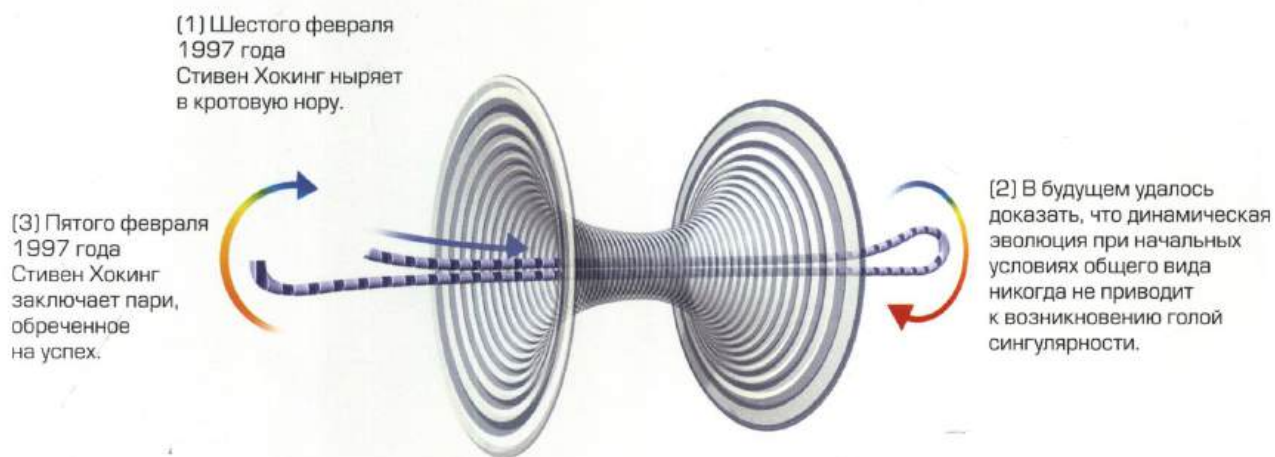
Стивен У. Хокинг

John P. Preskill Kip S. Thorne

Джон П. Прескилл и Кип С. Торн

Пасадена, штат Калифорния, 5 февраля 1997 года.

¹ Это пари до сих пор не завершено. Однако на следующий день, 6 февраля 1997 года, Хокинг и Торн заключили с Прескиллом еще одно пари, где утверждали, что информация при прохождении горизонта событий черной дыры уничтожается. В 2004 году Хокинг признал свое поражение перед Прескиллом и заявил, что черные дыры искажают, но не уничтожают информацию, однако Торн своего поражения не признал до сих пор. Об этом см. также примечание к рис. 4.19. — Прим. ред.



МОЙ ДРУГ И КОЛЛЕГА КИП ТОРН, с которым я заключил несколько пари (слева), не из тех, кто пойдет в физике проторенным путем просто потому, что все так делают. Именно поэтому у него хватило храбрости первым из серьезных ученых заговорить о возможности путешествий во времени.

Открыто рассуждать о путешествиях во времени — дело опасное. Рискнешь либо навлечь на себя возмущение общественности за растрату денег налогоплательщиков — не тратить же их на такие глупости, — либо получить уведомление, что твои исследования засекречены, поскольку представляют собой военную тайну. Как обороняться от противника, у которого есть машина времени? В его силах изменить историю и захватить власть над миром. Среди нас, ученых, лишь у единиц хватает безрассудной отваги работать над такой политически скользкой темой. В целях конспирации мы обсуждаем путешествия во времени в сугубо научных терминах — у нас такой секретный шифр.

Основа всех современных диспутов о путешествиях во времени — эйнштейновская общая теория относительности. Как мы уже видели в предыдущих главах, согласно уравнениям Эйнштейна про-



Кип Торн



Рис. 5.1



странство и время динамичны: эти уравнения описывают, как вещество и энергия во Вселенной искривляют пространство и время. В рамках общей теории относительности личное (локальное) время, измеряемое наручными часами, только растет, как и в ньютоновской теории или в плоском пространстве-времени специальной теории относительности. Однако теперь появляется вариант, в котором пространство-время искривлено настолько, что можно отправиться в путешествие на космическом корабле и вернуться до того, как стартуешь (рис. 5.1).

В частности, такое может быть, если на свете существуют кротовые норы, трубы пространства-времени, о которых упоминалось в главе 4, соединяющие разные области пространства и времени.



Идея в том, что если направить космический корабль в одно устье кротовой норы, то он вынырнет из второго устья в другое время и в другом месте (рис. 5.2). Кротовые норы — если они существуют, — в принципе, позволят обойти ограничение скорости света в пространстве: если корабль летит со скоростью меньше скорости света, на то, чтобы пересечь на нем Галактику, согласно теории относительности уйдут сотни тысяч лет. А по кротовой норе проскочишь на другой конец Галактики и поспеешь обратно к обеду. Однако можно доказать, что, если кротовые норы существуют, с их помощью можно вернуться раньше отправления. Так что, в принципе, ничего не мешает, например, взорвать ракету на взлетной площадке и не дать себе улететь. Это вариант парадокса дедушки: что будет, если вернуться в прошлое и убить своего дедушку до того, как он успеет зачать твоего отца? (рис. 5.3)

НЕГЛУБОКАЯ КРОВОТАЯ НОРА

Входит в 12.00

Выходит в 12.00

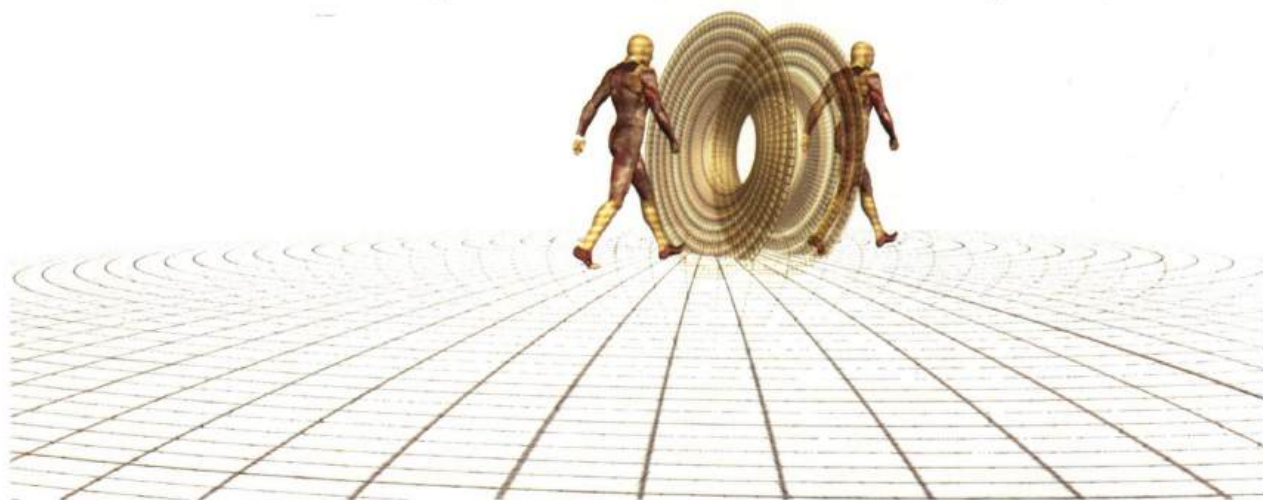
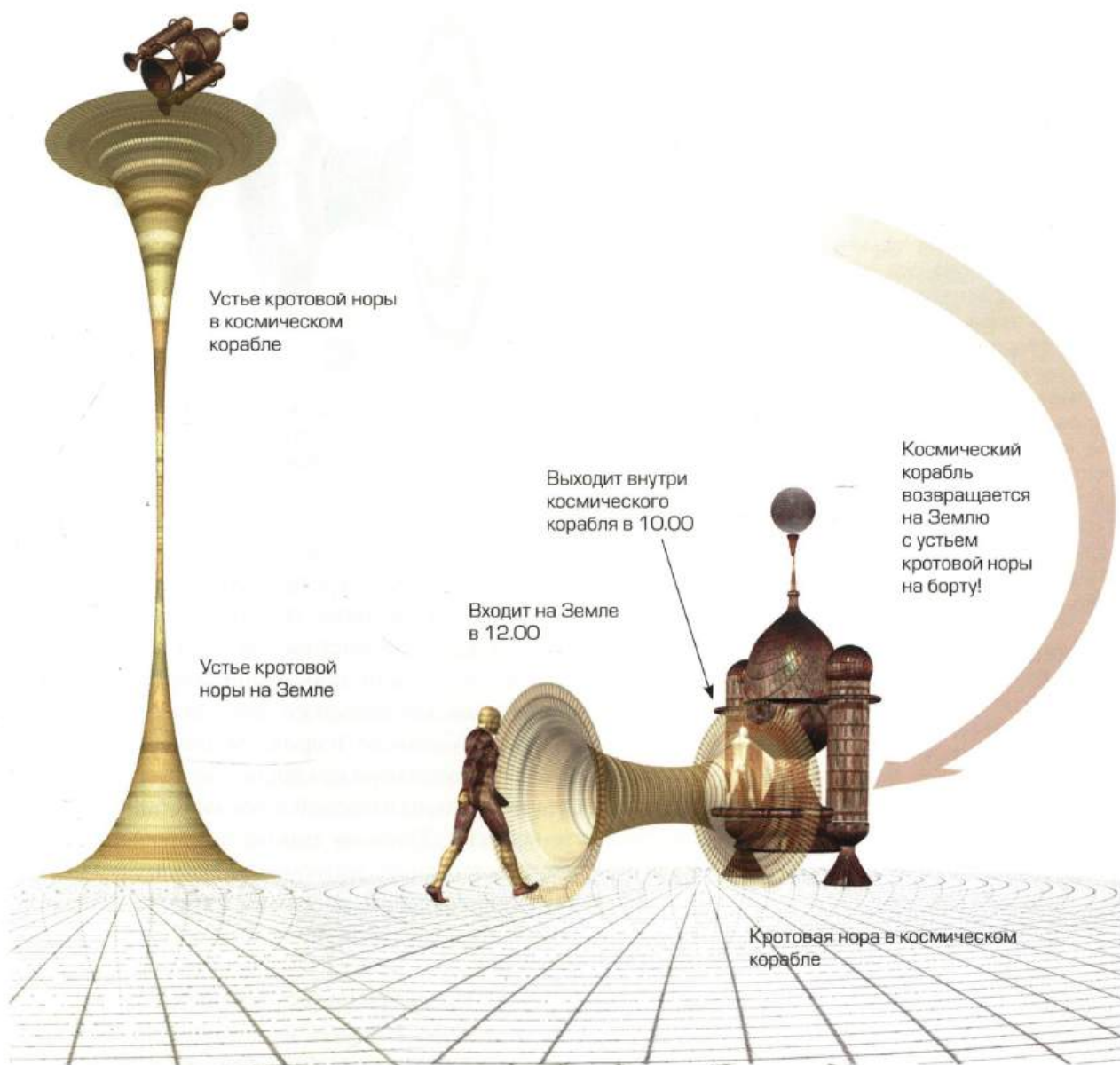


Рис. 5.2. ВТОРОЙ ВАРИАНТ ПАРАДОКСА БЛИЗНЕЦОВ.

(1) Если кротовая нора невелика, в нее можно войти и выйти одновременно.



(2) Можно представить себе, что одно устье кротовой норы взяли в дальний полет на борту космического корабля, а второе устье осталось на Земле.

(3) Из-за эффекта парадокса близнецов, когда корабль вернется, окажется, что для устья на его борту прошло меньше времени, чем для устья, оставшегося на Земле. Это будет означать, что если войти в земное устье, можно выйти из космического корабля на Землю в более ранний момент времени, чем тот, в который ты вошел в корабль.



КОСМИЧЕСКИЕ СТРУНЫ

Космические струны — это длинные тяжелые объекты с крошечным сечением, возникшие, вероятно, на ранних стадиях развития Вселенной. Едва сформировавшись, космические струны были еще сильнее растянуты из-за расширения Вселенной, и к нашему времени одна космическая струна может растянуться по всей наблюдаемой Вселенной.

Вероятность существования космических струн следует из современных теорий элементарных частиц, которые утверждают, что на ранних стадиях существования Вселенной, когда температура была очень высока, вещество прошло фазу симметрии — примерно как жидкая вода, которая симметрична, то есть одинакова во всех направлениях, в противоположность кристаллам льда, обладающим дискретной структурой.

Но затем Вселенная остывала, и симметрия ранней фазы, вероятно, была нарушена, причем по-разному в далеких друг от друга областях. В результате космическое вещество в этих областях пришло в разные основные состояния. Космические струны — это конфигурации вещества на границах между областями. Получается, что их формирование было неизбежным следствием того, что разные области имеют разные основные состояния.



Рис. 5.3

Может ли пуля, выпущенная в кротовую нору, вернуться в прошлое и поразить самого стреляющего?

Разумеется, это парадокс только в том случае, если считать, что у тебя будет возможность, вернувшись в прошлое, творить там что заблагорассудится. Обсуждение вопроса свободы воли выходит за рамки нашей книги. Мы сосредоточимся на том, допускают ли законы физики такое сильное искажение пространства-времени, чтобы макроскопическое тело вроде космического корабля могло вернуться в собственное прошлое. Согласно теории Эйнштейна, космический корабль вынужден перемещаться со скоростью ниже локальной скорости света и следовать так называемой времяподобной траектории в пространстве-времени. Поэтому можно переформулировать этот вопрос в физических терминах: допускает ли пространство-время замкнутые времяподобные кривые, то есть кривые, постоянно возвращающиеся в исходную точку? Такие кривые я впредь буду называть «временные петли».

Ответить на этот вопрос мы можем на трех уровнях. Первый — это эйнштейновская общая теория относительности, предполагающая, что у Вселенной есть четко определенная история безо всякой неопределенности. Для этой классической теории у нас есть полностью сложившаяся картина. Однако, как мы уже видели, эта теория не вполне правильна, поскольку мы наблюдаем, что вещество подчиняется принципу неопределенности и подвержено квантовым флуктуациям.

Поэтому мы можем задать вопрос о путешествиях во времени на втором уровне — на уровне полуклассической теории. Тогда мы



Рис. 5.4

Допускает ли пространство-время замкнутые времяподобные кривые, постоянно возвращающиеся в исходную точку?

предполагаем, что вещество ведет себя в соответствии с квантовой теорией — принципом неопределенности и квантовыми флуктуациями, — однако пространство-время хорошо определено и классично. Тут картина не такая полная, зато у нас есть некоторые представления о том, куда двигаться дальше.

Наконец, у нас остается полная квантовая теория гравитации, хотя мы еще не знаем, какова она. С точки зрения этой теории, где неопределенности и флуктуациям подвержено не только вещество, но и сами пространство и время, непонятно даже, как сформулировать вопрос о возможности путешествий во времени. Пожалуй, самое большее, на что мы способны, — это задать вопрос, как обитатели областей, где пространство-время приближается к классическому и свободно от неопределенности, должны интерпретировать свои наблюдения. Будут ли они думать, что путешествие во времени имело место в областях с мощной гравитацией и большими квантовыми флуктуациями?

Начнем с классической теории: плоское пространство-время специальной теории относительности (теории относительности без гравитации) не допускает путешествий во времени, равно как и искривленное пространство-время, которое изучал Эйнштейн. Поэтому для Эйнштейна стало большим потрясением, когда в 1949 году Курт Гёдель, автор той самой теоремы Гёделя, открыл пространство-время, представляющее собой вселенную, полную вращающегося вещества, где временные петли проходят через каждую точку (рис. 5.4).

ТЕОРЕМА ГЁДЕЛЯ О НЕПОЛНОТЕ

В 1931 году математик Курт Гёдель доказал свою знаменитую теорему о неполноте — теорему о природе математики. Теорема гласит, что в пределах любой формальной системы аксиом, а современная математика именно такова, всегда останутся утверждения, которые невозможно ни доказать, ни опровергнуть на основании аксиом, определяющих систему. Иначе говоря, Гёдель показал, что есть задачи, которые невозможно решить никакими наборами правил и процедур.

Теорема Гёделя определила фундаментальные границы математики. Это стало большим потрясением для научного сообщества, поскольку опровергло распространенное убеждение, что математика — это логически последовательная и полная система, которая зиждется на единой логической основе. Теорема Гёделя, принцип неопределенности Гейзенберга и практическая невозможность проследить эволюцию даже детерминистической системы, впадающей в хаос, установили набор ограничений для научного знания, который был в полной мере признан лишь в середине XX века.

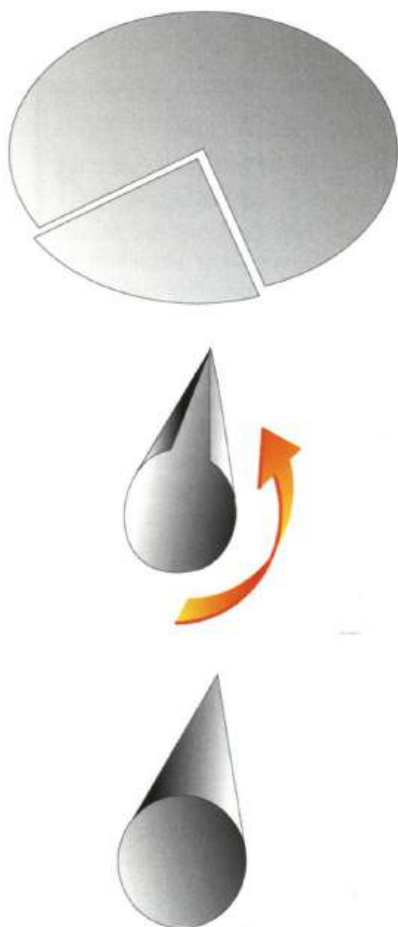


Рис. 5.5

Решение Гёделя требовало космологической постоянной, которая не обязательно существует в природе, однако впоследствии были найдены и другие подобные решения, не требовавшие космологической постоянной. Особенно интересен случай, в котором две космические струны движутся мимо друг друга с высокой скоростью.

Космические струны — не то же самое, что струны из теории струн, хотя некоторая связь между ними все же есть. Это объекты, имеющие длину и очень маленькое сечение. Их существование предсказано некоторыми теориями элементарных частиц. Пространство-время вне отдельной космической струны плоско. Однако это плоское пространство-время с вырезанным клином, который острым концом упирается в струну. Это как конус: возьмите большой бумажный круг, вырежьте сегмент наподобие куска пирога — клин с углом в центре круга. Теперь выбросьте вырезанный кусок и склейте места отреза на оставшемся куске круга — и получится конус. Это и есть модель пространства-времени, в котором существует космическая струна (рис. 5.5).

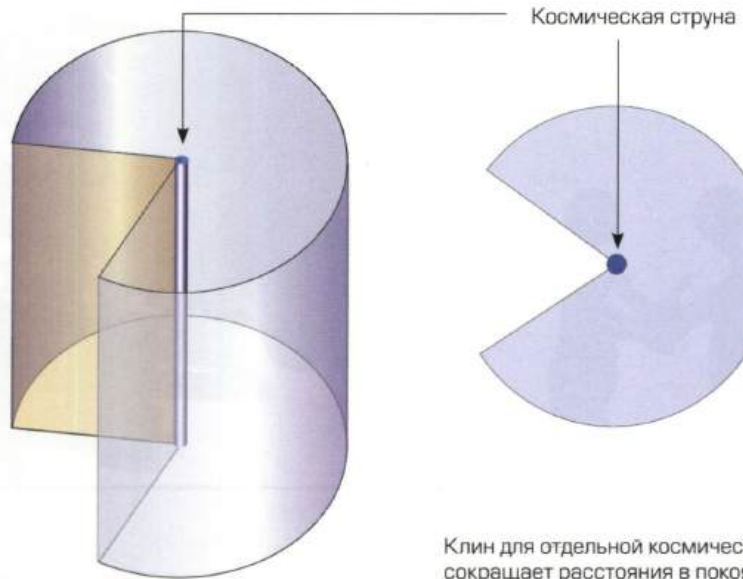
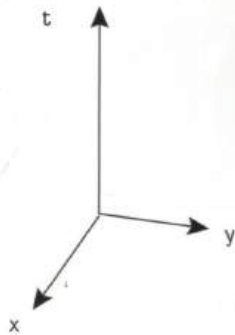
Обратите внимание, что поскольку поверхность конуса — это тот же самый плоский лист бумаги, с которого вы начали (минус клин), ее все равно можно называть плоской, не считая вершины. То, что у вершины есть кривизна, видно, так как окружность, описанная вокруг вершины, меньше, чем окружность, описанная на том же расстоянии от центра первоначального плоского бумажного круга. Иначе говоря, окружность у вершины короче, чем у круга того же радиуса в плоском пространстве, потому что из нее вырезан сегмент (рис. 5.6).

Подобным же образом в случае космической струны клин, вынутый из плоского пространства-времени, сокращает круги вокруг струны, но не влияет ни на время, ни на расстояние вдоль струны. Это значит, что пространство-время в окрестностях одной космической струны не содержит никаких временных петель, поэтому отправиться в прошлое там невозможно. Но если существует вторая космическая струна, которая движется относительно первой, направление времени на ней будет сочетанием направления времени и пространства на первой. То есть клин, вырезанный для второй струны, сократит и расстояние в пространстве, и интервал во времени с точки зрения наблюдателя, движущегося вместе с первой струной (рис. 5.7). Если космические струны движутся друг относительно друга со скоростью, близкой к скорости света, сокращение времени вокруг обеих струн может оказаться таким значительным, что путешественник вернется до того, как



Рис. 5.6

Клинья, вырезанные из пространства-времени, с резкими непараллельными краями



Клин для отдельной космической струны сокращает расстояния в покоящейся системе отсчета струны, но на время не влияет.

Рис. 5.7



Второй клин, вырезанный для другой движущейся космической струны, сокращает расстояния и в пространстве, и во времени в покоящейся системе отсчета первой космической струны.



КОНЕЧНОПОРОЖДЕННЫЙ ГОРИЗОНТ ПУТЕШЕСТВИЯ ВО ВРЕМЕНИ

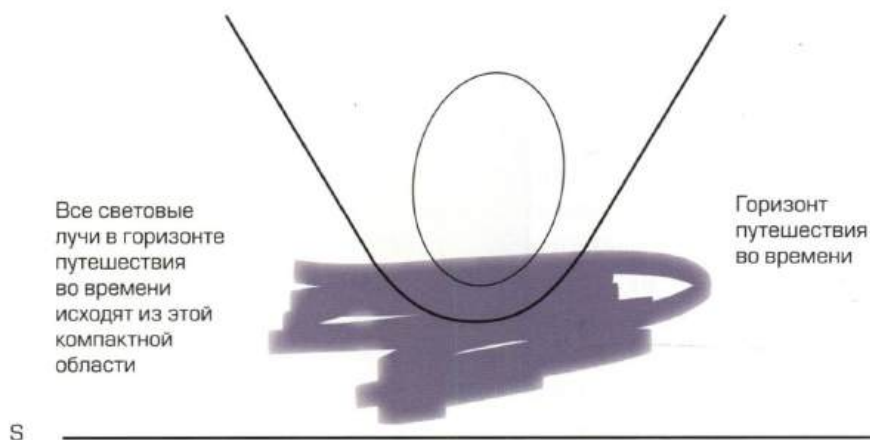


Рис. 5.8

Даже самая развитая цивилизация способна искривлять пространство-время только в ограниченной области. Горизонт путешествия во времени — граница той части пространства-времени, где возможно отправиться в свое прошлое, — формируется световыми лучами, исходящими из этой ограниченной области.

отправился в путь. Иначе говоря, там есть временные петли, по которым можно отправиться в прошлое.

Пространство-время космических струн содержит вещество с положительной плотностью энергии и соответствует известным нам физическим законам. Однако искажение, порождающее временные петли, бесконечно тянется в пространстве и уходит бесконечно далеко в прошлое во времени. Таким образом, в эти пространства-времена изначально заложена возможность путешествовать во времени. У нас нет причин полагать, что в нашу Вселенную заложено такое же искажение, и у нас нет никаких надежных данных о пришельцах из будущего. (Я не принимаю в расчет теорию заговора, согласно которой НЛО прибывают из будущего, а правительство это знает, но скрывает. Не так уж ловко правительство умеет что-то скрывать, как показывает опыт.) Поэтому я предполагаю, что в далеком прошлом не было никаких временных петель, точнее, в прошлом какой-то поверхности в пространстве-времени (назовем ее S). Тогда вопрос стоит так: может ли какая-нибудь высокоразвитая цивилизация создать машину времени? То есть может ли она модифицировать пространство-время в будущем S (над поверхностью S на рисунке), чтобы временные петли возникали в ограниченной области пространства? Я говорю об ограниченной области, поскольку даже самая высокоразвитая цивилизация предположительно способна контролировать лишь ограниченную часть Вселенной.

В науке правильная формулировка проблемы — зачастую львиная доля решения, и перед нами хороший пример этого. Чтобы



определить, что такое машина времени в ограниченной области, я вспомнил свои прежние исследования. Путешествие во времени возможно в области пространства-времени, в которой есть временные петли, траектории, движущиеся со скоростью меньше скорости света, но при этом как-то возвращающиеся в исходную точку в пространстве и времени благодаря искажению пространства-времени. Поскольку я предположил, что в далеком прошлом временных петель не было, должен существовать, так сказать, «горизонт» путешествий во времени, граница, отделяющая область, где есть временные петли, от области, где их нет (рис. 5.8).

Горизонты путешествий во времени во многом похожи на горизонты черных дыр. Горизонт черной дыры формируется лучами света, которые чуть не упали в черную дыру, но все же убереглись, а горизонт путешествия во времени — лучами света, которые едва не встретились сами с собой. Теперь в качестве критерия существования машины времени я беру так называемый горизонт, сгенерированный в ограниченной области, то есть горизонт, сформированный лучами света, исходящими из ограниченной области. Значит, они не исходят ни из бесконечности, ни из сингулярности, а зарождаются в ограниченной области, в которой есть временные петли, то есть именно в такой области, которую должна была создать та самая развитая цивилизация, о которой у нас идет речь.

Если мы примем такое определение как свидетельство существования машины времени, то сумеем применить механизмы, которые

Тогда встает вопрос: может ли какая-нибудь высокоразвитая цивилизация создать машину времени?



Рис. 5.9
Опасности путешествия во времени.

Рис. 5.10
Гипотеза, согласно которой черные дыры излучают и теряют массу, означает, что квантовая теория заставляет отрицательную энергию втекать в черную дыру через горизонт. Чтобы черная дыра сократилась в размере, плотность энергии на горизонте должна быть отрицательной, а это необходимо для создания машины времени.

придумали мы с Ролджером Пенроузом, чтобы изучать сингулярности и черные дыры. Даже без уравнений Эйнштейна я могу показать, что в целом горизонт, сгенерированный в ограниченной области, содержит луч света, который встречается сам с собой, то есть луч света, который снова и снова возвращается в одну и ту же точку. С каждым разом свет вокруг него будет все сильнее сдвигаться в синюю сторону диапазона, поэтому изображения будут все сильнее голубеть. Пики волн светового импульса будут все ближе друг к другу, и свет будет обращаться за все более короткие интервалы собственного времени. В сущности, у частицы света согласно ее собственному измерению времени будет ограниченная история, хотя она крутится в ограниченной области и не попадает в сингулярность кривизны.

Казалось бы, что такого, что частица света завершает свою историю за ограниченное время. Но еще я могу доказать, что существуют траектории, движущиеся со скоростью меньше скорости света и имеющие лишь ограниченную продолжительность. Это, вероятно, истории наблюдателей, попавшихся в замкнутую область перед горизонтом, — они будут двигаться по кругу все быстрее и быстрее и в конце концов достигнут скорости света за конечное время. Так что если красавица-инопланетянка из летающей тарелки заманивает вас в машину времени, будьте осторожны. А то, чего доброго, попадетесь в такую повторяющуюся историю ограниченной продолжительности (рис. 5.9).

Эти результаты не зависят от конкретной формы уравнений Эйнштейна — на них влияет только то, как именно должно исказиться пространство-время, чтобы получились временные петли в ограниченной области. Однако теперь можно задаться следующим вопросом: какое вещество должна применить развитая цивилизация, чтобы искривить пространство-время до такой степени, чтобы получить возможность построить машину времени в ограниченной области? Может быть, там везде положительная плотность энергии, как в пространстве-времени космических струн, о котором я только что говорил? Пространство космических струн не удовлетворяет моему требованию, чтобы временные петли образовывались в ограниченной области. Однако можно подумать, что дело просто в том, что космические струны имеют бесконечную длину. Можно представить себе машину времени в ограниченной области, созданную на основе ограниченных петель космических струн при повсеместно положительной плотности энергии. Жаль огорчать людей вроде Кипа, который рвется в прошлое, но при повсеместно положительной плотности

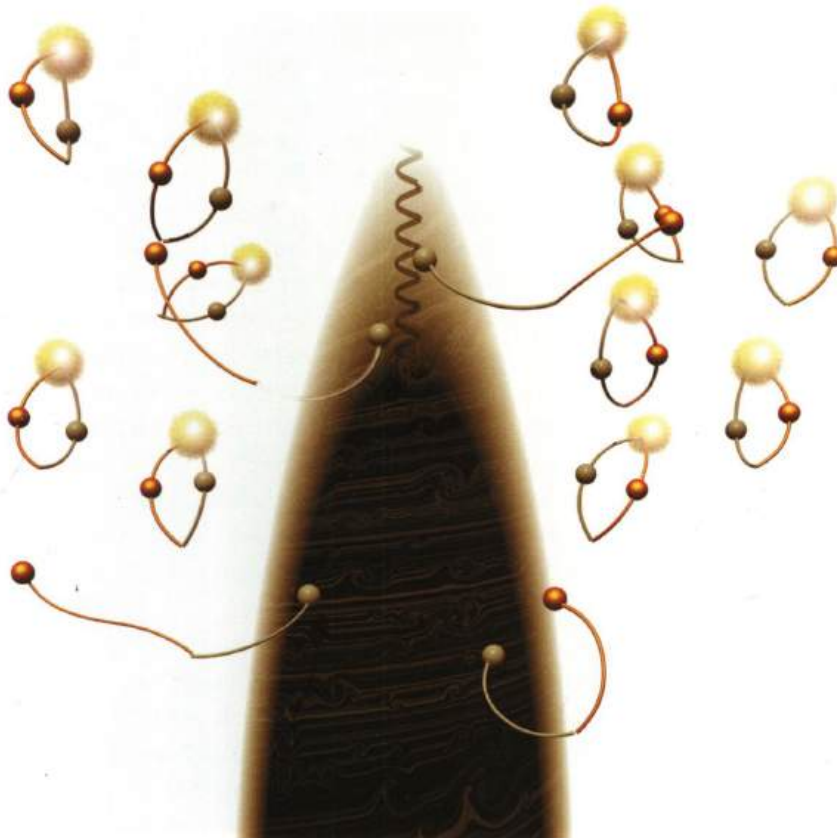


Рис. 5.11

энергии это невозможно. Я могу доказать, что для создания машины времени в ограниченной области нужна отрицательная энергия.

Плотность энергии в классической теории всегда положительна, поэтому машины времени в ограниченных областях на этом уровне исключаются. Но в полуклассической теории, где предполагается, что вещество ведет себя в соответствии с квантовой теорией, однако пространство ведет себя определенно и классически, все совсем иначе. Как мы уже видели, принцип неопределенности квантовой теории означает, что поля всегда неустойчивы и колеблются вверх-вниз даже в пустом на первый взгляд пространстве, а потому обладают бесконечной плотностью энергии. Таким образом, чтобы получить конечную плотность энергии, наблюдаемую во Вселенной, нужно вычесть бесконечное число. После такого вычитания плотность энергии может получиться и отрицательной, по крайней мере локально. Даже в плоском пространстве можно обнаружить квантовые

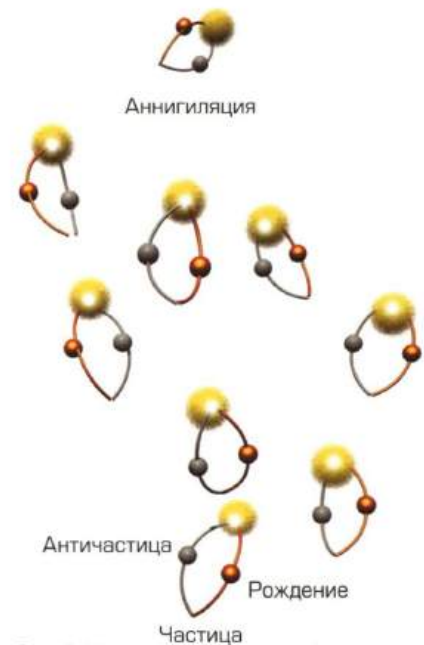


Рис. 5.10



Мой внук
Уильям Маккензи Смит.

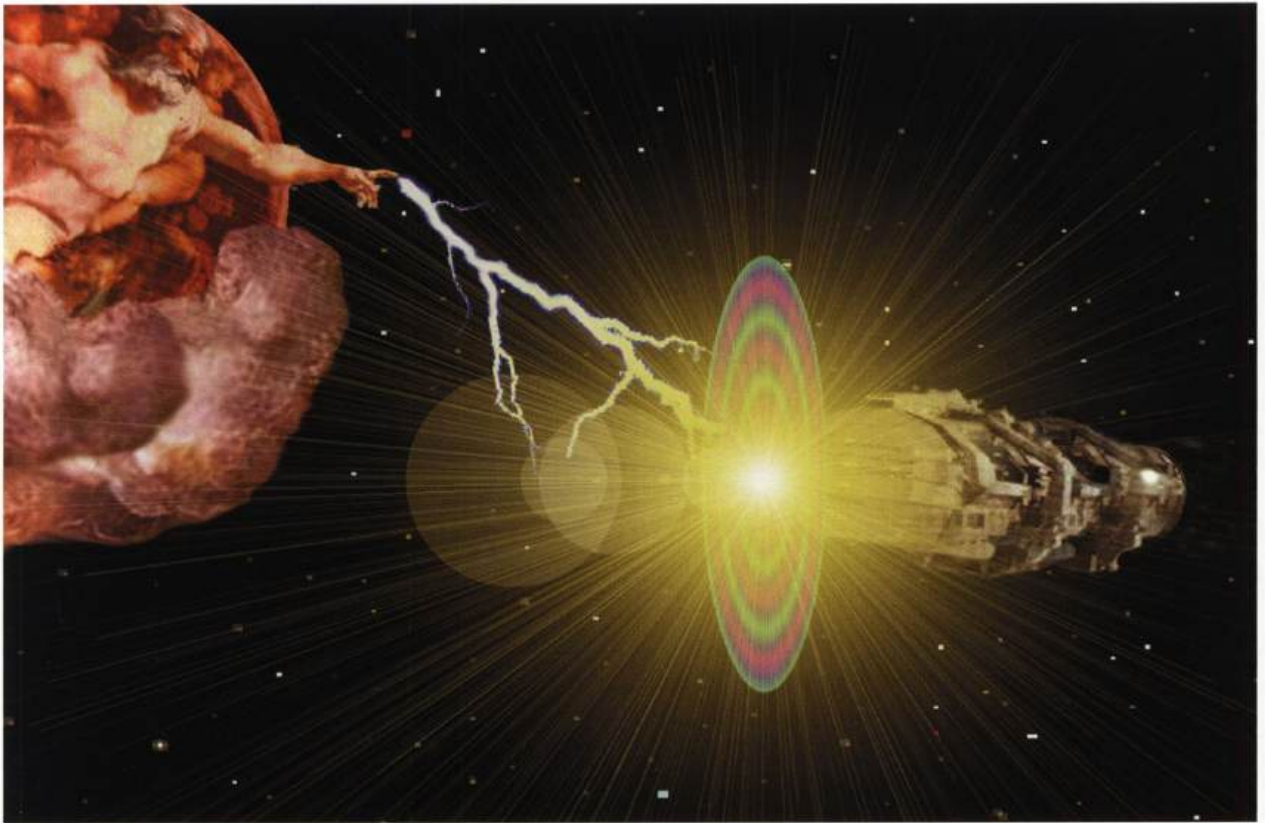
состояния, в которых плотность энергии локально отрицательна, хотя общая энергия положительна.

Читатель вправе задаться вопросом, действительно ли все эти отрицательные величины заставляют пространство-время искажаться именно таким образом, чтобы построить машину времени в ограниченной области, однако, похоже, так и есть, и иначе никак. Как мы видели в главе 4, квантовые флуктуации означают, что даже пустое на первый взгляд пространство полно пар виртуальных частиц, которые возникают вместе, расходятся, а потом снова встречаются и аннигилируют (рис. 5.10). Одна из пары виртуальных частиц всегда обладает положительной энергией, вторая — отрицательной. Если рядом черная дыра и частица с отрицательной энергией падает в нее, частица с положительной энергией улетает в бесконечность и там выглядит как излучение, уносящее положительную энергию из черной дыры. Частица с отрицательной энергией, упавшая в черную дыру, заставляет ту терять массу и медленно испаряться, а ее горизонт уменьшается в размерах (рис. 5.11).

Обычное вещество с положительной плотностью энергии обладает гравитационным притяжением и искажает пространство-время так, что световые лучи загигаются друг к другу, подобно тому как мяч на резиновом листе из главы 2 всегда заставляет мелкие шарики сбегаться к нему и не дает им укатиться прочь.

Из этого следует, что площадь горизонта черной дыры со временем может только увеличиваться, а не уменьшаться. Чтобы горизонт черной дыры уменьшился в размерах, плотность энергии на горизонте должна быть отрицательной и искажать пространство-время таким образом, чтобы световые лучи расходились. Это пришло мне в голову как-то перед сном вскоре после рождения моей дочери. Сколько лет миновало с тех пор, не скажу, но у меня уже есть внук.

Испарение черных дыр показывает, что на квантовом уровне плотность энергии иногда бывает отрицательной и искажает пространство-время в направлении, необходимом для создания машины времени. Таким образом, можно представить себе высокоразвитую цивилизацию, способную так все устроить, чтобы отрицательной плотности энергии хватило для создания машины времени, при помощи которой можно было бы перемещать макроскопические тела, скажем космические корабли. Однако есть большая разница между горизонтом черной дыры, формируемом лучами света, которые летят себе дальше, и горизонтом машины времени, внутри которого содержатся замкнутые лучи света, которые крутятся на месте и по-



стоянно возвращаются в исходную точку. Виртуальная частица, движущаяся по такой замкнутой траектории, будет постоянно возвращать в исходную точку энергию своего основного состояния. Поэтому можно ожидать, что на горизонте, то есть на границе машины времени — области, где можно попасть в прошлое, — плотность энергии будет бесконечной. Это непосредственно выводится из расчетов в тех случаях, когда условия достаточно просты, чтобы проделать точные вычисления. А следовательно, человек или космический аппарат, который попытается пройти за горизонт и попасть в машину времени, будет уничтожен мощным излучением (рис. 5.12). Поэтому будущее путешествий во времени сулит мрачные перспективы — или, лучше сказать, слепяще-белые.

Плотность энергии вещества зависит от его состояния, поэтому может статься, что высокоразвитая цивилизация может сделать плотность энергии на границе машины времени конечной, «выморозив»

Рис. 5.12

При попытке пересечь горизонт путешествий во времени рискуешь погибнуть от мощного излучения.

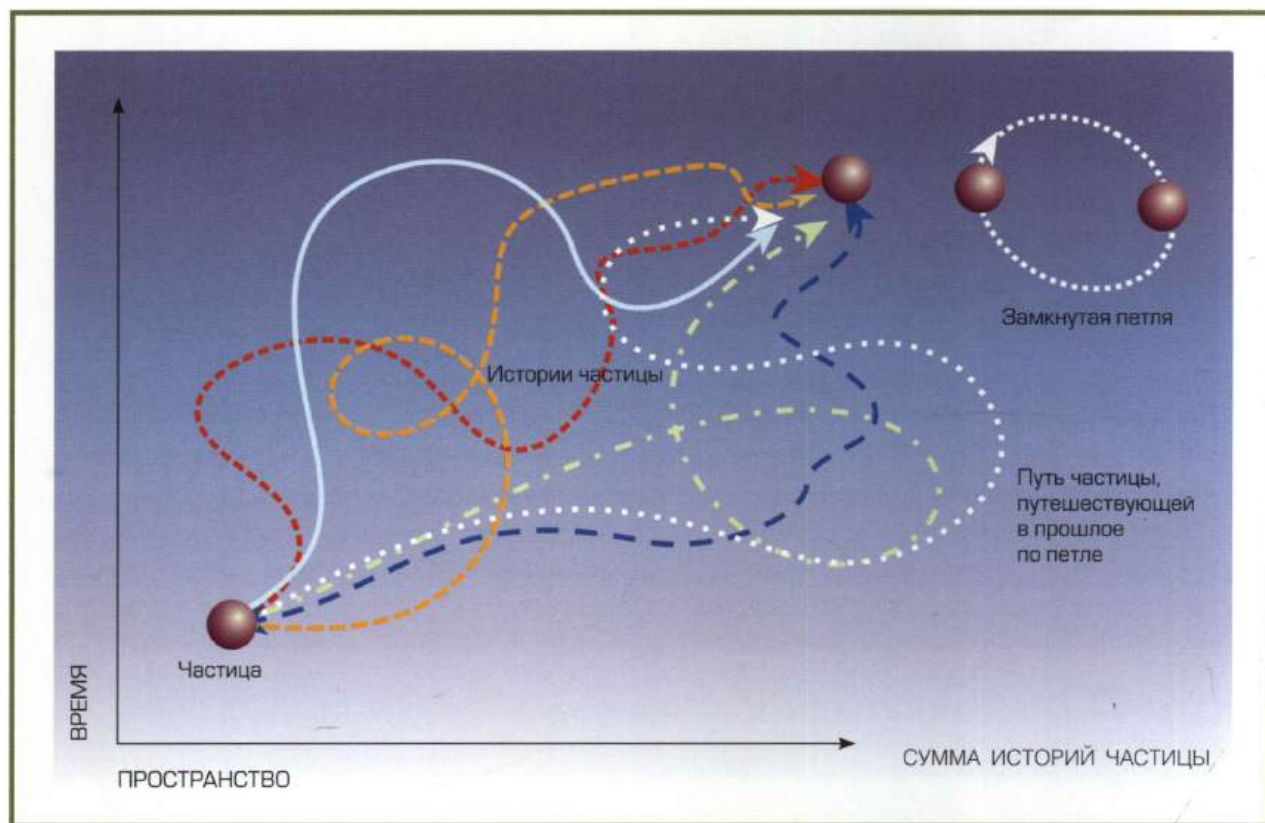


Рис. 5.13
Фейнмановская сумма историй должна включать в себя истории, в которых частицы возвращаются в прошлое, и даже истории, представляющие собой замкнутые петли в пространстве и времени.

или удалив виртуальные частицы, бегающие по замкнутой временной петле. Однако непонятно, будет ли такая машина времени стабильной: ведь при легчайшем возмущении, например если кто-то пересечет горизонт, чтобы попасть в машину времени, снова появятся циркулирующие виртуальные частицы и грянет гром. Было бы славно, если бы ученые имели возможность свободно обсуждать этот вопрос, не рискуя стать мишенью для презрения и насмешек. Даже если окажется, что путешествия во времени невозможны, важно понимать, почему это так.

Чтобы дать определенный ответ на этот вопрос, рассмотрим квантовые флуктуации не только в материальных полях, но и в самом пространстве-времени. Скорее всего, это вызовет некоторую размытость траекторий световых лучей и всей концепции управления временем. И в самом деле, можно считать, что излучение из черных дыр истекает потому, что в пространстве-времени есть квантовые флуктуации, а следовательно, горизонт определен нечетко. Поскольку пока у нас нет

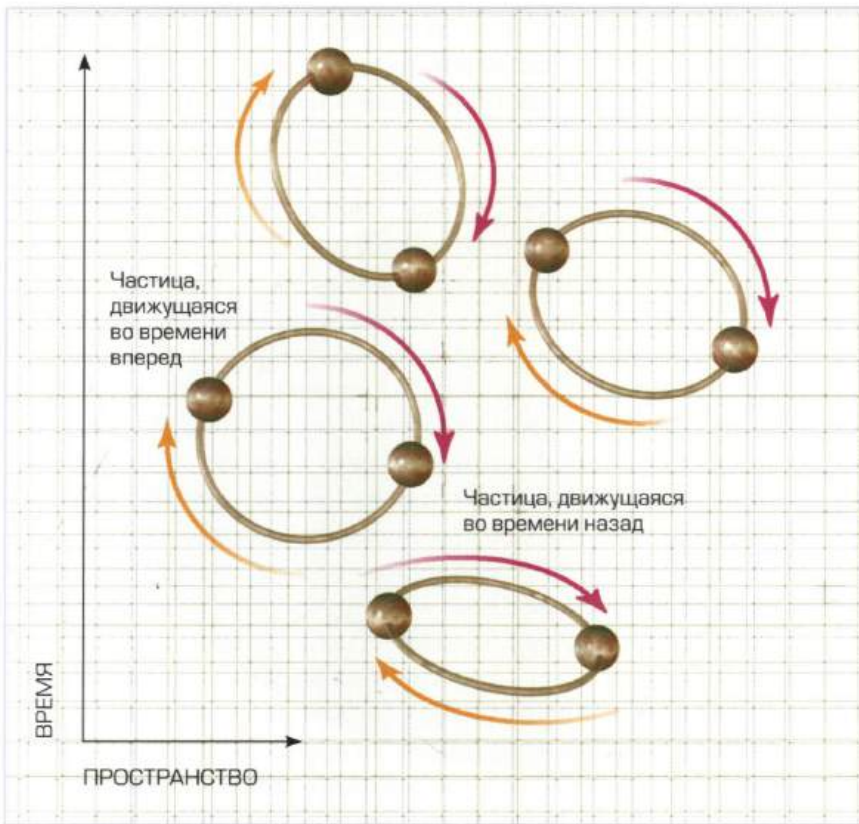
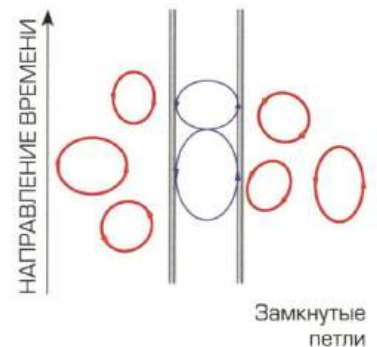


Рис. 5.14

полной теории квантовой гравитации, трудно сказать, каковы должны быть эффекты флуктуаций пространства-времени. Тем не менее можно надеяться получить некоторые подсказки из суммы историй Фейнмана, о которой рассказано в главе 3.

Каждая история представляет собой искривленное пространство-время с содержащимися в нем материальными полями. Поскольку нам нужно суммировать все возможные истории, а не только те, которые удовлетворяют тем или иным уравнениям, сумма должна включать в себя пространства-времени, искажение которых так сильно, что допускает путешествия в прошлое (рис. 5.13). Поэтому встает вопрос, почему путешествия во времени не происходят везде. Ответ состоит в том, что путешествия во времени и в самом деле происходят на микроскопическом масштабе, просто мы их не замечаем. Если применить фейнмановскую идею суммы историй к частице, придется включить в эту сумму и те истории, где частица

Рис. 5.15



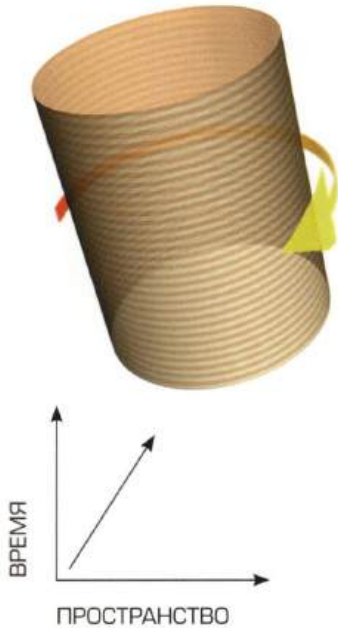


Рис. 5.16
Вселенная Эйнштейна — как цилиндр: ограничена в пространстве и постоянна во времени. Поскольку ее размер конечен, она везде может вращаться со скоростью меньше скорости света.

перемещается со скоростью больше скорости света, и те, где она возвращается в прошлое. В частности, нужно учесть и истории, в которых частица бежит по замкнутой петле в пространстве и времени. Это как в фильме «День сурка», где герою-журналисту приходится снова и снова проживать один и тот же день (рис. 5.14).

Наблюдать частицы с подобными замкнутыми историями непосредственно при помощи детектора невозможно. Однако косвенные эффекты удалось измерить в ходе множества экспериментов. Например, измеряли небольшое изменение длины волны света, испускаемого атомами водорода; это изменение вызывали электроны, движущиеся по замкнутым петлям. Еще регистрировали небольшую силу, возникающую между параллельными металлическими пластинами, — эту силу вызывало то, что историй с замкнутыми петлями, которые помещаются между пластинами, немного меньше, чем в области вне пластин, — это одна из эквивалентных интерпретаций эффекта Казимира. Таким образом, существование замкнутых историй доказано экспериментально (рис. 5.15).

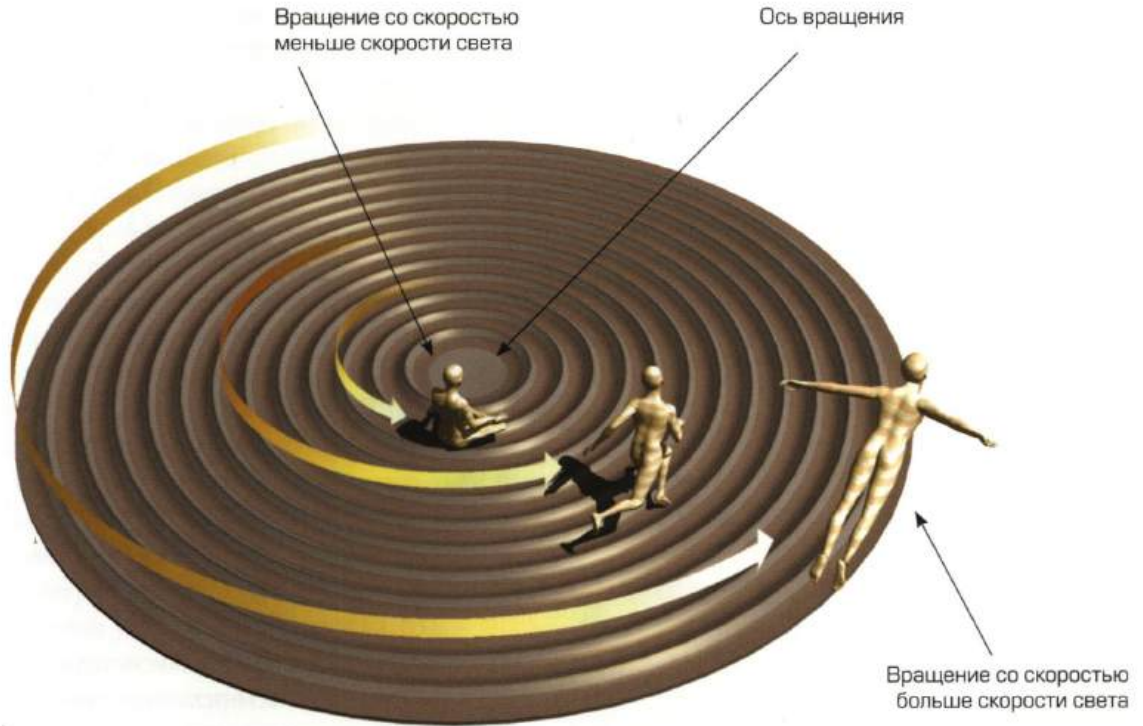
Можно поспорить, имеют ли замкнутые истории частиц какое-то отношение к искривлению пространства-времени, поскольку они возникают даже в пространстве фиксированной кривизны, в частности в плоском пространстве. Однако в последние годы мы обнаружили, что физические явления часто можно описать двумя одинаково верными способами. Можно с равным успехом сказать, что частица движется по замкнутой петле в данном фиксированном пространстве и что частица остается неподвижной, а пространство-время вокруг нее колеблется. Вопрос только в том, какую сумму подсчитываешь сначала — сумму по траекториям частиц или сумму по искривленным пространствам-временам.

Поэтому представляется, что квантовая теория допускает путешествия во времени на микроскопическом масштабе. Однако для научной фантастики от этого никакой пользы: в прошлое не отправишься и дедушку там не убьешь. Поэтому стоит задать вопрос, может ли суммарная вероятность историй принимать существенные значения в окрестностях пространств-времен с макроскопическими временными петлями.

Чтобы исследовать этот вопрос, имеет смысл изучить сумму историй материальных полей в нескольких фоновых пространствах-временах, которые последовательно приближаются к условиям, допускающим временные петли. Казалось бы, в момент первого появления петли времени должно произойти что-то зрелищное, что



ВРАЩЕНИЕ В ПЛОСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ



и нашло воплощение в одном простом примере, который я изучал со своим студентом Майклом Кэссиди.

Фоновые пространства-времени того типа, который мы изучали, тесно связаны с так называемой вселенной Эйнштейна — моделью пространства-времени, которую предложил Эйнштейн в те годы, когда думал, что Вселенная статична и не меняется во времени — не расширяется и не сжимается (см. главу 1). Во вселенной Эйнштейна время идет из бесконечного прошлого в бесконечное будущее. Однако пространственные направления в ней конечны и замкнуты сами на себя, как земная поверхность, просто с одним дополнительным измерением. Такое пространство-время можно представить себе в виде цилиндра с длинной осью — направлением во времени — и сечением, представляющим собой три пространственных измерения (рис. 5.16).

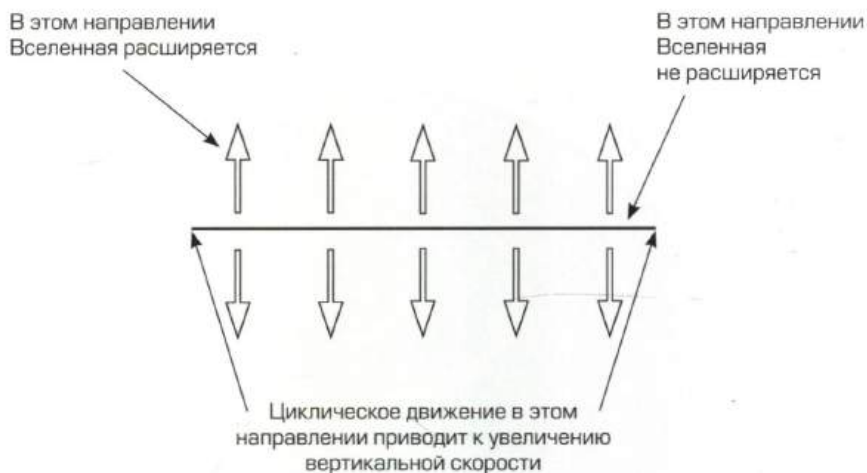
Вселенная Эйнштейна не расширяется, так что это не та вселенная, где мы живем. Тем не менее в таком пространстве-времени удобно изучать вопрос о путешествии во времени, поскольку эта мо-

Рис. 5.17

В плоском пространстве жесткое вращение на большом расстоянии от оси приводит к движению со скоростью больше скорости света.



Рис. 5.18. УСЛОВИЯ С ЗАМКНУТЫМИ ВРЕМЯПОДОБНЫМИ КРИВЫМИ



дель очень проста и в ней легко считать суммы историй. Давайте ненадолго отвлечемся от путешествий во времени и рассмотрим вещество во вселенной Эйнштейна, вращающееся вокруг какой-то оси.

Если вы на оси, то остаетесь в одной и той же точке пространства — как будто в центре карусели на детской площадке. Но если вы не на оси, то при вращении вокруг оси будете двигаться в пространстве. Чем дальше вы от оси, тем быстрее движетесь (рис. 5.17). Значит, если бы вселенная была бесконечна в пространстве, точки на достаточно большом расстоянии от оси вращались бы со скоростью выше световой. Однако, поскольку по пространственным направлениям вселенная Эйнштейна конечна, существует критический темп вращения, ниже которого во вселенной не будет областей, вращающихся со скоростью выше скорости света.

Теперь рассмотрим сумму историй частиц во вращающейся вселенной Эйнштейна. Если вращение медленное, частица при заданном количестве энергии может пройти по множеству траекторий. Таким образом, сумма всех историй частицы в данных условиях дает широкий диапазон возможностей. Значит, вероятность в таких условиях в сумме всех историй





искривленных пространств-времен будет велика, то есть эта история попадет в число более вероятных. Однако при приближении темпа вращения вселенной Эйнштейна к критической величине — когда скорость движения ее внешнего края приблизится к скорости света — классические законы допустят на краю только одну траекторию частицы, то есть движение со скоростью света. Это значит, что сумма всех историй частицы будет мала. Следовательно, вероятность таких условий в сумме всех историй искривленного пространства-времени будет низкой. То есть они попадут в число наименее вероятных.

Но какое отношение вселенная Эйнштейна имеет к путешествиям во времени и временным петлям? Дело в том, что они математически эквивалентны другим условиям, где временные петли допустимы. Я имею в виду вселенные, которые расширяются по двум пространственным измерениям. А по третьему не расширяются — оно периодическое. То есть если вы пройдете в этом направлении определенное расстояние, то вернетесь в исходную точку. Однако каждый раз, когда вы делаете обход по третьему пространственному измерению, ваша скорость в первом или втором измерении увеличивается (рис. 5.18).

Если прирост невелик, никаких временных петель нет. Однако рассмотрим последовательность условий с увеличивающимся приростом скорости. При определенном критическом приросте появятся временные петли. Неудивительно, что критический прирост соответствует критической скорости вращения во вселенной Эйнштейна. Поскольку подсчеты суммы историй в этих моделях математически эквивалентны, напрашивается вывод, что вероятность подобных условий стремится к нулю по мере приближения к искажению, необходимому для временных петель. Иначе говоря, вероятность добиться искажения пространства-времени, необходимого для создания машины времени, равна

Вероятность, что Кип вернется в прошлое и убьет своего дедушку, составляет $1/10^{10^{60}}$.

То есть меньше чем один к десяти с триллионом триллионов триллионов триллионов триллионов нулей.





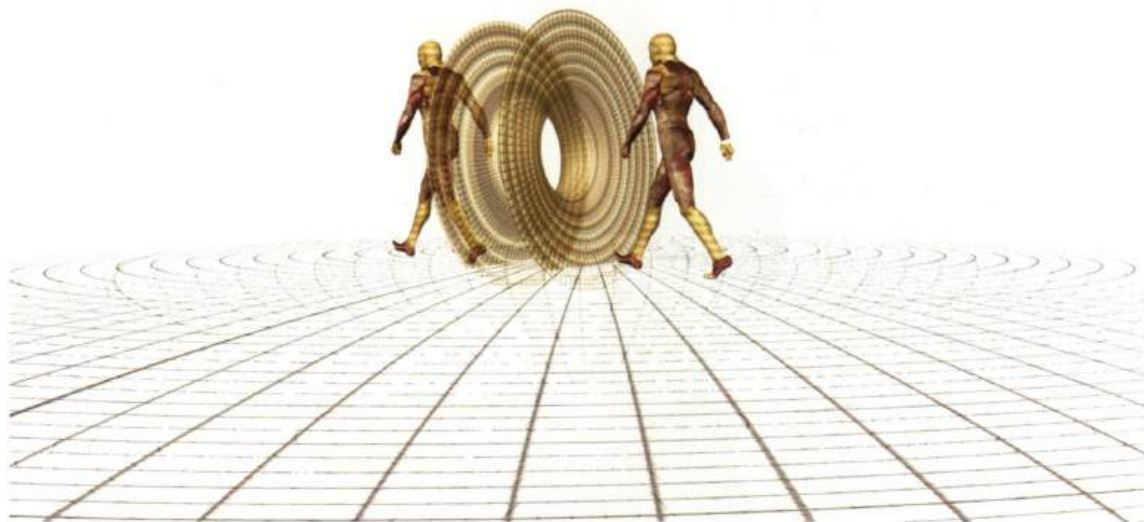
нулю. Это соответствует принципу, который я назвал «Поправкой о защите хронологии»: законы физики сговорились, чтобы не допустить путешествий во времени макроскопических объектов.

Хотя сумма историй допускает временные петли, их вероятность крайне мала. На основании аргументов дуальности, о которых я уже упоминал, я оцениваю вероятность, что Кип Торн вернется в прошлое и убьет своего дедушку, меньше чем в один к десяти с триллионом триллионов триллионов триллионов нулей.

Это очень маленькая вероятность, однако взгляните в портрет Кипа — и вы увидите, что он слегка размыт по краям. Это говорит о крошечной вероятности, что какой-то мерзавец из будущего все-таки вернулся и убил его дедушку, так что на самом деле его здесь нет.

Мы с Кипом — люди азартные и могли бы заключить пари даже с такими шансами. Но, к сожалению, по этому поводу мы поспорить не можем — ведь теперь мы на одной стороне. Впрочем, ни с кем другим я бы спорить не стал. Вдруг он из будущего и точно знает, как устроены путешествия во времени?

Вероятно, вы думаете, что эта глава — часть правительственного заговора с целью скрыть путешествия во времени. Вероятно, так оно и есть.



ГЛАВА 6

НАШЕ БУДУЩЕЕ. ЗВЕЗДНЫЙ ПУТЬ ИЛИ ЧТО-ТО ДРУГОЕ?

*Как биологическая и электронная жизнь будет усложняться
все быстрее и быстрее*

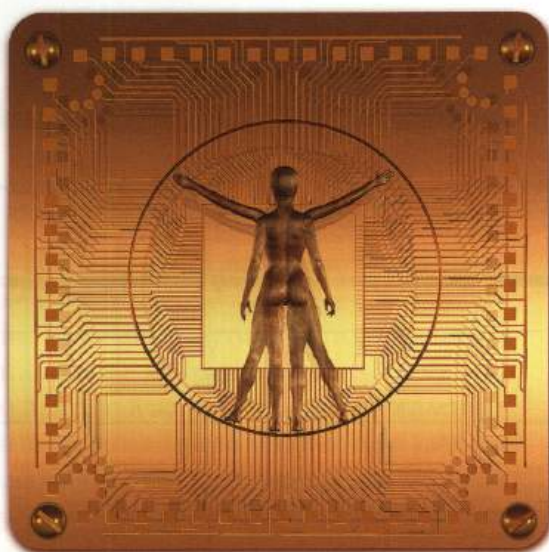
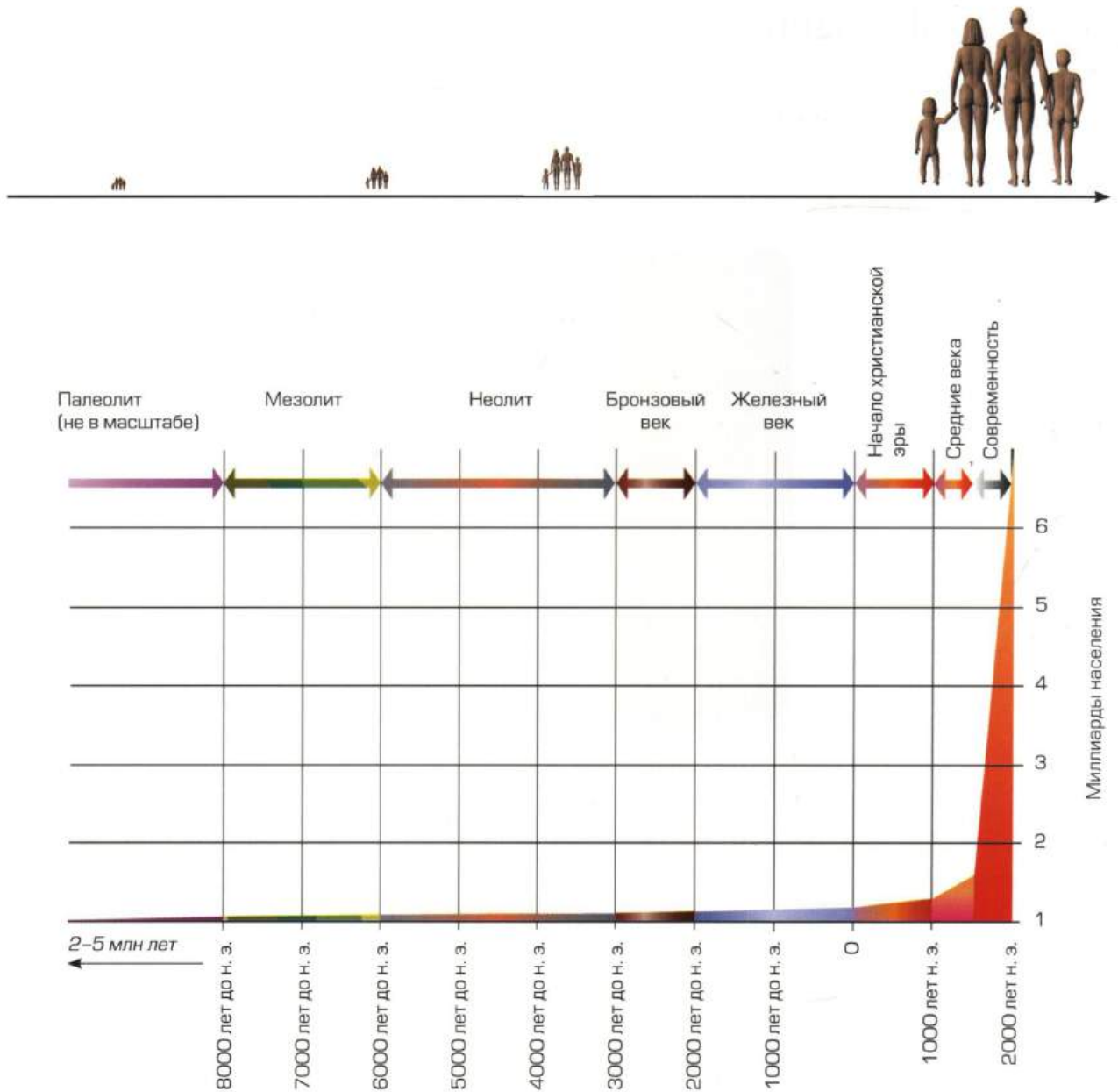




Рис. 6.1. РОСТ НАСЕЛЕНИЯ





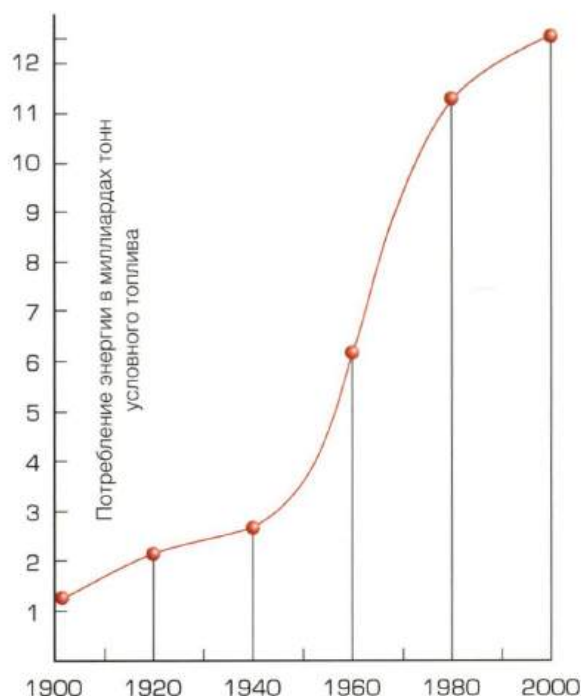
Мы с Ньютоном, Эйнштейном
и командером Дейтой играем
в покер в эпизоде
из «Звездного пути».

«Звездный путь. Следующее поколение»
© Paramount Pictures, 2001

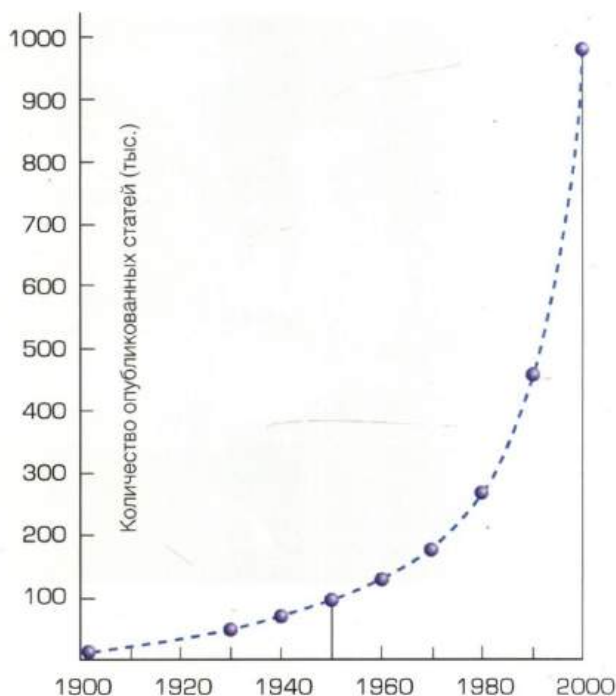
САГА «Звездный путь» так популярна, поскольку показывает уютную и утешительную картину будущего. Я и сам в какой-то степени поклонник «Звездного пути», поэтому меня без труда уговорили сняться в эпизоде, где я играю в покер с Ньютоном, Эйнштейном и командером Дейтой. Я всех побил, но, к сожалению, включился сигнал тревоги, и забрать выигрыш мне так и не удалось.

В «Звездном пути» показано общество, далеко опередившее наше в науке, технике и политическом устройстве (последнее, впрочем, нетрудно). Наверняка за это время произошли великие исторические перемены с неизбежными периодами тягот и бедствий, однако нам показывают эпоху, когда наука, техника и политическая организация практически достигли совершенства.

Я хочу подвергнуть эту картину сомнению и задать вопрос, удастся ли нам когда-нибудь достичь последней стадии научно-технического прогресса — стабильности. За последние десять тысяч лет или около того, со времен последнего ледникового периода, человечество никогда не находилось в состоянии, когда сумма знаний была бы постоянна, а техника не развивалась. Было несколько откатов назад, например в Средние века после падения Римской империи. Однако население планеты, которое служит критерием нашей технической способности сохранить жизнь и прокормиться,



ОБЩЕМИРОВОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА



КОЛИЧЕСТВО ПУБЛИКУЕМЫХ В МИРЕ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

Рис. 6.2

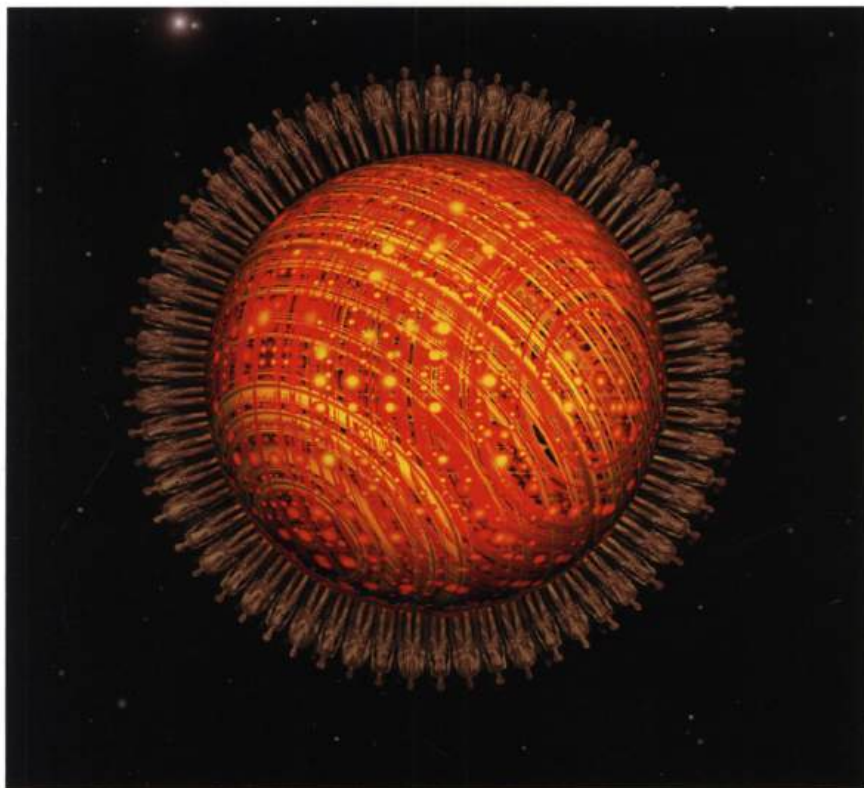
Слева: Общемировое потребление энергии в миллиардах тонн условного топлива, где 1 тонна приблизительно равна единице битуминозного угля = 8,13 мегаватт-часа.

Справа: Количество научных статей, публикуемых ежегодно. По вертикали отложено количество в тысячах штук. В 1900 году было 9000 статей в год. К 1950 году их стало уже 90 000, а к 2000 году — более 900 000.

постоянно росло, не считая отдельных провалов, в том числе «черной смерти» (рис. 6.1).

За последние двести лет население растет по экспоненте — то есть на один и тот же процент каждый год. Сейчас темп прироста населения составляет 1,9 % в год. Казалось бы, не так уж много, но из этого следует, что население планеты удваивается каждые 40 лет (рис. 6.1).

Есть и другие критерии технологического развития за последние десятилетия — это потребление электроэнергии и количество научных статей (рис. 6.2). Они тоже показывают экспоненциальный рост с периодом удвоения менее сорока лет. Нет никаких признаков, что в ближайшем будущем научно-технологический прогресс замедлится и остановится, и этого точно не произойдет ко времени «Звездного пути», действие которого разворачивается в относительно недалеком будущем. Но если рост населения и увеличение потребления электроэнергии продолжатся в нынешнем темпе,



К 2600 году все население планеты будет стоять плечом к плечу, а от потребления электричества Земля раскалится докрасна.

к 2600 году все население планеты будет стоять плечом к плечу, а от потребления электричества Земля раскалится докрасна (см. рисунок выше).

Если ставить рядом все выходящие в свет новые книги, придется двигаться со скоростью 140 километров в час, чтобы не упустить из виду конец ряда. Естественно, к 2600 году новые литературные произведения и научные труды будут существовать скорее в электронном виде, чем в виде бумажных книг и журналов. Так или иначе, если их количество и дальше будет расти по экспоненте, в моей отрасли теоретической физики будут публиковать десять статей в секунду — нечего будет и думать о том, чтобы все их прочитать.

Очевидно, нынешний экспоненциальный рост не может продолжаться вечно. Что же будет? Один из вариантов развития событий — мы самоуничтожимся в результате какой-то антропогенной катастрофы, например ядерной войны. Расхожая мрачная шутка гласит,



Рис. 6.3

Сюжет «Звездного пути» строится на том, что «Энтерпрайз» и другие космические корабли вроде изображенного вверху способны двигаться со скоростью гораздо больше скорости света благодаря искривлению пространства. Однако, если Поправка о защите хронологии верна, нам все же придется исследовать нашу Галактику на космических судах с реактивными ракетными двигателями, которые движутся со скоростью меньше скорости света.

что мы до сих пор не вступили в контакт с инопланетянами, потому что любая цивилизация, достигнув нашей ступени развития, утрачивает стабильность и самоуничтожается. Однако я оптимист. Я не верю, что человеческий род прошел такой долгий путь только ради того, чтобы взлететь на воздух как раз тогда, когда начинается самое интересное.

Не исключено, что картина будущего, нарисованная в «Звездном пути» — мы достигли очень высокого уровня научно-технического развития, однако вышли на плато, — окажется верной в том, что касается наших знаний об основных законах, управляющих Вселенной. Как будет рассказано в следующей главе, возможно, существует общая теория всего, и мы откроем ее в не столь уж отдаленном будущем. Если эта теория есть, она позволит нам определить, можно ли



воплотить в жизнь мечту «Звездного пути» о двигателе, работающем за счет искривления пространства-времени. По нынешним представлениям, нам придется исследовать нашу Галактику медленно и занудно, на звездолетах, летающих медленнее света, но поскольку у нас еще нет теории всего, нельзя исключать, что мы сумеем создать двигатель на искривлении пространства (рис. 6.3).

С другой стороны, мы уже знаем законы, которые действуют почти всегда, кроме самых экстремальных ситуаций: законы, которые управляют экипажем «Энтерпрайз», если не самим судном. Однако, похоже, мы все же никогда не достигнем плато в том, как мы применяем эти законы, а также в сложности систем, которые мы способны создать с их помощью. Сложности систем и посвящен остаток этой главы.

Самая сложная (причем с большим отрывом) система, с которой нам приходится иметь дело, — это, несомненно, наш организм. Судя по всему, жизнь зародилась в первобытных океанах, покрывавших Землю четыре миллиарда лет назад. Как это произошло, мы не знаем. Вероятно, случайные столкновения атомов привели к возникновению макромолекул, способных к самовоспроизведению и самостоятельной организации в более сложные структуры. Зато мы знаем, что около трех с половиной миллиардов лет назад возникла сложнейшая молекула ДНК.

ДНК — основа всей жизни на Земле. У нее двойная спиральная структура, похожая на винтовую лестницу, а открыли ее Фрэнсис Крик и Джеймс Уотсон в лаборатории имени Кавендиша в Кембридже в 1953 году. Две нити двойной спирали соединены парами оснований, будто ступеньками. Оснований у ДНК четыре: аденин, гуанин, тимин и цитозин. Порядок, в котором они появляются в винтовой лестнице, несет генетическую информацию, позволяющую ДНК строить живой организм и самовоспроизводиться. Когда ДНК копирует сама себя, то иногда ошибается в пропорции или порядке оснований в спирали. В большинстве случаев ошибки при копировании лишают ДНК способности к самовоспроизведению или сильно ее



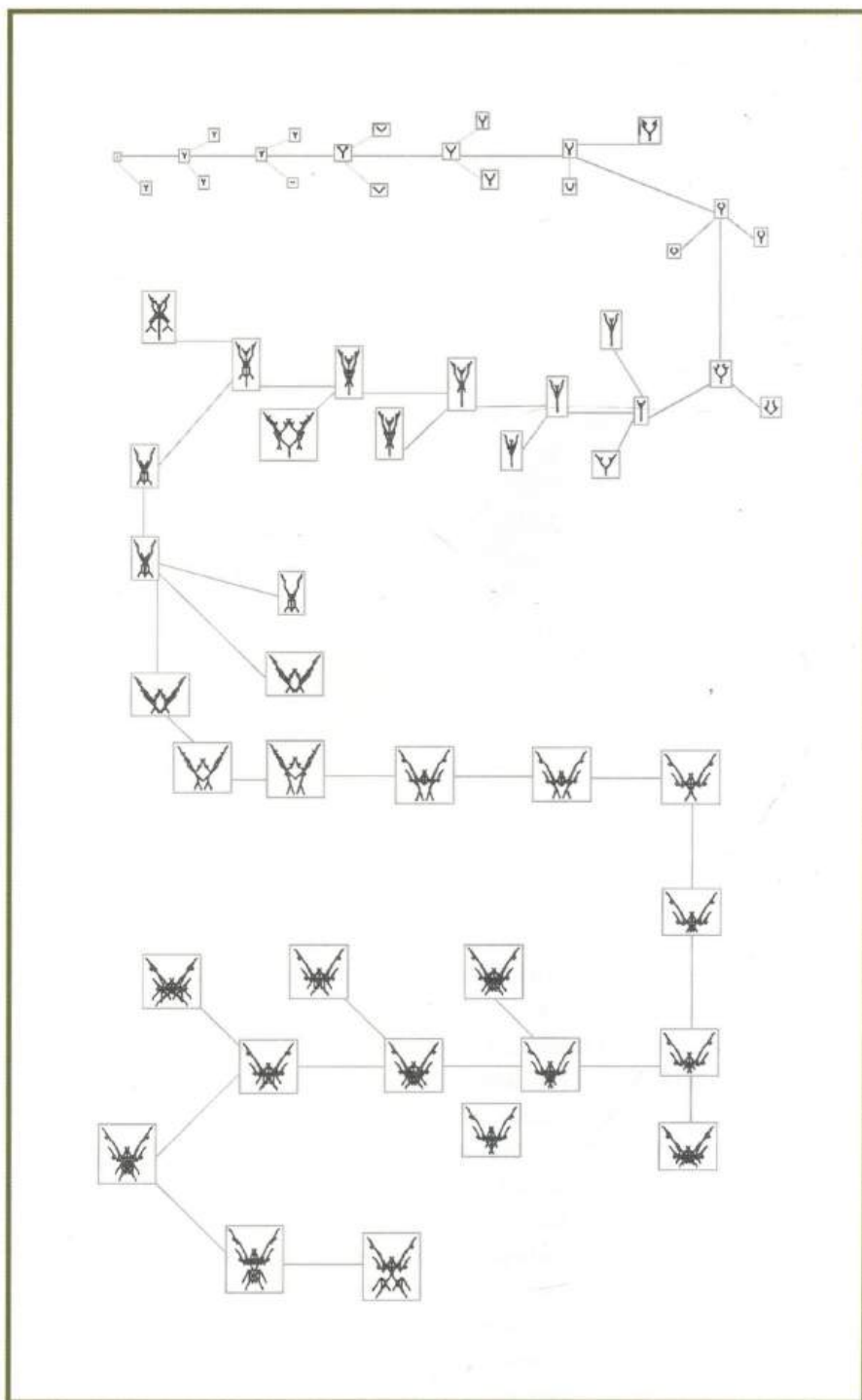
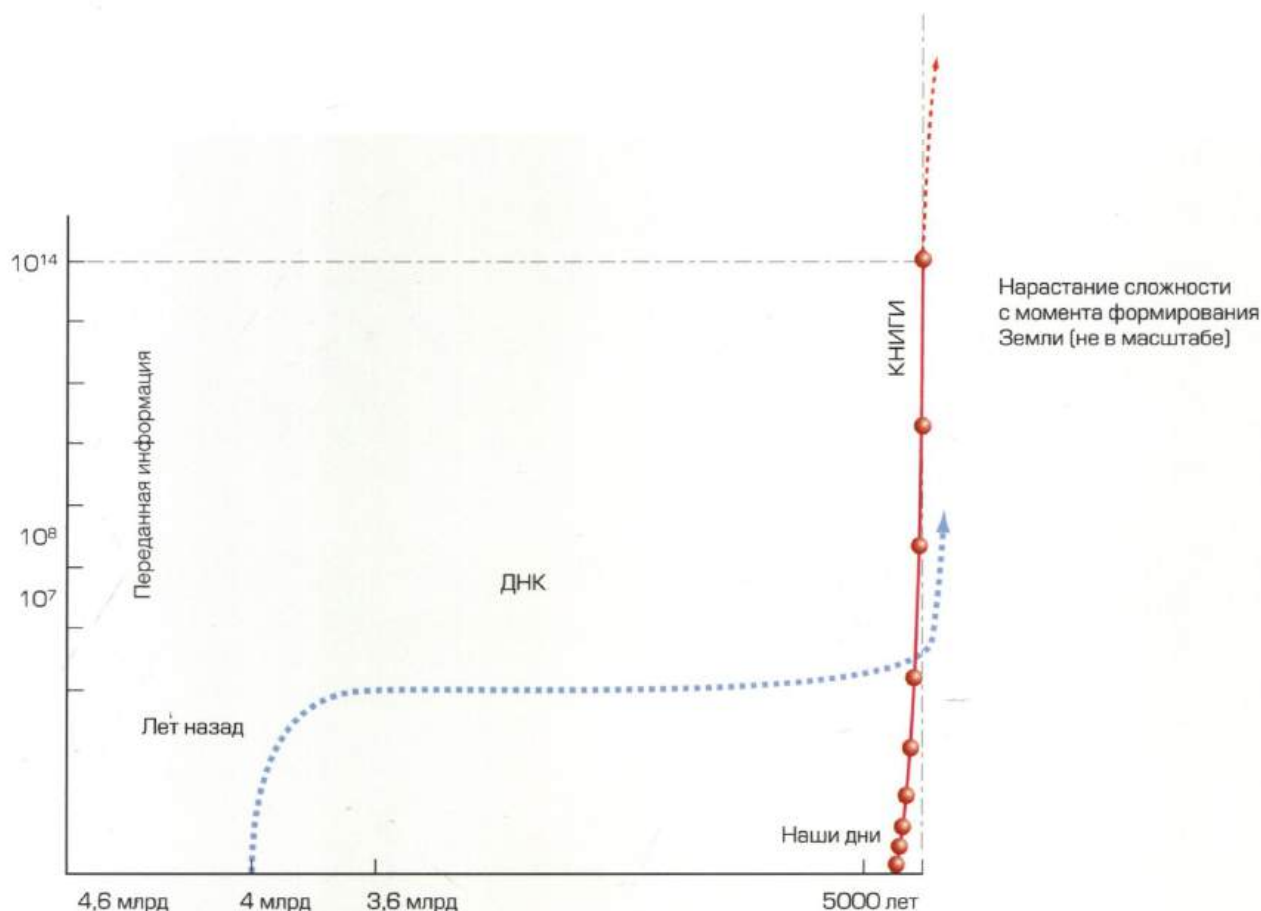


Рис. 6.4 (справа)
ЭВОЛЮЦИЯ В ДЕЙСТВИИ

Компьютерная модель биоморфов, которые эволюционировали в программе, составленной биологом Ричардом Докинзом.

Выживание той или иной «породы» зависело от простых качеств — в частности, от того, насколько эти существа «интересные», «оригинальные» или «насекомоподобные». Программа начинает с одного пикселя, первые поколения генерируются случайно, а затем развиваются в ходе процесса, напоминающего естественный отбор. Докинз вывел насекомоподобное существо всего за 29 поколений (с несколькими эволюционными тупиками).



снижают, а следовательно, подобные генетические ошибки, они же мутации, вымирают. Но в некоторых случаях ошибка (мутация) повышает шансы ДНК на выживаемость и размножение. Такие изменения закрепляются в генетическом коде. Так информация, содержащаяся в последовательности ДНК, постепенно развивается и усложняется (рис. 6.4).

Поскольку биологическая эволюция — это по большей части случайные блуждания в пространстве всех генетических возможностей, шла она очень медленно. Сложность — или количество бит информации, закодированное в ДНК, — примерно равна числу оснований в молекуле. Первые два миллиарда лет прирост сложности, похоже, составлял один бит информации в сто лет. Прирост сложности ДНК постепенно увеличивался и в последние несколько миллионов лет достиг одного бита в год. Но потом — приблизительно шесть-восемь тысяч лет назад — произошел крупный рывок. Мы придумали письменный язык. Это означало, что информацию стало возможно пере-



Рис. 6.5



Если выращивать эмбрионы вне человеческого тела, можно добиться большего размера мозга у более высокого интеллекта.



давать от поколения к поколению, не дожидаясь результатов очень медленного процесса случайных мутаций и естественного отбора. Сложность стремительно возросла. Один-единственный роман в мягкой обложке содержит столько же информации, сколько транслируют различия в ДНК между людьми и обезьянами, а тридцатитомная энциклопедия способна вместить код всей последовательности человеческой ДНК (рис. 6.5).

А главное — информацию в книгах можно быстро изменять и дополнять. Сейчас человеческая ДНК в ходе биологической эволюции изменяется примерно на бит в год. Но каждый год в свет выходит двести тысяч новых книг, так что новая информация поступает со скоростью более миллиона бит в секунду. Большинство этой информации, разумеется, чистый шлак, но даже если в ней содержится один полезный бит на миллион, все равно прирост идет в сто тысяч раз быстрее биологической эволюции.

Передача данных внешними, небиологическими средствами привела к тому, что человечество доминирует на планете и наша популяция растет экспоненциально. Но вот мы очутились на пороге новой эры, когда мы сможем повысить сложность своего внутреннего архива — ДНК, — не дожидаясь, пока это сделает медленный процесс биологической эволюции. За последние десять тысяч лет ДНК человека не особенно изменилась, но мы, вероятно, сможем полностью перестроить ее в ближайшее тысячелетие. Разумеется, многие считают, что генетическую модификацию людей следует запретить, но едва ли мы сумеем предотвратить работы в этой области. Крупномасштабная генетическая модификация растений и животных будет разрешена по экономическим соображениям, и кто-нибудь наверняка попробует проделать то же самое с людьми. Если во всем мире не установится тоталитаризм, кто-нибудь где-нибудь создаст усовершенствованного человека.

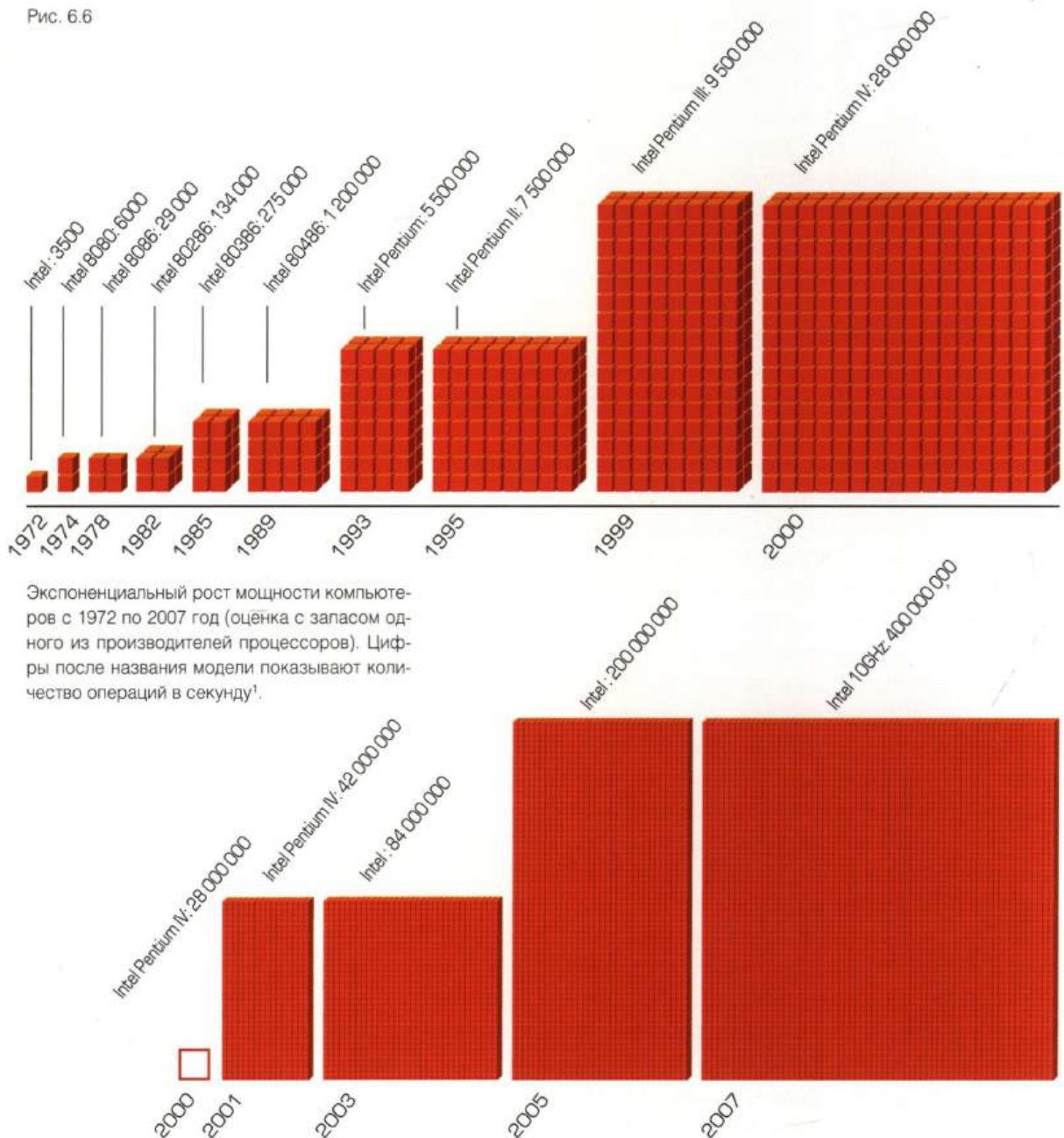
Ясно, что создание усовершенствованного человека породит огромные общественно-политические проблемы у обычных людей. Я ни в коей мере не отстаиваю генетическую модификацию людей и не считаю, что это желательно, просто хочу сказать, что она все равно будет, хотим мы этого или нет. Именно поэтому я не верю в научную фантастику вроде «Звездного пути», в которой люди через четыреста лет ничем не отличаются от нас. Я думаю, что человечество как вид и его ДНК будут стремительно усложняться. Нам следует признать, что это вполне вероятно, и продумать, как нам с этим быть.



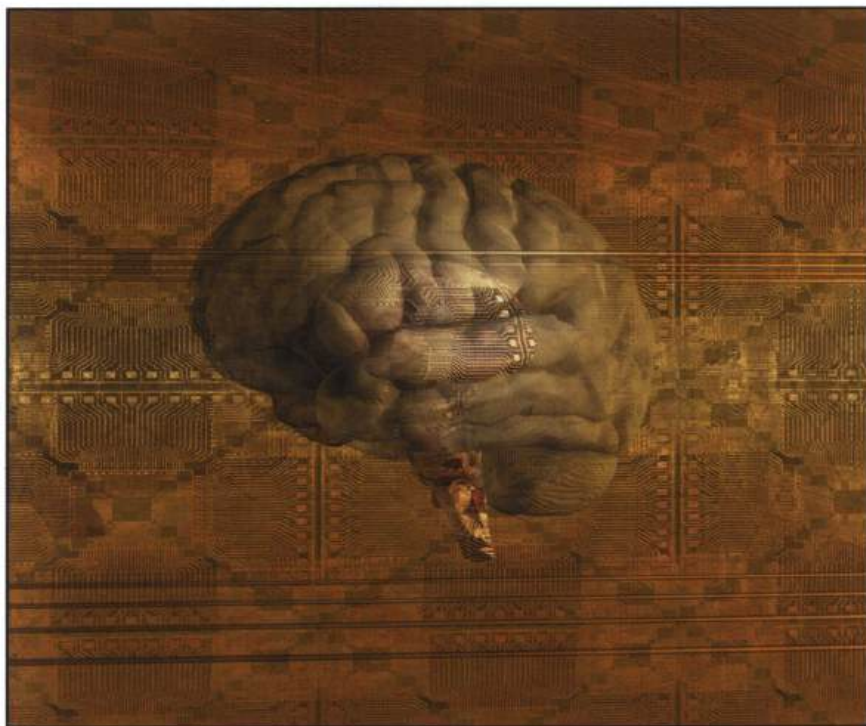
Сегодняшние компьютеры по вычислительным способностям уступают мозгу скромного дождевого червя.



Рис. 6.6



¹ В реальности эволюция процессоров пошла не по пути повышения частоты, а по пути увеличения количества процессорных ядер. В настоящее время частота одного процессорного ядра обычно не превышает 4 ГГц. — Прим. ред.



В каком-то смысле человечество нуждается в улучшении своих умственных и физических качеств, поскольку ему предстоит выживать в непрерывно усложняющемся мире и решать новые задачи, в число которых входят и космические путешествия. Кроме того, люди должны усложняться как биологические системы, чтобы не дать себя опередить системам электронным. На сегодня компьютеры гораздо быстрее нас, но у них нет никаких признаков разума. И неудивительно, ведь современные компьютеры устроены проще мозга дождевого червя, который не славится выдающимися интеллектуальными достижениями.

Однако компьютеры подчиняются так называемому закону Мура: их скорость и сложность удваиваются каждые полтора года (рис. 6.6). Перед нами снова экспоненциальный рост, который не может продолжаться бесконечно. Однако он, вероятно, продолжится до тех пор, пока сложность компьютеров не сравнится со сложностью человеческого мозга. Иногда говорят, что подлинного разума у компьютеров не будет никогда, правда, неясно, что это такое — подлинный разум. Однако мне представляется, что если очень сложные хи-

Нейроимпланты обеспечат человеку гораздо более совершенную память и готовые блоки информации, например целый язык или возможность в считанные минуты усвоить содержание той или иной книги. Подобные усовершенствованные люди мало чем будут напоминать нас с вами.



КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

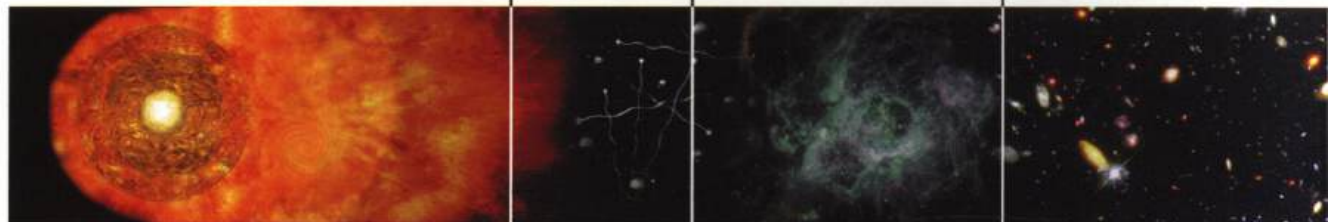
СОБЫТИЯ (не в масштабе)

0,00003 млрд лет. Большой взрыв и очень горячая, оптически толстая и инфляционно расширяющаяся Вселенная

Вещество и энергия разделяются. Вселенная становится прозрачной

1 млрд лет. Скопления вещества формируют протогалактики, где синтезируются тяжелые ядра

3 млрд лет. Галактики, заснятые Космическим телескопом им. Хаббла в поле *Hubble Deep Field*



ВРЕМЯ (в масштабе)



Рис. 6.7

Человечество существует лишь на протяжении крошечной доли истории Вселенной. (Если бы эта схема соответствовала реальным масштабам, а промежуток существования человечества составлял 7 см, вся история Вселенной растянулась бы на километр с лишним). Если мы когда-нибудь встретим инопланетную жизнь, она, скорее всего, будет либо гораздо примитивнее нашей, либо гораздо более развитой.

мические молекулы в человеческом организме могут реагировать так, что человек становится разумным, не менее сложные электронные схемы тоже могут заставить компьютер вести себя разумно. А если компьютеры станут разумными, не исключено, что они сами будут создавать компьютеры — еще сложнее и разумнее.

Но будет ли этот рост биологической и электронной сложности продолжаться бесконечно или у него есть естественный предел? С биологической точки зрения предел человеческого разума пока что задан размерами мозга, то есть черепной коробки, способной пройти через родовые пути. Я видел, как появляются на свет трое моих детей, и знаю, как трудно голове выйти наружу. Однако я думаю, что не пройдет и нескольких сотен лет, как мы научимся выращивать младенцев вне человеческого тела, и это ограничение будет снято. Однако рано или поздно увеличение размеров человеческого мозга при помощи генной инженерии столкнется с новым препятствием: химические вещества, передающие сигналы, которые регулируют нашу умственную деятельность, действуют относительно

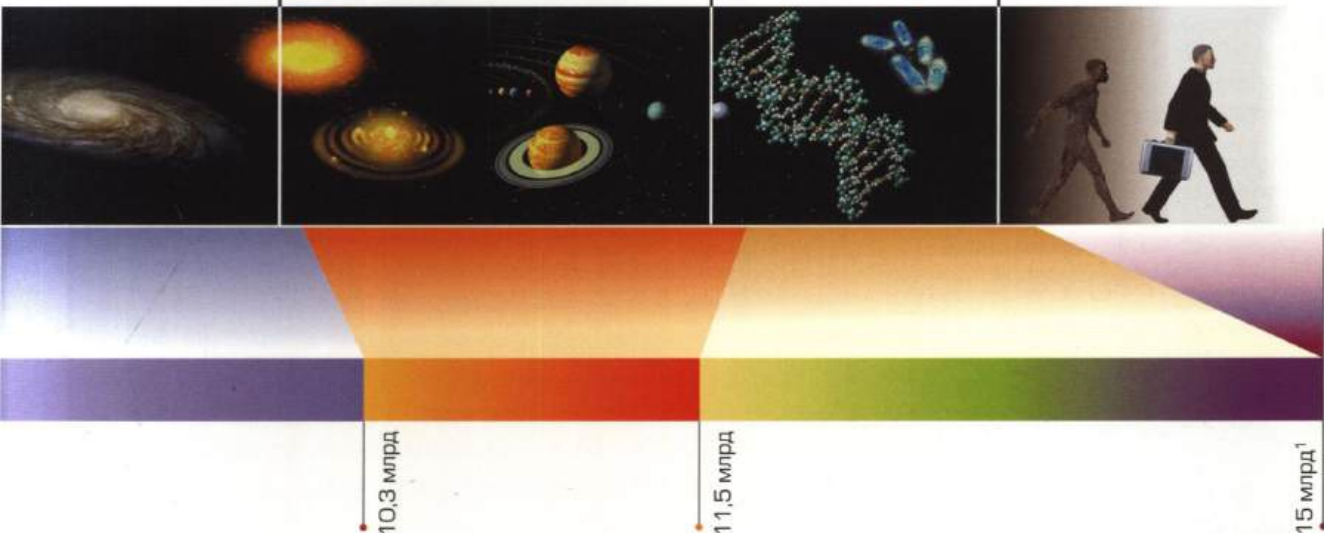


Формируются
новые галактики
вроде нашей,
образуются более
тяжелые ядра

Формирование
Солнечной системы и ее
планет

3,5 млрд лет назад
появляются первые
живые организмы

0,0005 млрд лет назад
появляются первые люди



медленно. А значит, дальнейшее повышение сложности мозга будет происходить за счет скорости. Можно или быть очень умным, или быстро соображать — но не одно и другое сразу. И все же я думаю, что мы сможем стать гораздо умнее большинства героев «Звездного пути» — это не сложно.

Электронные схемы сталкиваются с той же проблемой сложности-скорости, что и человеческий мозг. Однако в этом случае сигналы электрические, а не химические, поэтому передаются со скоростью света, а она гораздо выше. С другой стороны, скорость света уже сегодня служит практическим огра-

¹ По современным представлениям, возраст Вселенной составляет около 13,8 млрд лет, так что нижний ряд цифр должен быть скорректирован на 1,2 млрд лет. — Прим. ред.





БИОЛОГИЧЕСКИ-ЭЛЕКТРОННЫЙ ИНТЕРФЕЙС

В пределах двадцати лет компьютер за тысячу долларов, вероятно, сравнится по сложности с мозгом человека. Параллельные процессоры имитируют работу мозга и заставят компьютеры действовать разумно и сознательно.

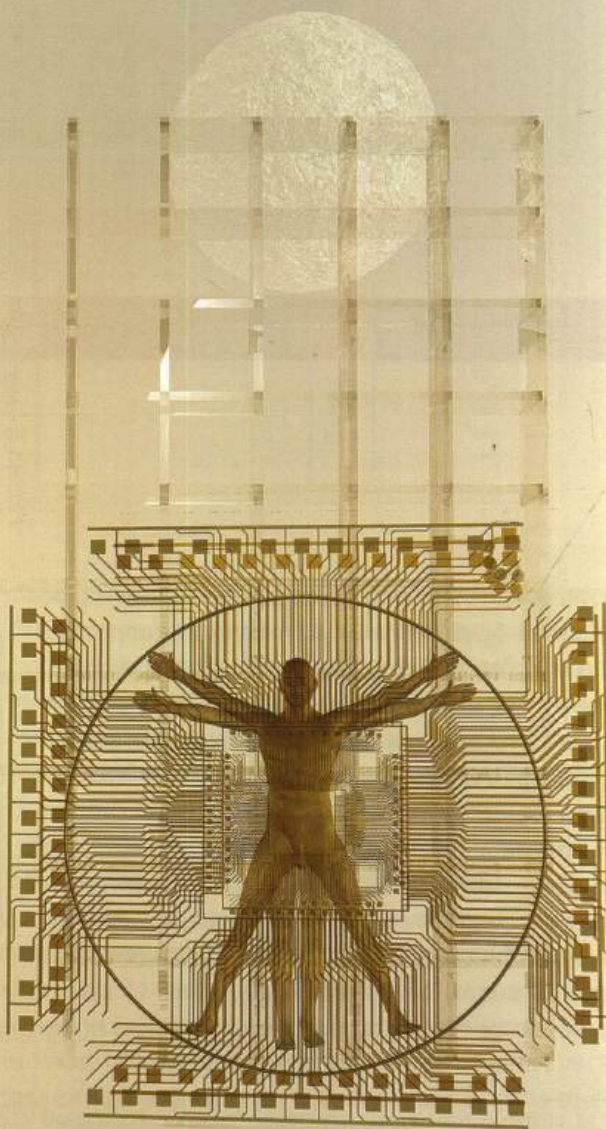
Нейроимпланты обеспечат гораздо более быстрое взаимодействие мозга с компьютером, и разница между биологическим и электронным интеллектом понемногу сотрется.

В ближайшем будущем большинство деловых операций будут, вероятно, совершаться между виртуальными юридическими лицами через интернет.

В пределах десятилетия многие из нас, возможно, даже предпочтут жить виртуальной жизнью в Сети и там строить дружеские и близкие отношения с другими виртуальными личностями.

Наши представления о геноме человека, несомненно, поспособствуют огромному прогрессу медицины, а кроме того, дадут нам возможность существенно усложнить структуру ДНК человека. Вследующие несколько веков генная инженерия человека, возможно, заменит биологическую эволюцию, что полностью перестроит человечество как биологический вид и поставит перед нами совершенно новые нравственные вопросы.

Космические путешествия за пределы Солнечной системы, вероятно, потребуют создания генетически модифицированных людей либо беспилотных космических аппаратов, управляемых компьютерами.





ничением при создании быстрых компьютеров. Улучшить ситуацию можно, если делать схемы миниатюрнее, но в конечном итоге перед их создателями встанет преграда в виде атомной природы вещества. Однако до этого препятствия еще остался некоторый простор для действий.

Впрочем, у электронных схем есть способ повысить свою сложность, сохраняя скорость: для этого нужно скопировать себя в человеческий мозг. У мозга не один процессор, обрабатывающий каждую команду по очереди. У него миллионы процессоров, которые работают одновременно. Подобная массивованно-параллельная обработка данных — будущее не только человеческого, но и электронного разума¹.

Если предположить, что мы не уничтожим сами себя в ближайшие сто лет, вероятно, что сначала мы расселимся на планеты Солнечной системы, а затем — на соседние звезды. Но все будет не как в «Звездном пути» или «Вавилоне-5», где почти в каждой планетной системе обнаруживается новая раса, очень похожая на людей. Человечество существовало в нынешнем виде лишь около двух миллионов лет из примерно пятнадцати, миновавших с момента Большого взрыва (рис. 6.7).

Так что если даже в других планетных системах и есть жизнь, шансы застать ее на знакомой, человеческой стадии крайне малы. Скорее всего, любая внеземная жизнь, с которой мы столкнемся, будет либо гораздо примитивнее нашей, либо гораздо более развитой. Если она высокоразвита, почему представители других цивилизаций не перелетели через Галактику и не посетили Землю? Если бы инопланетяне здесь побывали, они оставили бы очевидные следы, куда больше похожие на «День независимости», чем на «Инопланетянина».

Как же объяснить, что внеземные гости к нам не спешат? Не исключено, что где-то существует высокоразвитая цивилизация, которая знает о нас, но предпочитает не трогать и оставить вариться в собственном первобытном бульоне. Однако сомнительно, чтобы инопланетяне так бережно относились к низшим формам жизни: мы, например, не очень печалимся о насекомых и червях, которых давим при каждом шаге. Более правдоподобная версия — что вероятность зарождения жизни на других планетах или развития разумной жизни очень мала. Поскольку мы претендуем на разумность —



Служит ли разум преимуществом при естественном отборе?

¹ Массивованно-параллельная обработка электронных данных, которую Хокинг в 2000 году считал делом будущего, стала широко применяться уже 10-15 лет спустя. — Прим. ред.



возможно, без особых оснований, — то склонны считать, что разум — неизбежное следствие эволюции. Но это не обязательно так. Неизвестно, служит ли разум преимуществом при естественном отборе. Бактерии прекрасно обходятся без разума и переживут нас, если наш так называемый разум заставит нас покончить с собой, развязав ядерную войну. Поэтому, исследуя Галактику, мы, вероятно, найдем примитивные формы жизни, но едва ли встретим подобных себе.

Будущее науки непохоже на благостную картину, нарисованную в «Звездном пути»: нас не ждет Вселенная, населенная множеством гуманоидных рас, обладающих развитой, но, в сущности, статичной наукой и техникой. Нет, скорее всего, думается мне, мы будем одни — но при этом сложность наших биологических и электронных систем будет стремительно нарастать. Впрочем, в ближайшие сто лет это едва ли произойдет, и это все, что мы можем утверждать с уверенностью. Но к концу следующего тысячелетия, если мы просуществоем до этого времени, наша жизнь будет фундаментально отличаться от «Звездного пути».



ГЛАВА 7

БРАНЫ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА НОВЫЙ МИР

Неужели мы живем на бране? А вдруг мы просто голограммы?

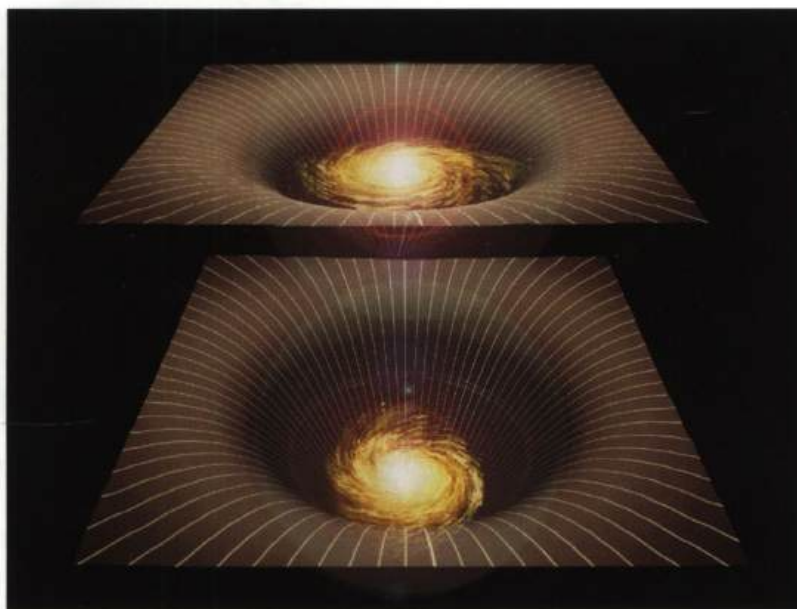




Рис. 7.1

М-теория — словно пазл. Найти и расставить по местам кусочки по краям легко и просто, но мы не понимаем, что происходит в середине, где мы не можем даже приблизительно оценить, насколько малы или велики те или иные величины.

¹ Здесь обитают драконы (лат.).



КАКОЙ БУДЕТ ДОРОГА НАШИХ ОТКРЫТИЙ? Приведут ли к успеху поиски полной теории всего, которая управляет Вселенной и всем, что в ней есть? На самом деле, как написано в главе 2, возможно, мы уже открыли теорию всего — это М-теория. Насколько нам известно, единой формулировки у нее пока нет. Вместо этого мы обнаружили целый набор разных на первый взгляд теорий, которые, похоже, представляют собой приближения к одной и той же фундаментальной теории в разных предельных случаях, как, скажем, ньютонова теория всемирного тяготения представляет собой приближение к эйнштейновской теории относительности в предельном случае слабого гравитационного поля. М-теория — словно пазл. Легче всего найти и расставить по местам кусочки по краям, на границах М-теории, где те или иные величины малы. Мы довольно хорошо представляем себе эти края, но в центре пазла М-теории до сих пор зияет провал, и мы не представляем себе, что там происходит (рис. 7.1). Пока мы не заполним этот провал, мы не вправе утверждать, что открыли теорию всего.

Что же там, в центре М-теории? Обнаружим ли мы там драконов (или что-то не менее удивительное), как на древних картах неведомых земель? Накопившийся опыт показывает, что каждый раз, когда мы переходим к наблюдениям на меньшем масштабе, там обычно обнаруживаются неожиданные новые явления. В начале XX века мы понимали, как устроена природа на масштабах классической физики, которая прекрасно объясняет все по шкале от расстояний между звездами и примерно до сотой доли миллиметра. Согласно классической физике, вещество — это сплошная среда, обладающая качествами вроде вязкости и упругости, однако со временем появились





Рис. 7.2.

Слева: Классический неделимый атом. Справа: Атом, в котором электроны вращаются вокруг ядра из протонов и нейтронов (не в масштабе).

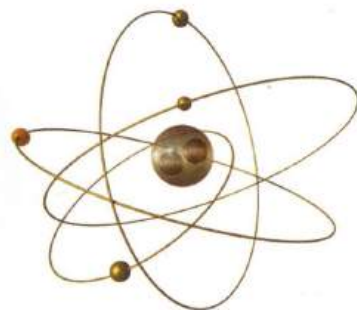


Рис. 7.3.

Вверху: Протон, состоящий из двух верхних кварков, каждый с положительным электрическим зарядом $2/3$, и одного нижнего кварка с отрицательным зарядом $1/3$. Внизу: Нейтрон, состоящий из двух нижних кварков, каждый с отрицательным электрическим зарядом $1/3$, и одного верхнего кварка с положительным зарядом $2/3$ (не в масштабе).

свидетельства того, что вещество не однородное, а зернистое, оно состоит из крошечных составных частей под названием «атомы». Слово «атом» древнегреческого происхождения и означает «неделимый», однако вскоре оказалось, что и сами атомы состоят из электронов, которые вращаются по орбитам вокруг ядра из протонов и нейтронов (рис. 7.2).

Достижения атомной физики за первые тридцать лет XX века позволили нам продвинуться вниз по масштабам до миллионной доли миллиметра. И мы обнаружили, что протоны и нейтроны состоят из еще меньших частиц — так называемых кварков (рис. 7.3).

Недавние исследования в области ядерной физики и физики высоких энергий показали нам, что происходит на масштабах еще в миллиард раз меньше. Казалось бы, так может продолжаться вечно — мы и дальше будем обнаруживать структуры все меньшего и меньшего масштаба. Однако у этой последовательности есть предел, как у набора матрешек, которые все-таки рано или поздно кончаются (рис. 7.4). В конце концов достаем последнюю, самую маленькую матрешку, которая больше не делится. В физике самая маленькая матрешка называется «планковская длина». Чтобы добраться до еще более коротких расстояний, потребуются частицы настолько высоких энергий, что такие могут быть только внутри черных дыр. Мы не знаем точно, какое значение фундаментальной планковской длины получится в М-теории, но, вероятно, она составляет всего миллиметр, деленный на сто тысяч миллиардов миллиардов миллиардов. Построить ускорители, способные исследовать такие малые масштабы, мы никогда не сумеем. Они должны иметь размер больше Солнечной системы, так что при нынешнем

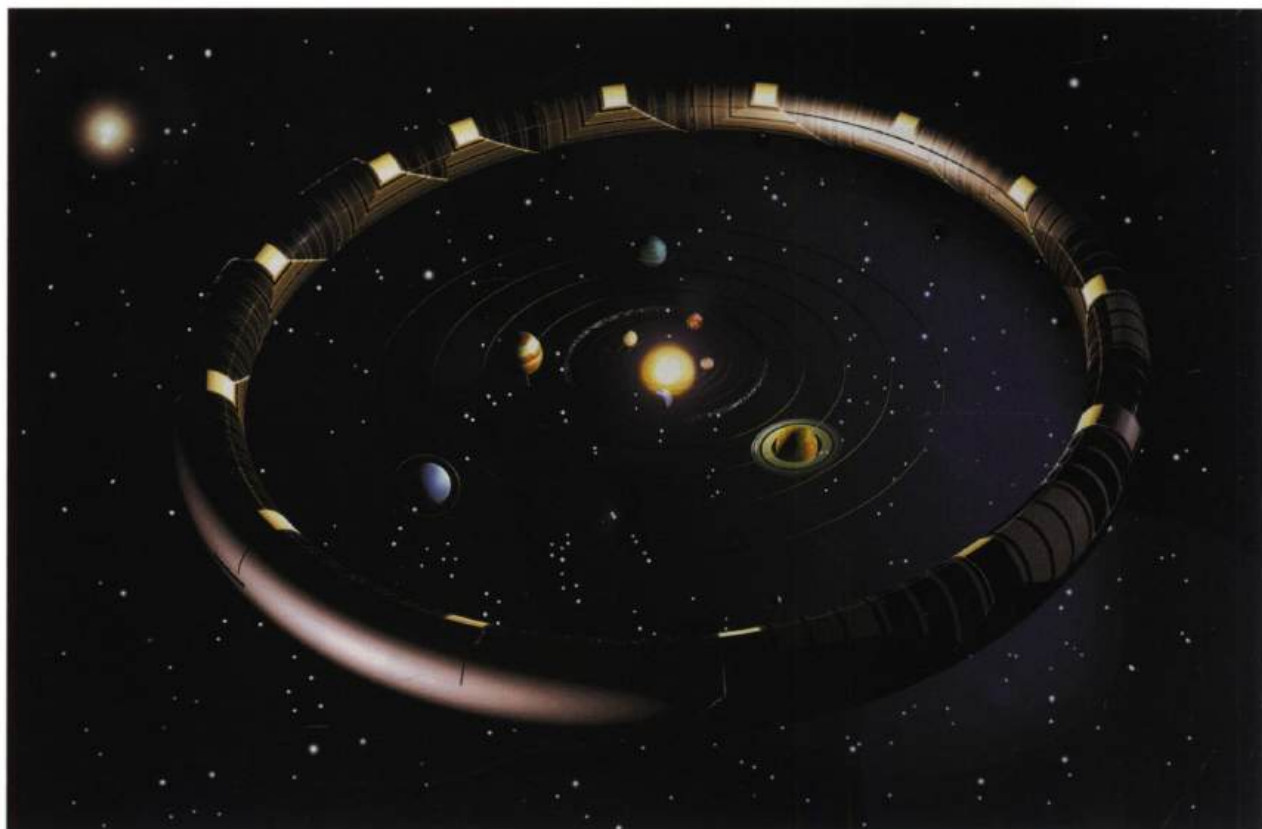
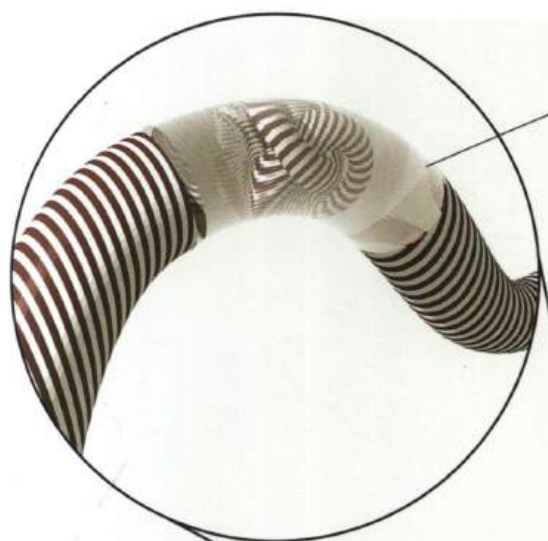


Рис. 7.5
Размеры ускорителя, необходимого для исследования расстояний порядка планковской длины, должны быть больше диаметра Солнечной системы.

экономическом положении правительство едва ли финансирует подобный проект (рис. 7.5).

Однако недавно появились некоторые данные, позволяющие надеяться, что нам будет несколько легче (и дешевле) обнаружить по крайней мере некоторых драконов М-теории. Как рассказано в главах 2 и 3, в наборе математических моделей, составляющих М-теорию, у пространства-времени насчитывается десять или одиннадцать измерений. До последнего времени считалось, что шесть или семь дополнительных измерений свернуты и очень малы. Как будто человеческий волос (рис. 7.6).

Если посмотреть на волос в лупу, станет видно, что у него есть толщина, однако невооруженным глазом мы видим просто линию, у которой из измерений есть только длина. Может быть, и пространство-время устроено так же: на человеческом, атомном и даже ядерном масштабе оно представляется четырехмерным и почти



Если исследовать пространство-время при помощи частиц достаточно высокой энергии, может оказаться, что оно многомерно.



Рис. 7.6

Невооруженным глазом мы видим волос как линию, и кажется, будто из измерений он обладает лишь длиной. Точно так же, вероятно, и пространство-время представляется нам четырехмерным, однако при исследовании с помощью высокоэнергичных частиц окажется, что оно десяти- или одиннадцатимерно.

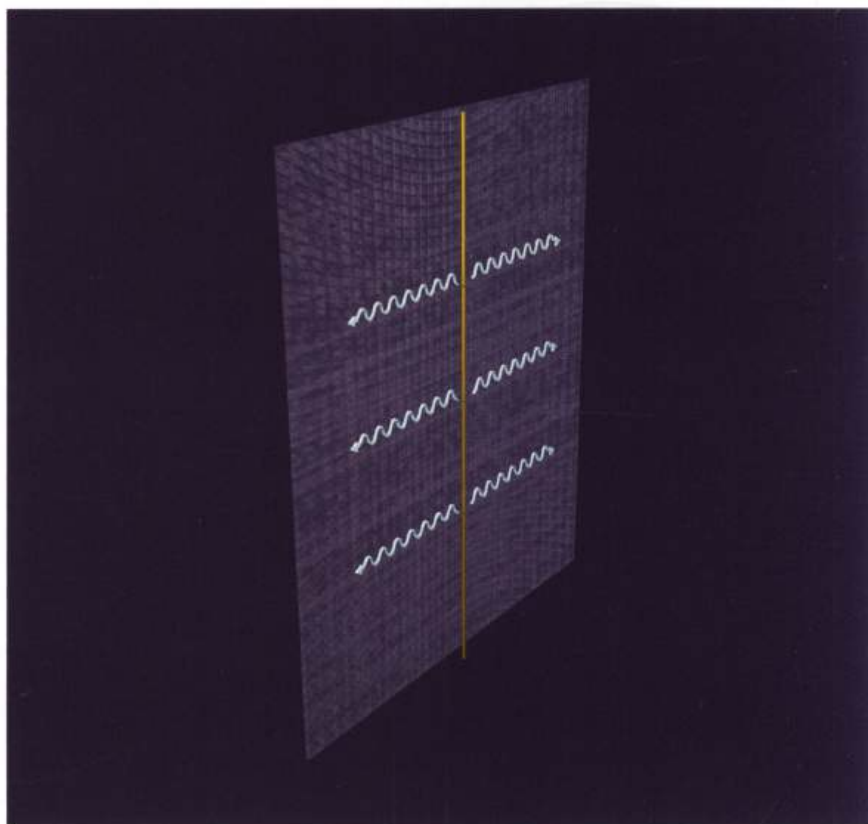


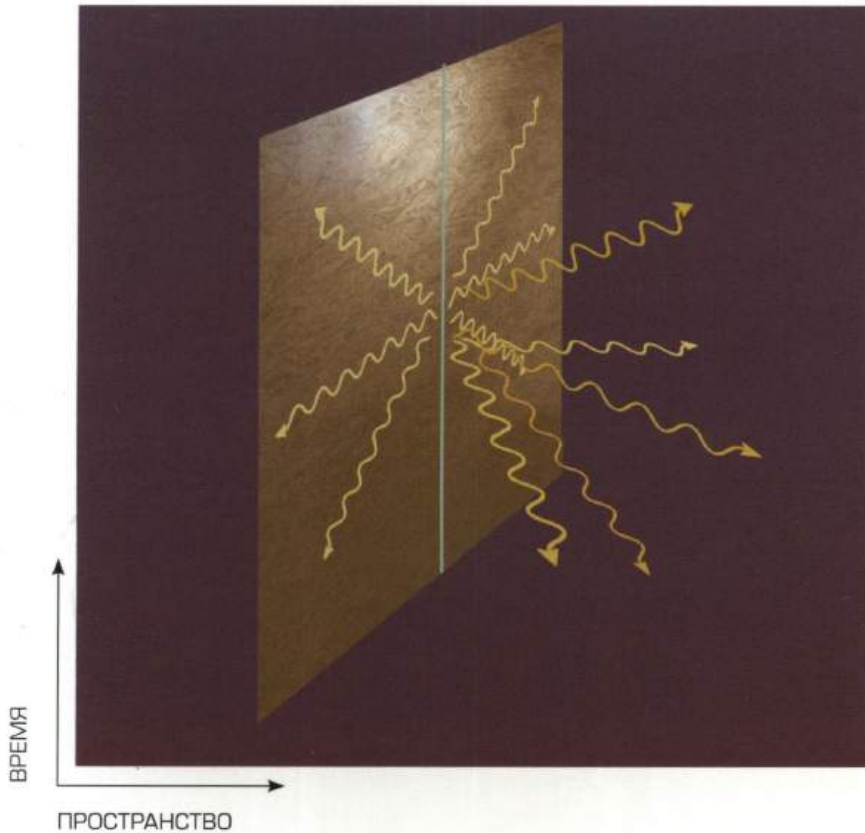
Рис. 7.7. МИРЫ НА БРАНЕ

Электрическое взаимодействие заключено в бране и слабеет с расстоянием ровно с такой скоростью, чтобы у электронов были стабильные орбиты вокруг атомных ядер.

плоским. С другой стороны, если заглянуть в очень маленькие масштабы при помощи крайне высокоэнергичных частиц, станет видно, что пространство-время обладает десятью или одиннадцатью измерениями.

Если все дополнительные измерения очень малы, наблюдать их будет очень трудно. Однако недавно появилось предположение, что некоторые дополнительные измерения, вероятно, довольно велики и даже бесконечны. С точки зрения позитивиста вроде меня у этой гипотезы есть большое преимущество: ее удастся проверить на ускорителях следующего поколения или при помощи высокоточных измерений гравитационных сил на малых расстояниях. Подобные наблюдения либо опровергнут эту гипотезу, либо экспериментально подтвердят наличие других измерений.

Большие дополнительные измерения — это очень интересная находка на пути поиска окончательной модели или теории всего. Если



они есть, значит, мы живем в мире на бране — на четырехмерной поверхности (бране) пространства-времени, у которого измерений еще больше. В бране сосредоточены вещество и негравитационные силы, например электричество. Таким образом, все, что не имеет отношения к гравитации, ведет себя так, словно измерений всего четыре. В частности, электрическое взаимодействие ядра атома и вращающихся вокруг него электронов слабеет с расстоянием именно в таком темпе, чтобы атомы были стабильны и электроны не падали бы на ядро (рис. 7.7).

Это соответствовало бы антропному принципу, согласно которому Вселенная должна создавать все условия для разумной жизни: если бы атомы не были стабильны, нас бы не было и некому было бы наблюдать Вселенную и спрашивать, почему она на вид четырехмерная.

С другой стороны, гравитация в виде искривления пространства пронизывает все многомерное пространство-время. Это означает,

Рис. 7.8

Гравитация действует не только в пределах браны, но распространяется на все дополнительные измерения и слабеет с расстоянием быстрее, чем в случае, если бы измерений было всего четыре.

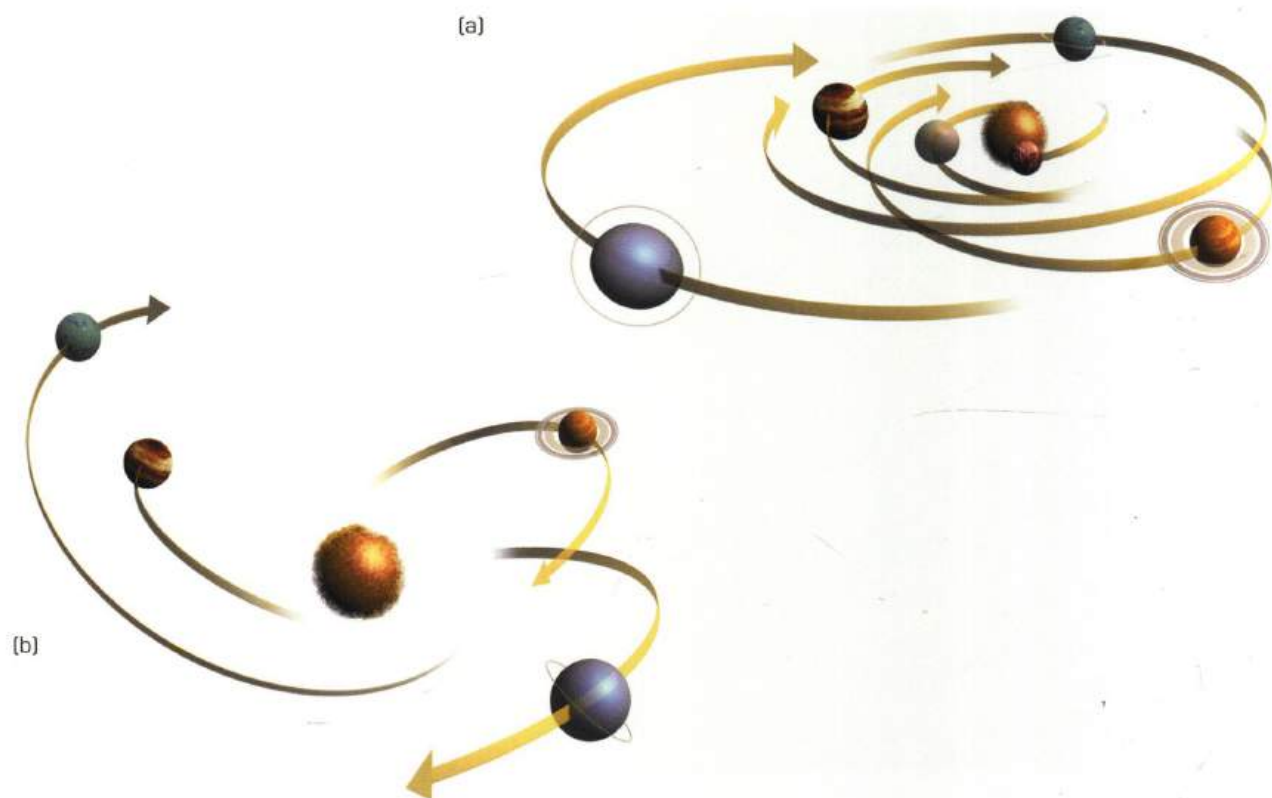


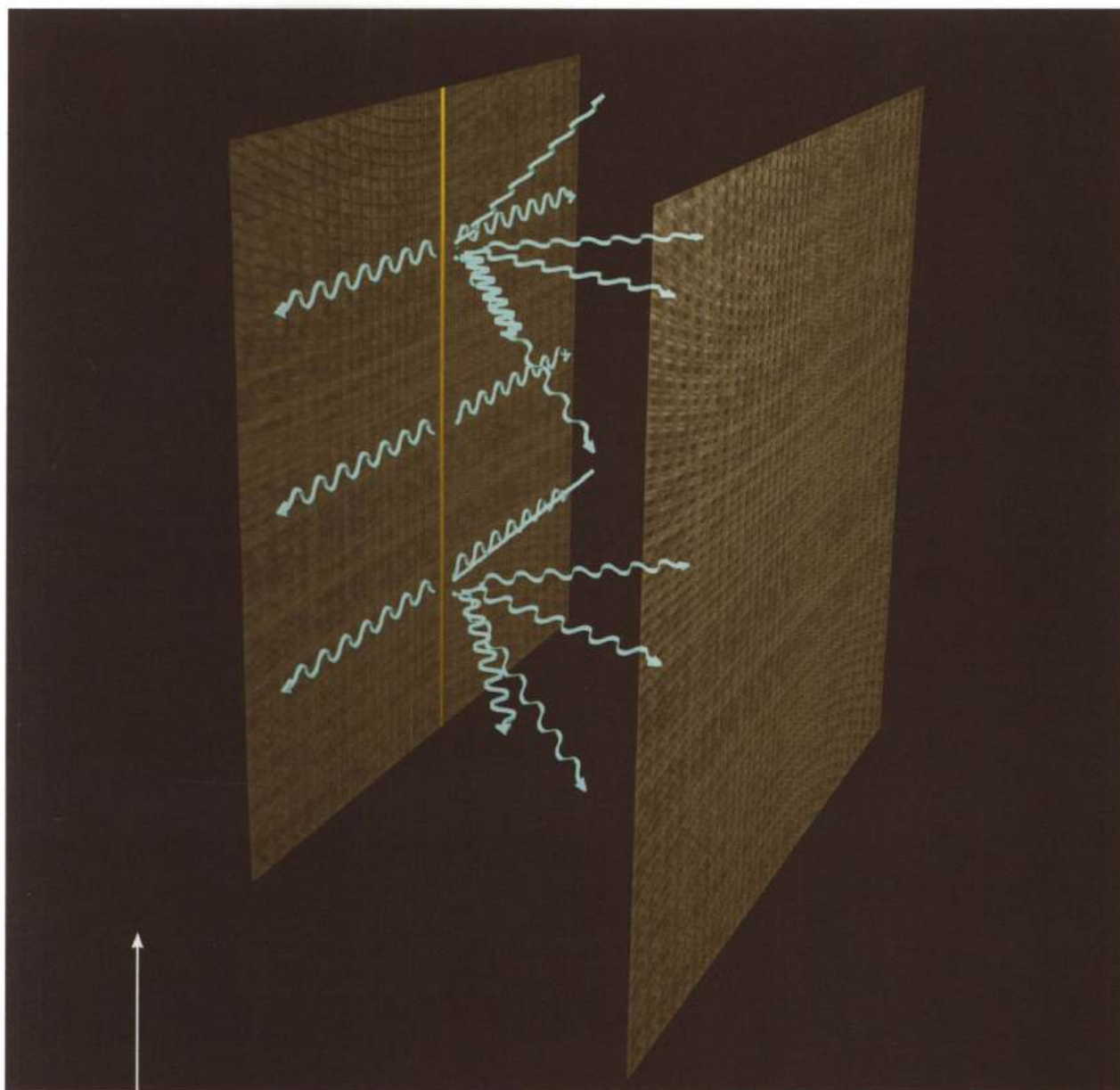
Рис. 7.9

Если бы гравитационная сила на больших расстояниях быстро слабела, это привело бы к нестабильности планетных орбит. Тогда планеты либо падали бы на Солнце (а), либо вырывались из его гравитационных уз (б).

что в рамках этой модели гравитация ведет себя иначе, чем остальные силы, с которыми мы сталкиваемся: поскольку она распространяется в дополнительные измерения, то слабеет с расстоянием быстрее, чем можно было бы ожидать (рис. 7.8).

Если бы это явление — ослабевание гравитации с расстоянием в ускоренном темпе — наблюдалось и на расстояниях, доступных современной астрономии, мы бы заметили его влияние на орбиты планет. Эти орбиты были бы попросту нестабильны, о чем упоминалось в главе 3: планеты либо падали бы на Солнце, либо улетали в холод и мрак межзвездного пространства (рис. 7.9).

Однако этого не произойдет, если дополнительные измерения кончаются на другой бране, находящейся неподалеку от браны, где мы живем. Тогда для расстояний больше, чем дистанция между этими бранами, гравитация не сможет распространяться свободно, а, в сущности, будет заключена в пределах одной браны, подобно элек-



Дополнительные измерения

Рис. 7.10

Если бы рядом с нашей браной находилась вторая брана, она не позволила бы гравитации распространиться далеко в дополнительные измерения, и это означало бы, что на расстояниях больше, чем дистанция между бранами, гравитация ослабевала бы со скоростью, ожидаемой для четырех измерений.

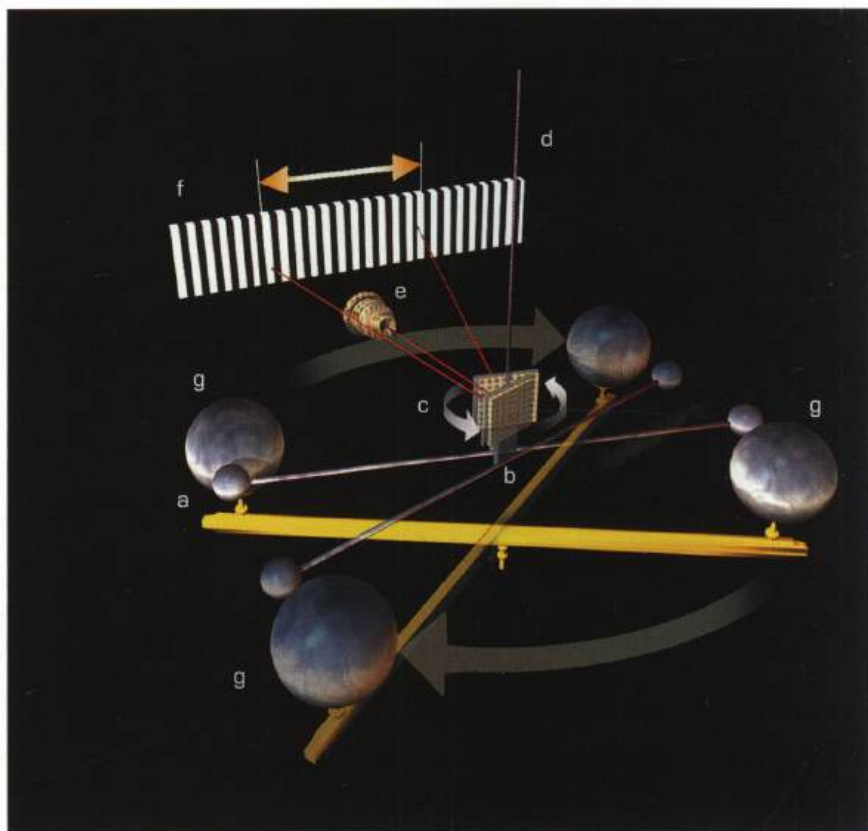


Рис. 7.11
ОПЫТ КАВЕНДИША
(В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ)

Лазерный луч (е), спроецированный на калиброванный экран (f), регистрирует любой поворот коромысла (b). К коромыслу с зеркальцем (c) присоединены два маленьких свинцовых шарика (a), и все это подвешено на гибкой нити (d). Два больших свинцовых шара (g) помещены рядом с маленькими на вращающейся штанге. Когда большие свинцовые шары на штанге вращаются и принимают положение, противоположное начальному, коромысло колеблется, а затем также принимает новое положение.

трическим силам, и будет ослабевать с расстоянием как раз настолько, чтобы обеспечивать стабильность планетных орбит (рис. 7.10).

С другой стороны, если расстояние меньше, чем дистанция между бранами, гравитация может меняться быстрее. Очень маленькие гравитационные силы между тяжелыми телами были точно измерены в лаборатории, однако пока эксперименты не выявили воздействия бран, разнесенных меньше, чем на несколько миллиметров. Сейчас продельваются новые измерения на еще более коротких дистанциях (рис. 7.11).

В этом мире на бране мы, возможно, живем на одной бране, но поблизости есть другая — «теневая» брана. Поскольку свет заключен в бранах и не распространяется в пространстве между ними, этот теневой мир мы не видим, однако ощущаем гравитационное воздействие вещества из теневой браны. С точки зрения наблюдателя из нашей браны кажется, будто эти гравитационные силы исходят



Рис. 7.12

Согласно сценарию мира на бране, планеты вращаются вокруг темной массы, находящейся на теневой бране, поскольку гравитационная сила распространяется в дополнительные измерения.

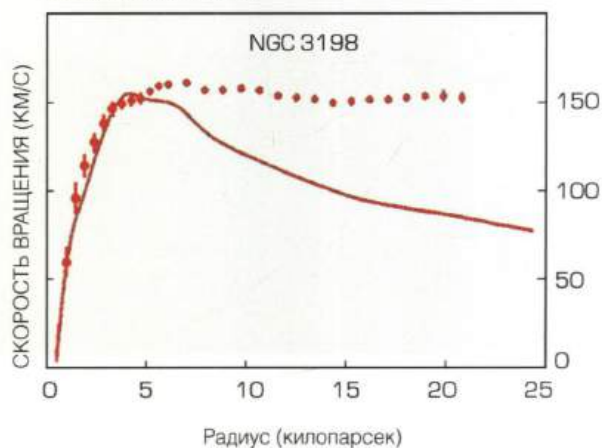


СВИДЕТЕЛЬСТВА СУЩЕСТВОВАНИЯ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

Различные наблюдения однозначно указывают, что в нашей Галактике и в других наблюдаемых галактиках содержится гораздо больше вещества, чем мы видим впрямую. Самое убедительное доказательство существования темного вещества — то, что звезды на краях спиральных галактик вроде нашего Млечного Пути вращаются так быстро, что одно только гравитационное притяжение всех наблюдаемых звезд не смогло бы удерживать их на орбитах (см. с. 195). С семидесятых годов XX века мы знаем, что наблюдаемые скорости вращения звезд во внешних областях спиральных галактик (на графике отмечены точками) не соответствуют орбитальным скоростям, которые обеспечивали бы законы Ньютона, исходя из распределения видимых звезд в Галактике (на графике отмечены сплошной кривой). А следовательно, во внешних областях спиральных галактик должно быть гораздо больше вещества.

КРИВАЯ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНОЙ ГАЛАКТИКИ NGC 3198

Albada & Sancisi 1986



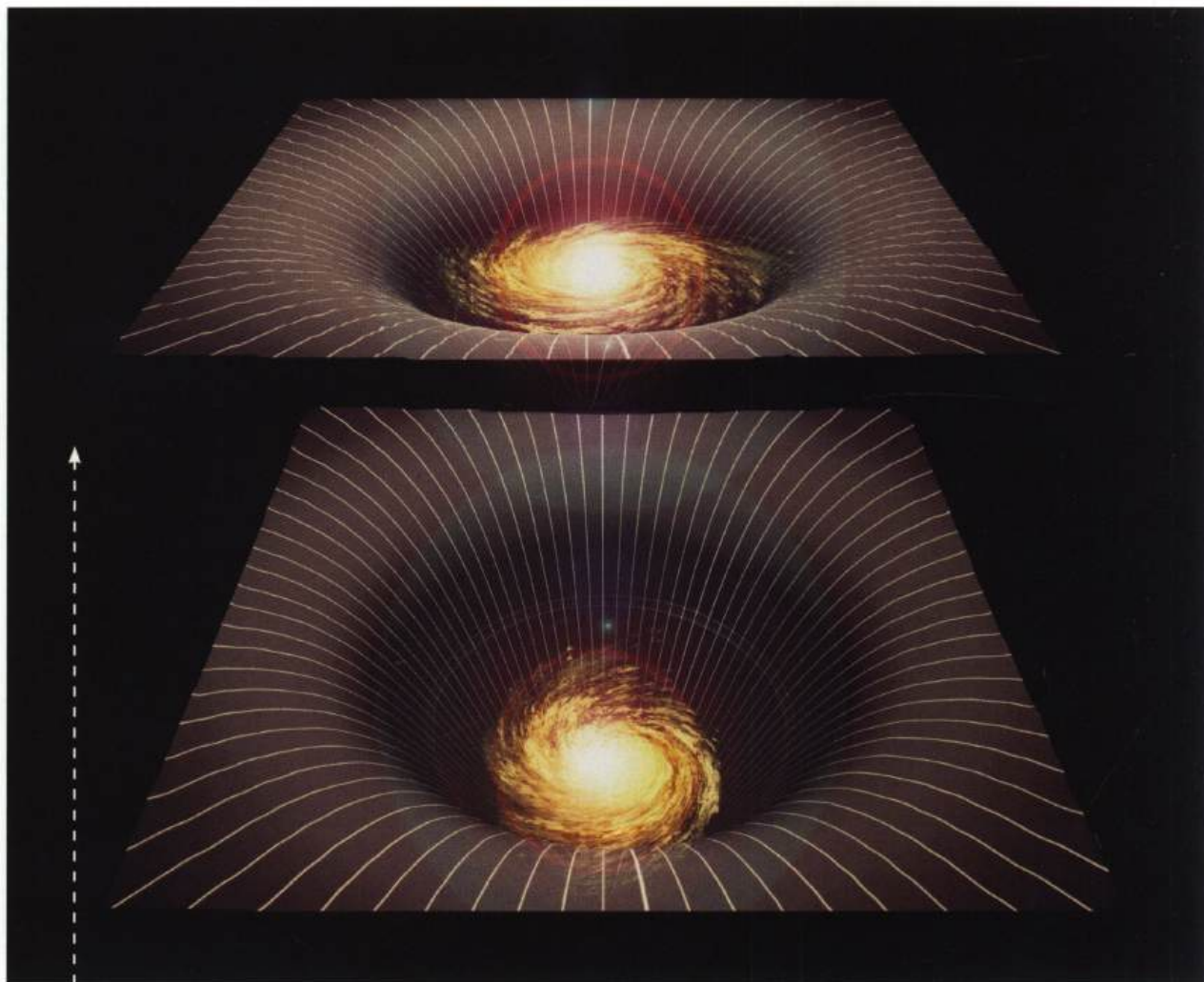


ПРИРОДА ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

В наши дни космологи считают, что центральные области спиральных галактик состоят в основном из обычных звезд, однако во внешних областях преобладает темное вещество, которое мы не можем наблюдать непосредственно. Поэтому одной из основных задач современной физики остается вопрос о природе той разновидности темного вещества, которая преобладает во внешних областях галактик. До восьмидесятых годов XX века в целом предполагалось, что темное вещество — это обычное вещество, состоящее из протонов, нейтронов и электронов, просто в каком-то другом виде, который не так просто обнаружить, скажем, в виде облаков газа или МАСНО (*massive compact halo objects*, массивных и компактных объектов в гало,

вроде белых карликов, нейтронных звезд или даже черных дыр).

Однако последние исследования процессов формирования галактик натолкнули космологов на мысль, что существенная доля темного вещества не имеет ничего общего с обычным веществом. Возможно, оно состоит из очень легких элементарных частиц, например аксионов и нейтрино, или даже из экзотических разновидностей частиц вроде так называемых вимпов (*WIMP, weakly interacting massive particles*) — гипотетических слабо взаимодействующих массивных частиц, о возможном существовании которых говорят современные теории элементарных частиц, однако зарегистрировать их экспериментально пока не удалось.



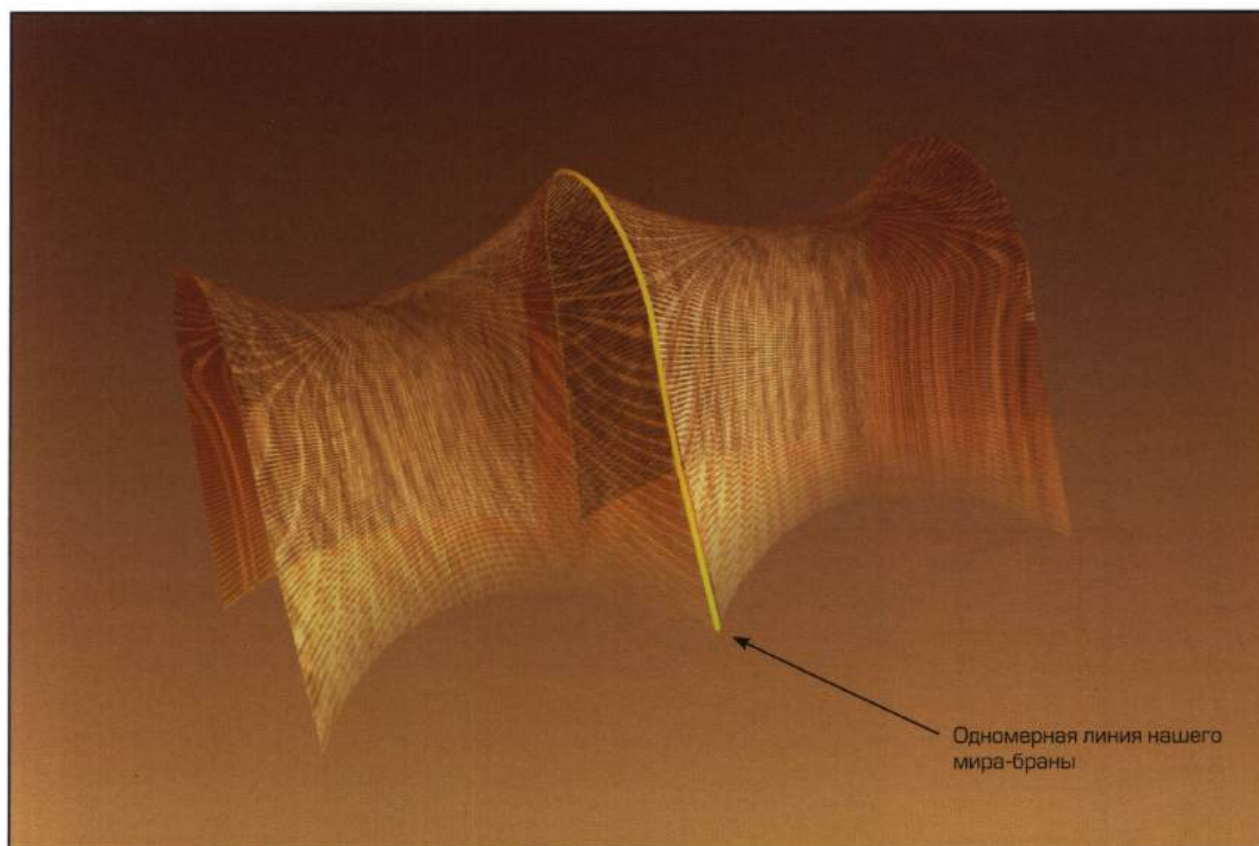
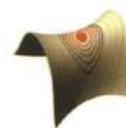
Ничейная территория дополнительных измерений между бранами.

Рис. 7.13

Мы не видим теньюю галактику на теневой бране, поскольку свет не распространяется через дополнительные измерения. Однако гравитация через них распространяется, поэтому темное вещество — вещество, которого мы не видим — влияет на вращение нашей Галактики.

из чего-то подлинно «темного» в том смысле, что единственный способ его обнаружить — это зарегистрировать его гравитацию (рис. 7.12). И в самом деле, чтобы объяснить, почему звезды вращаются вокруг центра нашей Галактики именно с такой скоростью, приходится предположить, что массы там больше, чем может дать в совокупности все вещество, которое мы наблюдаем.

Возможно, что недостающую массу обеспечивают экзотические виды частиц из нашего мира, например вимпы (слабовзаимодейству-



ющие массивные частицы) или аксионы (очень легкие элементарные частицы). Однако не исключено, что недостающая масса — свидетельство существования теневого мира, в котором есть вещество. Возможно, там есть и теньевые люди, недоумевающие, почему в их мире не хватает массы, чтобы обеспечить вращение их теневых звезд вокруг центра теневой галактики (рис. 7.13).

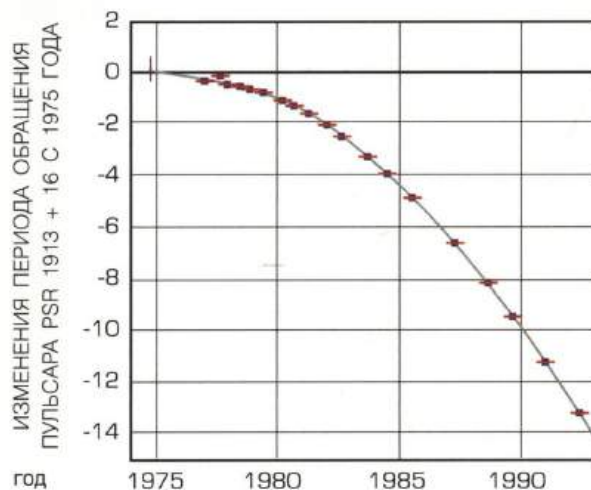
Но есть и другой вариант, помимо того, что дополнительные измерения кончаются на второй бране: возможно, они бесконечны, но сильно искривлены, будто седло (рис. 7.14). Лиза Рэндалл и Раман Сундрум показали, что подобная кривизна способна играть ту же роль, что и вторая брана: гравитационное воздействие объекта на бране ограничено ближайшими окрестностями браны и не распространяется в бесконечность в дополнительные измерения. Как и в модели теневой браны, гравитационное поле

Рис. 7.14

Согласно модели Рэндалл — Сундрума брана только одна (показана здесь только в одном измерении). Дополнительные измерения тянутся в бесконечность, однако выгнуты, будто седло. Этот изгиб не позволяет гравитационному полю вещества на бране распространяться далеко в дополнительные измерения.



Две компактные нейтронные звезды, которые падают друг на друга по спирали



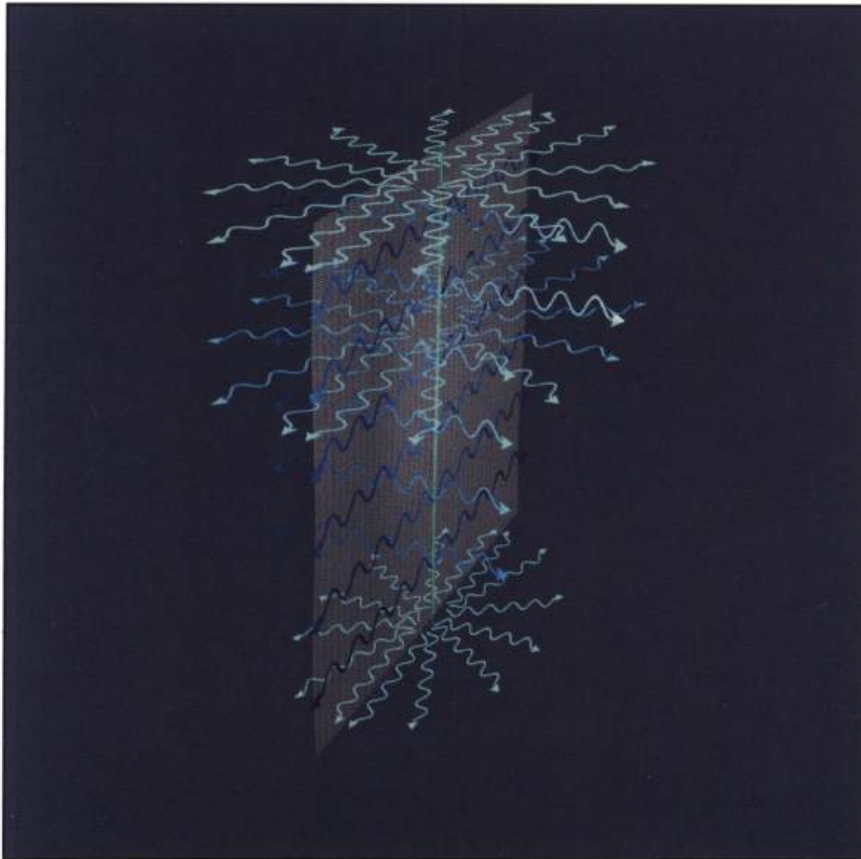
Эволюция двойного пульсара PSR 1913+16 с 1975 года

ДВОЙНЫЕ ПУЛЬСАРЫ

Согласно общей теории относительности, тяжелые тела, движущиеся под воздействием гравитации, испускают гравитационные волны. Гравитационные волны, подобно световым, уменьшают энергию объекта, который их испускает. Однако темп потери энергии обычно крайне низок, поэтому его очень трудно зарегистрировать. Например, излучение гравитационных волн заставляет Землю медленно двигаться по спирали к Солнцу, но столкнутся они лишь через 10^{27} лет!

Однако в 1975 году Рассел Халс и Джозеф Тейлор открыли двойной пульсар PSR1913+16 — систему, состоящую из двух компактных нейтронных звезд, которые вра-

щаются по орбите друг вокруг друга на максимальном расстоянии всего в один радиус Солнца. Согласно общей теории относительности, такое быстрое движение означает, что период обращения этой системы должен уменьшаться гораздо быстрее, поскольку она излучает сильные гравитационные волны. Халс и Тейлор тщательно измерили орбитальные параметры системы, и оказалось, что с 1975 года период обращения сократился более чем на 10 секунд, что полностью соответствует общей теории относительности. В 1993 году Халс и Тейлор получили Нобелевскую премию по физике за подтверждение общей теории относительности.



ослабевает с расстоянием именно в том темпе, который объясняет и стабильность планетных орбит, и лабораторные измерения гравитационной силы, однако на ближних расстояниях гравитация будет меняться быстрее.

Однако у модели Рэндалл — Сундрума есть и существенное отличие от модели теневой браны. Тела, движущиеся под воздействием гравитации, порождают гравитационные волны — рябь на кривизне, которая распространяется в пространстве-времени со скоростью света. Гравитационные волны, подобно световым, уносят энергию, и эту гипотезу подтвердили наблюдения двойного пульсара PSR 1913+16.

Если мы и в самом деле живем на бране в пространстве-времени с дополнительными измерениями, гравитационные волны, генерируемые движением тел на бране, расходились бы и в другие

Рис. 7.15

Согласно модели Рэндалл–Сандрама, короткие гравитационные волны способны уносить энергию из источников на бране, что на первый взгляд нарушает закон сохранения энергии.

измерения. Если существует вторая теневая брана, гравитационные волны должны отражаться обратно и застревать между этими двумя бранами. С другой стороны, если есть только одна брана, а дополнительные измерения расходятся в бесконечность, согласно модели Рэндалл — Сундрума, гравитационные волны способны покидать нашу мировую брану навсегда и уносить из нее энергию (рис. 7.15).

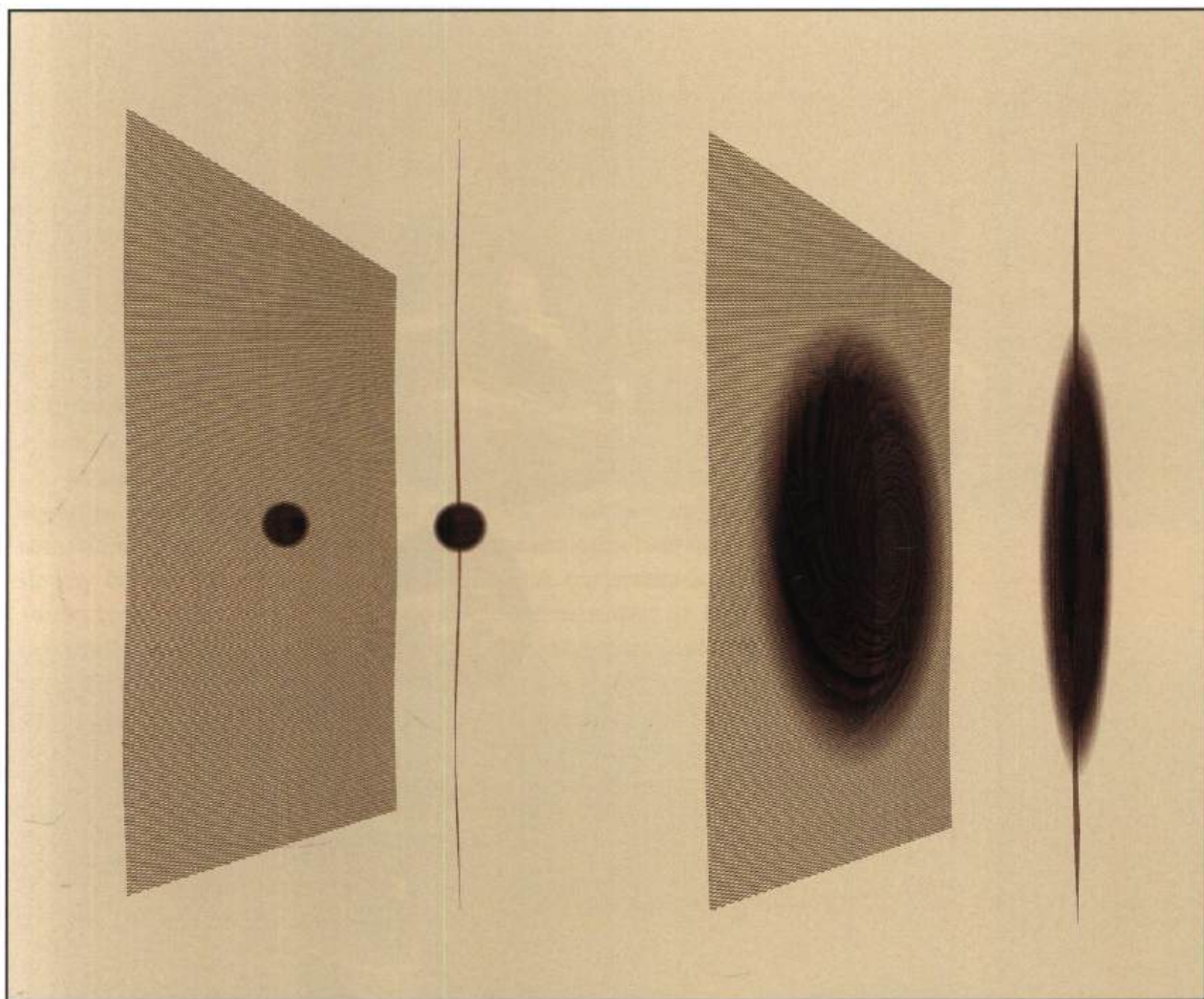
Казалось бы, это нарушает один из фундаментальных принципов физики — закон сохранения энергии. Общее количество энергии всегда постоянно. Однако, похоже, закон нарушается лишь с нашей точки зрения, поскольку мы ограничены нашей браной. Какой-нибудь ангел, способный видеть другие измерения, знал бы, что полная энергия остается прежней, просто она распространяется в пространстве.

Гравитационные волны, испускаемые двумя звездами, которые вращаются по орбите друг вокруг друга, должны иметь длину волны гораздо больше радиуса седловидной кривизны других измерений. Значит, они сосредоточены неподалеку от браны, подобно гравитационной силе, и, в сущности, не могут ни распространяться в другие измерения, ни уносить энергию из браны. С другой стороны, если гравитационные волны короче кривизны дополнительных измерений, им легко ускользать из окрестностей браны.

Источниками значительного количества коротких гравитационных волн могут служить только черные дыры. Черная дыра на бране распространяется и в дополнительные измерения. Если черная дыра мала, ее форма приближается к шарообразной, то есть она расходится в дополнительные измерения на расстояние, примерно равное ее размеру на бране. С другой стороны, крупная черная дыра на бране распространяется в виде «черного блина», ограниченного окрестностями браны. Его толщина (в дополнительных измерениях) гораздо меньше ширины (на бране) (рис. 7.16).

Как рассказано в главе 4, из квантовой теории следует, что черные дыры не совсем черные, они испускают различные частицы и излучение, как нагретые тела. Частицы и излучение, например свет, будут расходиться по бране, поскольку вещество и негравитационные силы наподобие электричества заключены в ней.

Однако черные дыры испускают еще и гравитационные волны. Гравитация не ограничена браной, а расходится и в дополнительные измерения. Если черная дыра большая и похожа на блин, гравитационные волны останутся поблизости от браны. Тогда черная дыра бу-



лет терять энергию (а следовательно, и массу, согласно $E = mc^2$) в темпе, которого можно ожидать от черной дыры в четырехмерном пространстве-времени. Поэтому черная дыра будет медленно испаряться и сокращаться в размерах, пока не станет меньше радиуса кривизны седловидных дополнительных измерений. В этот момент гравитационные волны, испускаемые черной дырой, начнут свободно распространяться в дополнительные измерения. А наблюдатель на бране увидит черную дыру, или темную звезду, по выражению Мичелла (см. главу 4), как объект, испускающий темное излучение — излучение,

Рис. 7.16

Черная дыра в нашем мире на бране должна распространяться в другие измерения. Если черная дыра мала, она будет почти круглой, однако большая черная дыра на бране распространится в дополнительные измерения в виде «черного блина».



Рис. 7.17. Мир-брана возникает подобно пузырьку пара в кипящей воде.



которое невозможно наблюдать непосредственно из браны, однако оно существует, поскольку черная дыра теряет массу.

Из этого следует, что когда черная дыра окончательно испарится, последний выброс излучения из нее покажется слабее, чем он есть на самом деле. Вероятно, именно поэтому мы до сих пор не наблюдали гамма-всплесков, которые можно было бы списать на умирающие черные дыры. Впрочем, есть и другое, более прозаическое объяснение: Вселенная еще молода, и в ней не очень много черных дыр с такой маленькой массой, что они готовы испариться.

Излучение из черных дыр в мире на бране объясняется квантовыми флуктуациями частиц с браны и на брану, однако браны, как и все остальное во Вселенной, и сами подвержены квантовым флуктуациям. Из-за них браны иногда спонтанно возникают и исчезают. Квантовое возникновение браны, вероятно, напоминает образование пузырьков пара в кипящей воде. Жидкая вода состоит из миллиардов молекул H_2O , которые удерживаются благодаря связям между ближайшими соседками. Когда вода нагревается, молекулы движутся все быстрее и быстрее и отскакивают друг от друга. Иногда при столкновении молекулы приобретают настолько высокую скорость, что группами разрывают связи и формируют пузырек пара, окруженный водой. Затем пузырек или растет, или уменьшается случайным образом: или к пару присоединяются новые молекулы, или наоборот. Большинство мелких пузырьков пара снова превратятся в жидкость, однако некоторым удастся дорасти до какого-то критического размера, после которого пузырьки уже практически точно будут расти. Именно такие крупные пузыри мы и наблюдаем при кипении воды (рис. 7.17).

Миры на бранах должны вести себя примерно так же. Согласно принципу неопределенности, мировые браны способны возникать из ничего в виде

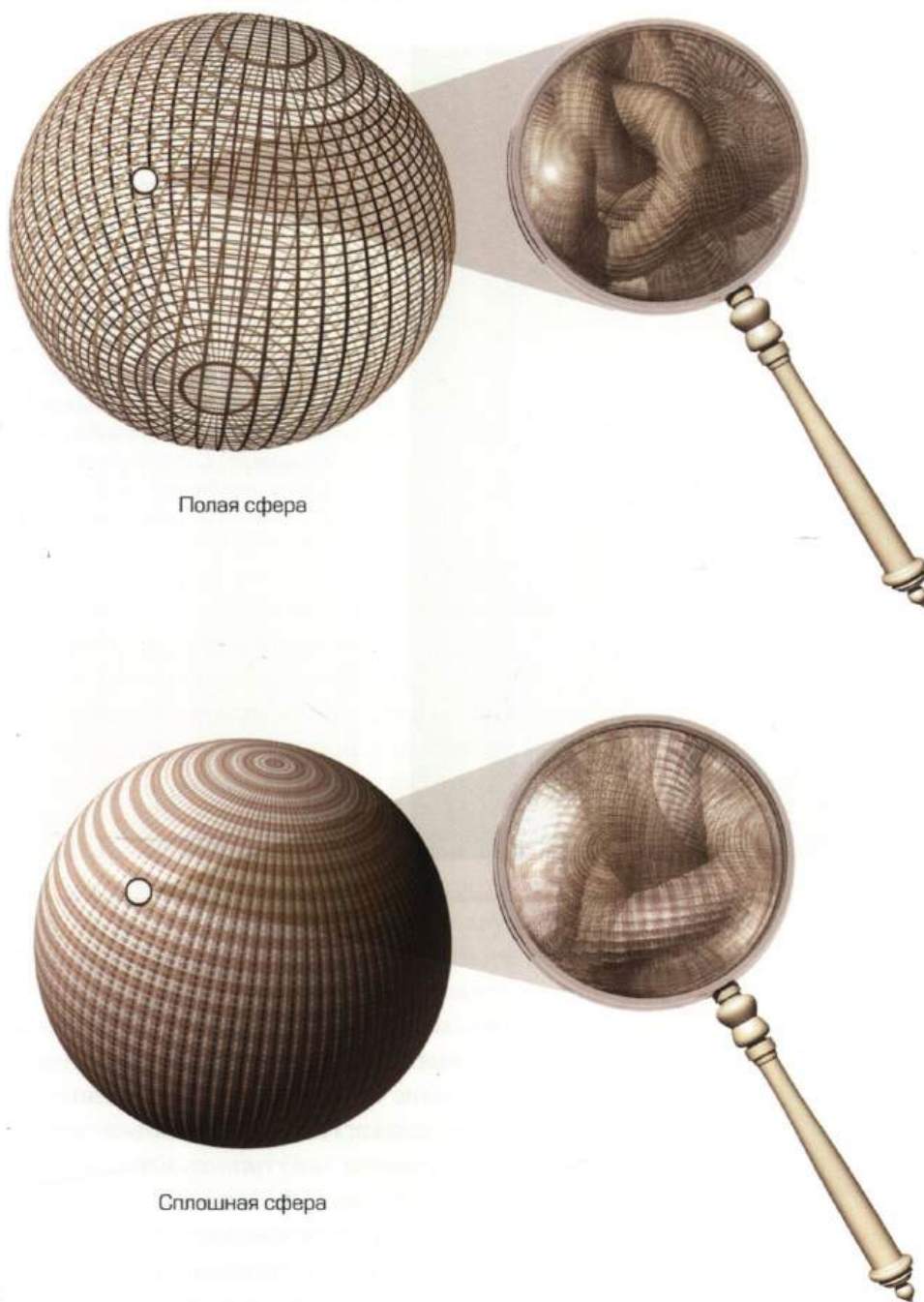




пузырей, причем брана — это поверхность пузыря, а его внутренняя часть — это пространство дополнительных измерений. Очень маленькие пузыри схлопываются и исчезают, однако если пузырь в результате квантовых флуктуаций дорос до определенного критического размера, он, скорее всего, продолжит расти. Люди (вроде нас), живущие на бране, поверхности пузыря, считают, что Вселенная расширяется. Это как нарисовать галактики на воздушном шарике, а потом его надуть. Галактики будут расходиться, однако ни одна из них не может считаться центром расширения. Остается надеяться, что не найдется никого с космической булавкой, способной проколоть наш пузырь.

Согласно гипотезе об отсутствии границ, описанной в главе 3, спонтанное возникновение мира-браны должно обладать историей в мнимом времени, похожей на орех, то есть представлять собой четырехмерную сферу вроде поверхности Земли, но с двумя дополнительными измерениями. Главная разница в том, что скорлупка из главы 3, в сущности, пустая внутри: четырехмерная сфера не может быть ничьей границей, а остальные шесть или семь измерений пространства-времени, о которых говорит М-теория, будут свернуты до размеров даже меньше ореховой скорлупки. Однако согласно модели мира-браны орешек заполнен: история браны, на которой мы живем, в мнимом времени представляет собой четырехмерную сферу, которая служит границей пятимерного пузыря, а оставшиеся пять-шесть измерений свернуты и очень малы (рис. 7.18).

История браны в мнимом времени определяет ее историю в реальном времени, где брана расширяется с ускорением по инфляционной модели, описанной в главе 3. Самая вероятная история пузыря в мнимом времени — идеальная гладкая сфера-скорлупка. Однако она соответствовала бы бране, которая в реальном времени расширяется бесконечно по инфляционной модели. На такой бране не образовались бы галактики, а значит, не возникла бы разумная жизнь. С другой стороны, не совсем гладкие и круглые истории в мнимом времени несколько менее вероятны, зато соответствуют такому сценарию в реальном времени, когда брана сначала проходит фазу инфляционного расширения с ускорением, а потом замедляется. В результате этого расширения с последующим замедлением могли бы образоваться галактики и зародиться разумная жизнь. Таким образом, согласно антропному принципу, описанному в главе 3, орешек должен быть слегка волосатым —

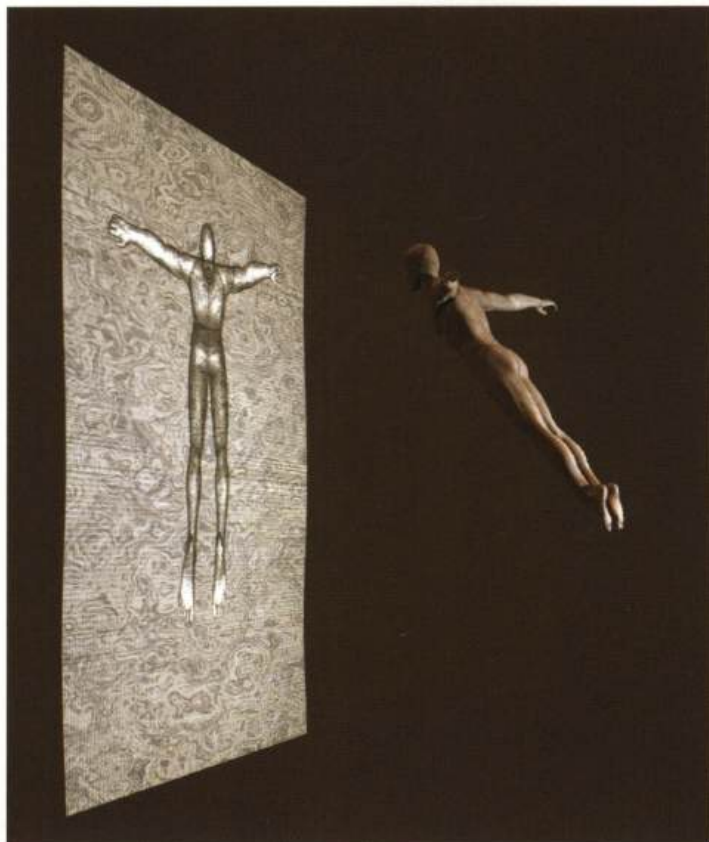


Полая сфера

Сплошная сфера

Рис. 7.18

Картина зарождения Вселенной как мира на бране отличается от картины, описанной в главе 3, поскольку слегка приплюснутая четырехмерная сфера — ореховая скорлупка — уже не полая: она заполнена пятым измерением.



ГОЛОГРАФИЯ

Голография кодирует информацию об области пространства на поверхности, имеющей на одно измерение меньше. Похоже, это свойство гравитации, о чем говорит то, что площадь горизонта событий черной дыры служит мерой количества ее внутренних состояний. Согласно модели мира на бране, голография — это однозначное соответствие между состояниями нашего четырехмерного мира и состояниями в более высоких измерениях. С позитивистской точки зрения невозможно сказать, которое из описаний более фундаментально.



лишь тогда его пронаблюдает разумные существа, которые зададутся вопросом, почему происхождение Вселенной прошло не вполне гладко.

При расширении браны объем многомерного пространства внутри пузыря увеличивается.

В конце концов именно так, должно быть, и возник огромный пузырь, оболочкой которого служит брана, на которой мы живем.

Но в самом ли деле мы живем на бране? Согласно голографической гипотезе, о которой рассказано в главе 2, информация обо всем происхо-



дящем в той или иной области пространства-времени может содержаться на границе этой области. Поэтому не исключено, что мы думаем, будто живем в четырехмерном мире, поскольку мы — всего лишь тени, которые отбрасывают на брану события внутри пузыря. Однако с позитивистской точки зрения нельзя спрашивать, что реально — брана или пузырь. И то и другое — математические модели, описывающие данные наблюдений. А мы вольны использовать ту модель, которая удобнее. Что же находится снаружи браны? Тут вариантов несколько (рис. 7.19):

1. Не исключено, что снаружи ничего нет. Хотя пузырек пара окружен водой, это просто аналогия, помогающая наглядно представить себе происхождение Вселенной. Вполне возможно построить математическую модель, в которой внутри браны будет пространство более высоких измерений, а снаружи не будет ничего, даже пустого пространства. Прогнозы, которые дает эта математическая модель, можно построить и без учета того, что находится снаружи браны.

2. Можно построить математическую модель, в которой внешняя сторона пузыря приклеена к внешней стороне другого такого же пузыря. На самом деле такая модель математически эквивалентна пункту первому — снаружи браны нет ничего. Разница чисто психологическая: приятнее думать, что сидишь в центре пространства-времени, а не на его краю. Однако в глазах позитивиста пункты первый и второй одинаковы.

3. Возможно, пузырь расширяется в пространство, которое не представляет собой зеркального отражения того, что находится внутри пузыря. Этот вариант отличается от двух вышеописанных и больше похож на кипящую воду. Вокруг образуются и расширяются другие пузыри. Если они столкнутся и сольются с пузырем, в котором мы живем, последствия могут быть катастрофическими. Можно даже предположить, что Большой взрыв как таковой был результатом столкновения двух бран.

В наши дни подобные модели мира на бране — очень популярная тема научных исследований. Они очень спекулятивны, зато дают обильную почву для экспериментальной проверки. Они могут объяснить, почему гравитация представляется такой слабой. На самом деле, согласно фундаментальной теории, гравитация, вероятно, очень сильна, но поскольку гравитационная сила распространяется в дополнительные измерения, она вполне может оказаться слабой на далеких расстояниях на бране, где мы живем.

Рис. 7.19



1. Брана/пузырь: внутри — пространство более высоких измерений, снаружи — ничего.



2. Вероятность, что внешняя сторона браны/пузыря склеена с внешней стороной другого пузыря.



3. Брана-пузырь расширяется в пространство, не представляющее собой зеркального отражения внутреннейности пузыря. Согласно такому сценарию, могут возникать и расширяться и другие пузыри.

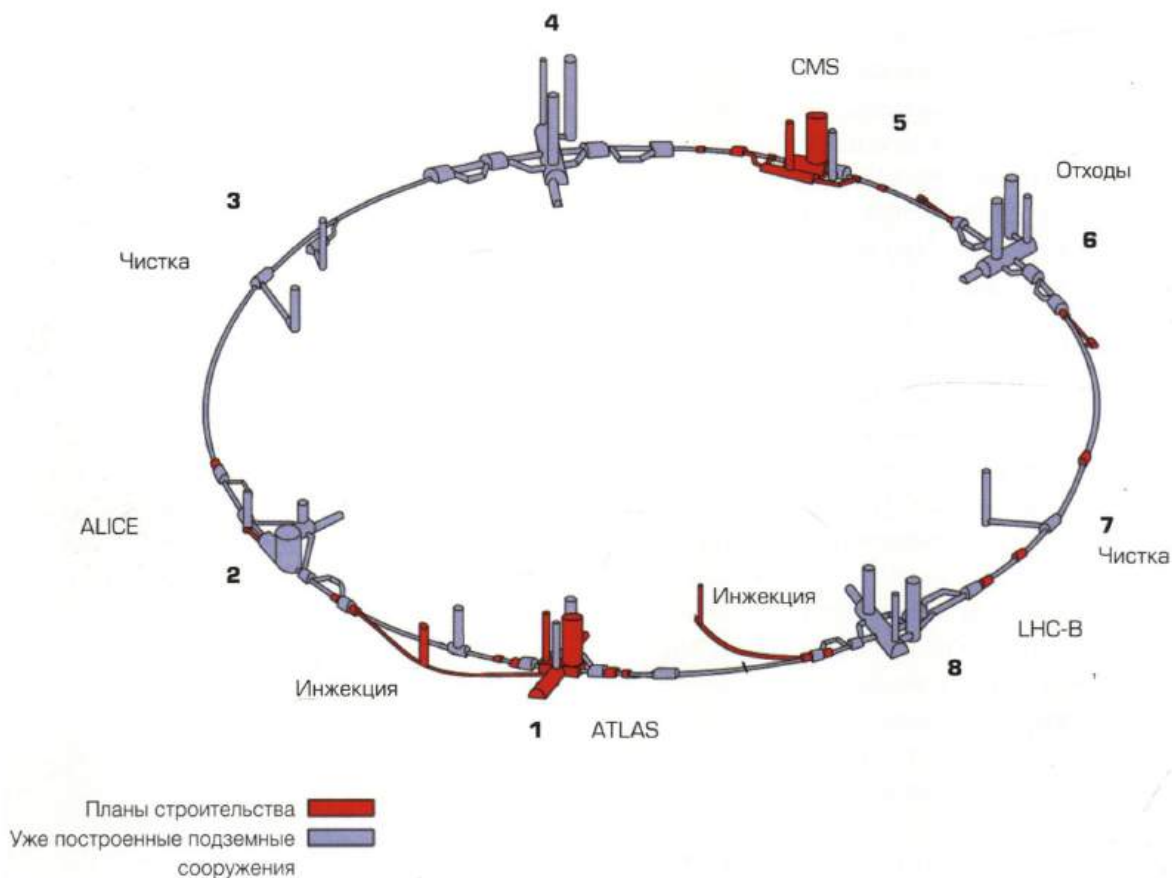
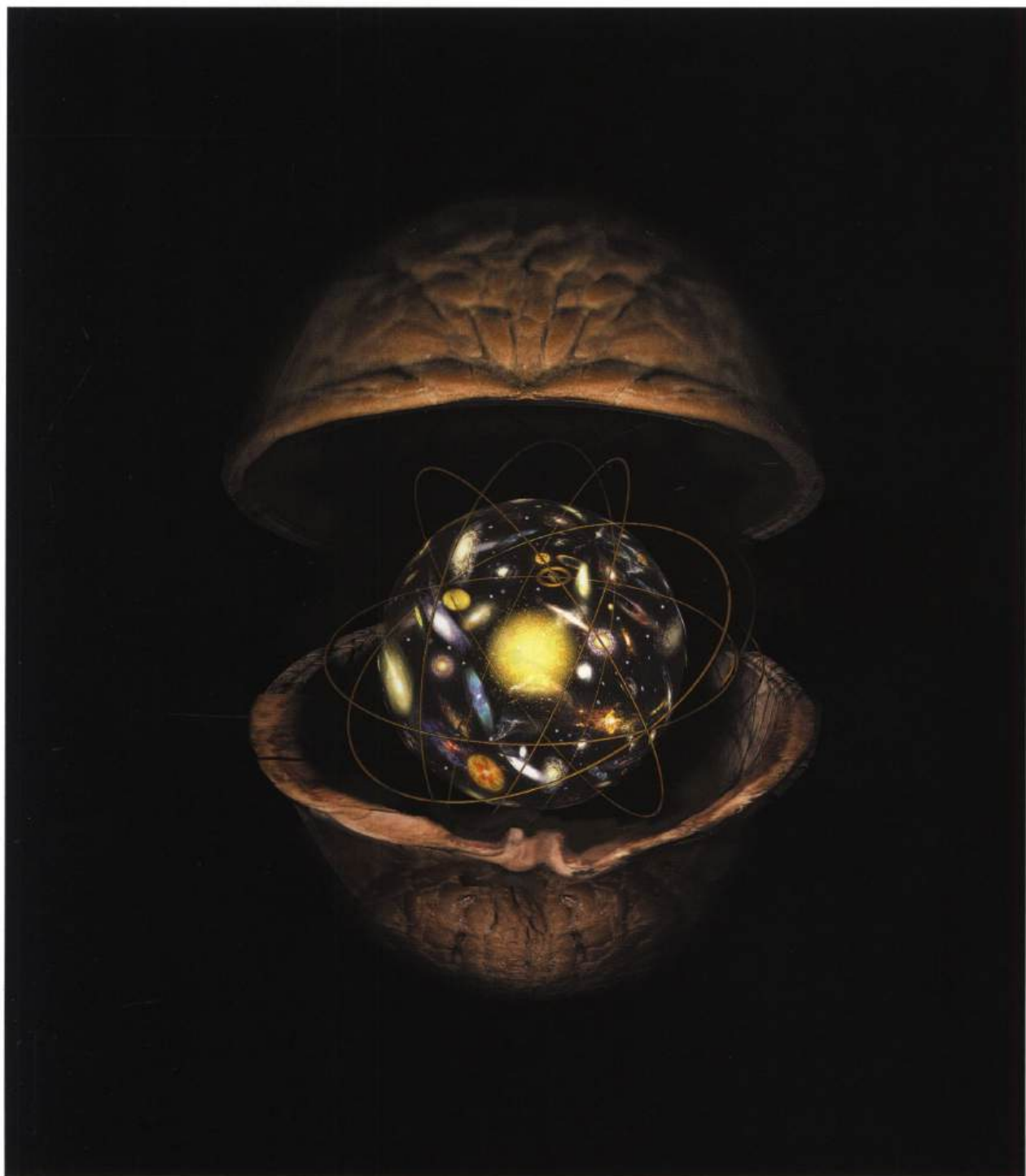


Рис. 7.20

Схема туннеля Большого электрон-позитронного коллайдера, на которой наглядно показана уже созданная инфраструктура и планы строительства Большого адронного коллайдера в Женеве.

Из этого следует, что планковская длина — минимальное расстояние, с которым мы можем работать, не создавая черную дыру, — гораздо больше, чем следует из слабости гравитации на нашей четырехмерной бране. Возможно, самая маленькая матрешечка не так уж и мала и ускорители частиц в будущем смогут ее исследовать. Более того, не исключено, что мы уже нашли бы самую маленькую матрешку — фундаментальную планковскую длину, — если бы в 1994 году правительство США в припадке экономии не остановило бы на полдороге строительство Сверхпроводящего суперколлайдера. Однако строятся и другие ускорители, в том числе Большой адронный коллайдер в Женеве (рис. 7.20). С их помощью и с учетом данных других наблюдений, в том числе наблюдений космического фоновое микроволнового излучения, мы, возможно, сумеем

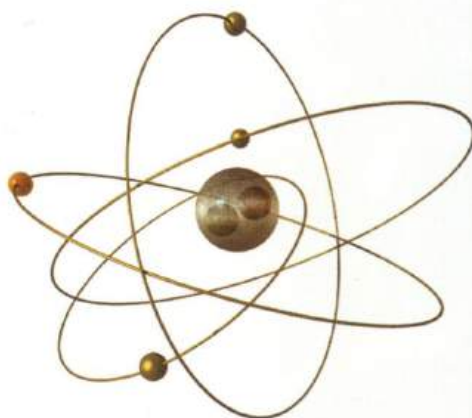




определить, действительно ли мы живем на бране¹. Если да, дело, вероятно, в том, что антропный принцип отбирает из обширного зоопарка вселенных, допустимых согласно М-теории, именно модели бран. А значит, мы вправе перефразировать слова Миранды из шекспировской «Бури»:

О чудо!
Какое множество прекрасных лиц!
Как род людской красив! И как хорош
Тот новый мир, где есть такие... браны!
(Пер. М. Донского).

Вот, собственно, и все о Вселенной — в двух словах.



¹ Несмотря на успешный запуск Большого адронного коллайдера и массивированные исследования космического фонового микроволнового излучения с помощью орбитальной обсерватории *Planck*, ответы на эти вопросы до сих пор не получены. — Прим. ред.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютное время. Предположение о существовании универсальных вселенских часов. Эйнштейновская теория относительности показала, что ничего подобного в природе не существует.

Абсолютный ноль. Минимальная возможная температура, при которой вещества уже не содержат тепловой энергии; составляет примерно -273 градуса по Цельсию или 0 по Кельвину.

Амплитуда. Максимальная высота пика волны или максимальная глубина ее низшей точки.

Античастица. У каждого вида частиц вещества есть соответствующая античастица. Когда частица сталкивается со своей античастицей, они аннигилируют, и остается только энергия.

Антропный принцип. Гипотеза, согласно которой мы видим Вселенную такой, какая она есть, поскольку, будь она иной, нас бы не было и некому было бы ее наблюдать.

Атом. Основная единица обычного вещества, состоящая из крошечного ядра (из протонов и нейтронов), вокруг которого по орбитам вращаются электроны.

Бесконечность. Безграничная или беспредельная протяженность либо число.

Бозон. Частица (или диаграмма вибрации струны) с целочисленным спином.

Большое сжатие. Условное название возможного сценария конца Вселенной, когда все пространство и вещество сжимается и образует сингулярность.

Большой взрыв. Сингулярность в момент начала Вселенной примерно 15 миллиардов лет назад.

Брана. Фундаментальный объект М-теории, имеющий некоторое количество пространственных измерений. В целом p -брана имеет длину в p -направлениях, 1-брана — это струна, 2-брана — поверхность или мембрана и т.д.

Вес. Сила воздействия гравитационного поля на тело. Пропорциональна, но не тождественна массе.

Виртуальная частица. В квантовой механике — частица, которую невозможно зарегистри-

стрировать непосредственно, однако ее существование оказывает воздействие, которое можно измерить. См. также **Эффект Казимира**.

Волновая функция. Фундаментальное понятие квантовой механики, число, заданное в каждой точке пространства, связанное с частицей и определяющее вероятность того, что частица обнаружится именно в этой точке.

Временная петля. Замкнутая времяподобная кривая траектория в пространстве-времени.

Второй закон термодинамики. Закон, гласящий, что энтропия всегда увеличивается и никогда не уменьшается.

Гипотеза отсутствия границ. Представление о том, что Вселенная конечна, но не имеет границ в мнимом времени.

Голая сингулярность. Сингулярность пространства-времени, не окруженная черной дырой и видимая далекому наблюдателю.

Голографическая теория. Представление о том, что полное квантовое состояние ограниченной области пространства-времени может быть закодировано на границе этого области.

Горизонт событий. Край черной дыры, граница области, откуда невозможно вырваться в бесконечность.

Гравитационная волна. Волнообразное возмущение гравитационного поля.

Гравитационное поле. Средство распространения воздействия гравитации.

Гравитация. Самое слабое из четырех фундаментальных взаимодействий в природе.

Граничные условия. Начальное состояние физической системы или, вообще говоря, состояние системы на какой-то границе пространства или времени.

Грассмановы числа. Класс чисел, которые не коммутируют. Когда перемножаешь обычные вещественные числа, неважно, в каком порядке это делать: $A \times B = C$ и $B \times A = C$. А грассмановы числа антикоммутируют: $A \times B$ — это то же самое, что $-B \times A$.

Длина волны. Расстояние между двумя соседними пиками или двумя соседними низшими точками волны.

ДНК. Дезоксирибонуклеиновая кислота, состоящая из фосфатной группы, сахара и четырех азотистых оснований — аденина, гуанина, тимина и цитозина. Две цепочки ДНК образуют двойную спираль, напоминающую винтовую лестницу. В ДНК зашифрована вся информация, которая нужна клеткам, чтобы самовоспроизводиться. Эта молекула играет важнейшую роль в наследственности.

Дуальность. Соответствие между разными на сторонний взгляд теориями, которые приводят к одним и тем же физическим результатам.

Единая теория. Теория, описывающая все четыре фундаментальных взаимодействия и все виды вещества в рамках единой системы. Она же называется Теория Всего.

Закон Мура. Закон, гласящий, что мощность компьютеров удваивается каждые полтора года. Само собой, так не может продолжаться вечно.

Закон сохранения энергии. Закон физики, гласящий, что энергию (или ее эквивалент в виде массы) нельзя ни уничтожить, ни создать.

Замедление времени. Следствие специальной теории относительности, которая предсказывает, что течение времени в движущейся или находящейся в сильном гравитационном поле системе с точки зрения неподвижного наблюдателя замедляется.

Замкнутая струна. Разновидность струны, имеющая форму петли.

Излучение. Энергия, передаваемая волнами или частицами в пространстве или какой-то иной среде.

Интерференция. Рисунок волн, возникающий при слиянии двух или нескольких волн, исходящих из разных мест или возникших в разное время.

Инфляция. Краткий период расширения с ускорением на очень ранней стадии существования Вселенной, когда она резко и многократно увеличилась в размерах.

Квант. Неделимое количество поглощаемых или испускаемых волн.

Квантовая гравитация. Теория, объединяющая квантовую механику с общей теорией относительности.

Квантовая механика. Физические законы, действующие на очень маленьких масштабах, то есть управляющие атомами, протонами и тому подобными частицами; основана на квантовом принципе Планка и принципе неопределенности Гейзенберга.

Квантово-волновой дуализм. Принцип квантовой механики, согласно которому нет никакой разницы между волной и частицей: частицы могут вести себя как волны и наоборот.

Квантовый принцип Планка. Гипотеза, согласно которой электромагнитные волны, например свет, могут испускаться и поглощаться только дискретными порциями, называемыми квантами.

Кварк. Заряженная элементарная частица, подверженная сильному взаимодействию. Кварки бывают шести «ароматов» — верхние, нижние, странные, очарованные, прелестные и истинные, — а каждый аромат бывает трех «цветов» — красного, зеленого или синего.

Классическая теория. Теория, основанная на понятиях, установленных до теории относительности и квантовой механики. Согласно классической теории можно точно определить и положение, и скорость любого объекта. Как показывает принцип неопределенности Гейзенберга, на очень маленьких масштабах классическая теория перестает действовать.

Космическая струна. Длинный и тяжелый объект с крошечным поперечным сечением, вероятно возникший на ранних стадиях суще-

ствования Вселенной. К нашему времени одна космическая струна может тянуться через всю Вселенную.

Космологическая константа. Математическое ухищрение, к которому прибег Эйнштейн, чтобы обеспечить Вселенной встроенную тенденцию расширяться, отчего общая теория относительности получила возможность описывать статическую Вселенную.

Космология. Наука о Вселенной в целом.

Красное смещение. Покраснение излучения, испускаемого объектом при движении от наблюдателя, вызванное эффектом Доплера.

Кротовая нора. Тонкая трубка пространства-времени, соединяющая отдаленные области Вселенной. Кротовые норы могут также соединять параллельные или карманные вселенные и теоретически могли бы обеспечивать возможность путешествий во времени.

Лоренцевское сжатие. Сжатие движущихся объектов вдоль направления движения, предсказанное специальной теорией относительности.

Магнитное поле. Поле, отвечающие за магнитные силы.

Микроскопический. Видный невооруженным глазом; в целом относится к размерам больше 0,01 мм. Размеры меньше этой величины называются микроскопическими.

Масса. Количество вещества в теле, а также его инерция или сопротивление ускорению в свободном пространстве.

Микроволновое фоновое космическое излучение. Излучение, оставшееся от сияния раскаленной Вселенной на ранних стадиях ее существования. В наши дни оно настолько сдвинуто в красную сторону спектра, что проявляется уже не как свет, а как микроволновое излучение (радиоволны с длиной волны в несколько сантиметров).

Мировая брана. Четырехмерная поверхность (браны) в пространстве-времени более высоких измерений.

Мнимое время. Время, измеренное в мнимых числах.

Мнимое число. Абстрактное математическое понятие. Вещественные и мнимые числа можно представить себе в виде системы обозначения положения точек на плоскости, при которой ось мнимых чисел перпендикулярна оси вещественных чисел.

Модель Рэндалла — Сундрума. Теория, согласно которой мы живем на бране в бесконечном пятимерном пространстве отрицательной кривизны (наподобие седла).

М-теория. Теория, объединяющая все пять теорий струн вместе с супергравитацией в единую теоретическую систему. Однако М-теория пока до конца не разработана.

Наблюдатель. Человек или устройство, измеряющие физические свойства системы.

Научный детерминизм. Представление о Вселенной как о часовом механизме: полные знания о состоянии Вселенной дают возможность полностью определить ее состояние в любой момент в прошлом и будущем. Выдвинуто Лапласом.

Начальное состояние. Состояние физической системы в начале ее существования.

Нейтрино. Разновидность незаряженных частиц, подверженная только слабому взаимодействию.

Нейтрон. Незаряженная частица, очень похожая на протон и обеспечивающая примерно половину частиц в ядрах атомов. Составит из трех кварков (два нижних, один верхний).

Ньютонов закон всемирного тяготения. Закон, согласно которому сила притяжения между двумя телами зависит от их масс и от расстояния между ними; она пропорциональна произведению масс и обратно пропорциональна квадрату этого расстояния.

Ньютоновы законы движения. Законы, описывающие движение тел на основании понятия об абсолютном пространстве и времени. До тех пор, пока Эйнштейн не выдвинул специальную теорию относительности, считались истиной в последней инстанции.

Общая теория относительности. Теория Эйнштейна, основанная на мысли, что законы физики должны быть одинаковыми для всех наблюдателей, как бы они ни двигались. Она объясняет гравитацию в терми-

нах кривизны четырехмерного пространства-времени.

Основное состояние. Состояние системы при минимуме энергии.

Первичная черная дыра. Черная дыра, возникшая на ранних стадиях существования Вселенной.

Планковская длина. Около 10^{-35} м. Характерный размер струны в теории струн.

Планковское время. Около 10^{-43} с, время, за которое свет проходит планковскую длину.

Позитивистский подход. Представление о том, что научная теория — это математическая модель, описывающая и кодифицирующая наши наблюдения.

Позитрон. Положительно заряженная античастица электрона.

Поле Максвелла. Синтез электричества, магнетизма и света в динамические поля, способные осциллировать и перемещаться в пространстве.

Поле. То, что может существовать одновременно во всем пространстве, в противоположность частице, которая в каждый момент времени существует только в одной точке пространства.

Поправка о защите хронологии. Предположение, что законы физики вступили в сговор с целью помешать перемещению (назад) во времени макроскопических объектов.

Постоянная Планка. Краеугольный камень принципа неопределенности: произведение

неопределенностей положения и скорости должно быть больше постоянной Планка. Обозначается символом $\hbar$.

Принцип запрета. Гипотеза, согласно которой две идентичные частицы со спином $-1/2$ (в пределах принципа неопределенности) не могут одновременно обладать и одинаковым положением, и одинаковой скоростью.

Принцип неопределенности. Принцип, сформулированный Гейзенбергом: нельзя одновременно точно определить и положение, и скорость частицы. Чем точнее знаешь одно, тем меньше точность определения другого.

Пространственное измерение. Любое из трех пространственноподобных измерений пространства-времени.

Пространство-время. Четырехмерное пространство, точки которого представляют собой события.

Протон. Положительно заряженная частица, очень похожая на нейтрон, обеспечивающая примерно половину массы атомных ядер. Состоит из трех кварков (два верхних, один нижний).

Радиоактивность. Спонтанный распад атомных ядер одного типа на более легкие ядра других типов.

Расщепление ядра. Процесс, при котором атомное ядро распадается на два или больше ядер меньшего размера и высвобождается энергия.

Свернутое измерение. Пространственное измерение, искривленное на таком маленьком масштабе, что его практически невозможно зарегистрировать.

Световая секунда. Расстояние, которое свет проходит за секунду.

Световой год. Расстояние, которое свет проходит за год.

Световой конус. Поверхность в пространстве-времени, отмечающая возможное направление движения световых лучей, прошедших через определенное событие.

Свободное пространство. Область вакуума, полностью свободная от полей, то есть область, на которую не воздействуют никакие силы.

Силовое поле. Средство передачи воздействия силы.

Сильное взаимодействие. Самое сильное из четырех фундаментальных взаимодействий с самой короткой дистанцией действия. Оно удерживает кварки в нейтронах и протонах, а также нейтроны и протоны в ядрах атомов.

Сингулярность. Точка в пространстве-времени, где его кривизна становится бесконечной.

Синее смещение. Сокращение длины волны излучения, испускаемого объектом, который движется на наблюдателя, в результате эффекта Доплера.

Скорость. Числа, описывающие быстроту и направление движения тела.

Слабое взаимодействие. Второе по слабости из четырех фундаментальных взаимодействий

с очень маленькой дистанцией действия. Влияет на все частицы вещества, однако не влияет на частицы — переносчики взаимодействий.

Событие. Точка в пространстве-времени, определяемая по своему положению в пространстве и времени.

Солнечное затмение. Период темноты, наступающий, когда Луна проходит между Землей и Солнцем. На Земле, как правило, длится несколько секунд. В 1919 году наблюдения солнечного затмения в Западной Африке послужили несомненным доказательством верности общей теории относительности.

Спектр. Компоненты-частоты, составляющие волну. Часть солнечного спектра иногда видна в виде радуги.

Специальная теория относительности. Теория Эйнштейна, основанная на мысли, что законы физики в отсутствие гравитационных полей должны быть одинаковы для всех наблюдателей, как бы они не двигались.

Спин. Внутреннее свойство элементарных частиц, родственное, но ни тождественное обиходному понятию о вращении (spin).

Стандартная космологическая модель. Теория Большого взрыва в совокупности со стандартной моделью физики элементарных частиц.

Стандартная модель физики элементарных частиц. Теория, объединяющая три негравитационные силы и описывающая их взаимодействие на вещество.

Стационарное состояние. Состояние, не меняющееся со временем.

Струна. Фундаментальный одномерный объект теории струн, заменяющий понятие лишенных структуры элементарных частиц. Разные диаграммы вибрации струны порождают элементарные частицы с разными свойствами.

Супергравитация. Набор теорий, объединяющих общую теорию относительности и суперсимметрию.

Суперсимметрия. Принцип соотношения свойств частиц с различными спинами.

Темное вещество. Вещество в галактиках и их скоплениях, а может быть, и между скоплениями, которое нельзя наблюдать непосредственно, однако можно зарегистрировать косвенно по наличию гравитационного поля. Темное вещество составляет свыше девяноста процентов всего вещества во Вселенной.

Теорема о сингулярности. Теорема, показывающая, что сингулярность — точка, где перестает действовать общая теория относительности, — обязательно должна существовать при определенных условиях, в частности, что Вселенная началась с сингулярности.

Теория всего. Теория, объединяющие электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия.

Теория струн. Физическая теория, в рамках которой частицы описываются как волны на струнах; объединяет квантовую механику и общую теорию относительности. Известна также как теория суперструн.

Теория Янга–Миллса. Расширение теории поля Максвелла, описывающее слабое и сильное взаимодействия.

Термодинамика. Изучение отношений между энергией, работой, теплом и энтропией в динамичной физической системе.

Уравнение Шрёдингера. Уравнение, описывающее эволюцию волновой функции в квантовой теории.

Ускорение. Изменение скорости или направления движения тела. См. также **Скорость**.

Ускоритель частиц. Установка, ускоряющая движение заряженных частиц путем повышения их энергии.

Фермион. Частица (или диаграмма вибрации струны) с полуцелым спином.

Фотон. Квант света, минимальный волновой пакет электромагнитного поля.

Фотоэффект. Способность некоторых металлов испускать электроны при попадании на них света.

Частота. Для волны — количество полных циклов в секунду.

Черная дыра. Область пространства-времени, где гравитация так сильна, что вырваться оттуда не может ничто, даже свет.

Шкала Кельвина. Температурная шкала, в которой градусы отсчитываются от абсолютно-го нуля.

Электрический заряд. Свойство частицы, дающее ей способность притягивать или отталкивать другие частицы, обладающие противоположным или тем же зарядом соответственно.

Электромагнитная волна. Волнообразное возмущение электромагнитного поля. Все волны электромагнитного спектра, например видимый свет, рентгеновское излучение, микроволновое излучение, инфракрасное излучение и т.д., распространяются со скоростью света.

Электромагнитная сила. Сила, действующая между частицами с электрическим зарядом одного и того же или противоположного знака.

Электрон. Отрицательно заряженная частица, вращающаяся по орбите вокруг ядра атома.

Элементарная частица. Частица, которая, как предполагается, не имеет структуры.

Энергия вакуума. Энергия, присутствующая даже в пустом пространстве. Обладает любопытным свойством: в отличие от присутствия массы, присутствие энергии вакуума заставляет Вселенную расширяться с ускорением.

Энтропия. Мера беспорядка физической системы; количество разных микроскопических конфигураций системы, соответствующих одному макроскопическому состоянию этой системы.

Эфир. Гипотетическая нематериальная среда, которая, как предполагалось, пронизывает все пространство. Раньше считалось, что подобная среда необходима для распространения электромагнитного излучения, однако теперь эта гипотеза не считается правдоподобной.

Эффект Доплера. Сдвиг частоты и длины волны звуковых или световых волн, который воспринимает наблюдатель, если источник волн движется относительно него.

Эффект Казимира. Давление, вызывающее притяжение между двумя плоскими параллельными металлическими пластинами, помещенными на очень близком расстоянии в вакууме. Давление объясняется уменьшением количества виртуальных частиц между пластинами по сравнению с условиями снаружи.

Ядерный синтез. Процесс, при котором два или три атомных ядра сталкиваются и соединяются, и образуется более крупное и тяжелое ядро.

Ядро. Центральная часть атома, состоящая только из протонов и нейтронов, удерживаемых сильным взаимодействием.

***P*-брана.** Брана с *p*-измерениями. См. также **Брана**.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Популярных книг на эту тему множество, есть и отличные, например «Элегантная Вселенная» Брайана Грина, и посредственные (их я упоминать не стану). Поэтому я ограничился списком тех авторов, которые внесли значительный вклад в изучаемую область, чтобы передать подлинный дух науки.

Приношу свои извинения тем авторам, которых я не упомянул по незнанию. Для читателей, желающих ознакомиться с более строгими научными текстами, я составил второй список: «Менее популярная литература».

Einstein, Albert. «The Meaning of Relativity», Fifth Edition. Princeton: Princeton University Press, 1966.

Feynman, Richard. «The Character of Physical Law». Cambridge, Mass: MIT Press, 1967. (Р. Фейнман, «Характер физических законов», АСТ, 2016).

Greene, Brian. The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory. New York, W.W. Norton & Company, 1999. (Б. Грин, «Элегантная Вселенная», Либроком, 2017).

Guth, Alan H. «The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins». New York: Perseus Books Group, 2000.

Rees, Martin J. «Our Cosmic Habitat». Princeton: Princeton University Press, 2001. (М. Рис. «Наша космическая обитель». Институт космических исследований, 2002).

Rees, Martin J. «Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe». New York: Basic Books, 2000.

Thorne, Kip. «Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy». New York: W.W. Norton & Company, 1994. (К. Торн. «Черные дыры и складки времени. Дерзкое наследие Эйнштейна». Государственное издательство физико-математической литературы, 2009).

Weinberg, Steven. «The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe», Second Edition. New York: Basic Books, 1993. (С. Вайнберг. «Первые три минуты». Эксмо, 2010).

МЕНЕЕ ПОПУЛЯРНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Hartle, James. «Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity». Reading, Mass.: Addison-Wesley Longman, 2002.

Linde, Andrei D. «Particle Physics and Inflationary Cosmology». Chur, Switzerland: Harwood Academic Publishers, 1990.

Misner, Charles W., Kip S. Thorne, John A. Wheeler. «Gravitation». San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1973.

Peebles, P. J. «Principles of Physical Cosmology». Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1993. (П. Дж. Пиблс, «Физическая космология». Мир, 1975).

Polchinski, Joseph. «String Theory: An Introduction to the Bosonic String». Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

Wald, Robert M. «General Relativity». Chicago: University of Chicago Press, 1984.

Источники иллюстраций

Стр. 11, 27: Печатается с разрешения Архивов Калифорнийского технологического института. Albert Einstein™ печатается по лицензии Еврейского университета в Иерусалиме, предоставлено агентством Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net.

Стр. 13: AKG Photo, London; Albert Einstein™ печатается по лицензии Еврейского университета в Иерусалиме, предоставлено агентством Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net.

Стр. 21: Печатается с разрешения Национальной лаборатории в Лос-Аламосе.

Стр. 31: Печатается с разрешения фотобиблиотеки Science Photo Library.

Стр. 34: Albert Einstein™ печатается по лицензии Еврейского университета в Иерусалиме, предоставлено агентством Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net.

Стр. 35: Фото Harry Burnett/печатается с разрешения Архивов Калифорнийского Технологического института. Albert Einstein™ печатается по лицензии Еврейского университета в Иерусалиме, предоставлено агентством Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net.

Стр. 63: Печатается с разрешения Neel Shearer.

Стр. 76: Печатается с разрешения Space Telescope Science Institute (STScI)/NASA.

Стр. 77: Прометей прикованный с орлом, клюющим его печень. Этрусская чернофигурная ваза. Музеи и галереи Ватикана, Ватикан, Италия/Bridgeman Art Library.

Стр. 78: Спиральная галактика NGC 4414, фото печатается с разрешения Hubble Heritage Team, STScI/NASA; спиральная галактика с перемычкой NGC 4314, фото печатается с разрешения Университета штата Техас и пр., STScI/NASA; эллиптическая галактика NGC 147, фото печатается с разрешения STScI/NASA; Млечный Путь, фото печатается с разрешения S.J. Maddox, G. Efstathiou, W. Sutherland, J. Loveday, Кафедра астрофизики, Оксфордский университет.

Стр. 84: Печатается с разрешения Jason Ware, galaxyphoto.com.

Стр. 85: Печатается с разрешения Обсерваторий Института Карнеги в Вашингтоне.

Стр. 91: Фото Floyd Clark/ печатается с разрешения Архивов Калифорнийского технологического института.

Стр. 115: Печатается с разрешения Neel Shearer.

Стр. 120: Печатается с разрешения NASA/Chandra X-Ray Center/Смитсоновская астрофизическая обсерватория/H. Marshall et al.

Стр. 121: Печатается с разрешения STScI/NASA.

Стр. 124: Печатается с разрешения STScI/NASA.

Стр. 141, 161: (C) Калифорнийский технологический институт.

Стр. 155: Печатается с разрешения Neel Shearer.

Стр. 170: Из книги Richard Dawkins, «The Blind Watchmaker», New York: W.W. Norton & Company, 1986.

Стр. 176: Hubble Deep Field печатается с разрешения R. Williams, STScI/NASA.

Стр. 177: «День независимости» ©1996 Twentieth Century Fox Film Corporation. All rights reserved; E.T. still: Copyright © 2001 by Universal Studios Publishing Rights, a Division of Universal Studios Licensing, Inc. All rights reserved.

Стр. 203: Печатается с разрешения Neel Shearer.

Все оригинальные иллюстрации, не перечисленные выше, создал для этой книги Малкольм Годвин из Moonrunner Design Ltd., UK.

Научно-популярное издание
Серия «Мир Стивена Хокинга»

12+

СТИВЕН ХОКИНГ
О ВСЕЛЕННОЙ В ДВУХ СЛОВАХ

Перевод с английского: Анастасия Бродоцкая

Научный редактор: Александр Красильщиков,
к. ф.-м. н., старший научный сотрудник лаборатории Астрофизики высоких энергий
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе.

Фото автора на обложке: Филип Майнотт (Philip Mynott)

Заведующая редакцией Юлия Данник
Ответственный редактор Ольга Лазуткина
Оформление обложки Дмитрий Агаонов
Компьютерная верстка Юлия Анищенко
Технический редактор Татьяна Тимошина
Корректор Инна Мокина

Общероссийский классификатор продукции ОК-034-2014 (КПЕС 2008);
58.11.1 - книги, брошюры печатные

Подписано в печать 13.11.2020. Формат 84х108/16. Усл. печ. л. 14.
Бумага мелованная. Печать офсетная. Гарнитура Alliance
Доп. тираж 2000 экз. Заказ 324

Отпечатано в АО «Первая Образцовая типография»
Филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Россия, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1
Сайт: www.chpd.ru, E-mail: sales@chpd.ru, тел. 8(499) 270-73-59

Произведено в Российской Федерации. Изготовлено в 2021 г.
Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»
129085, Российская Федерация, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21, стр. 1, комн. 705, пом. I, этаж 7
Наш электронный адрес: www.ast.ru
E-mail: ogiz@ast.ru

«Баспа Аста» деген ООО
«Баспа Аста» деген ООО
129085, Мәскеу қ., Звездный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме, I жай, 7-қабат.
Біздің электрондық мекенжайымыз: www.ast.ru
Интернет-магазин: www.book24.kz
Интернет-дүкен: www.book24.kz
Импортер в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».
Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию в республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы»
Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша арыз-талаптарды қабылдаушының өкілі
«РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3«а», литер Б, офис 1.
Тел.: 8 (727) 2 51 59 89,90,91,92; Факс: 8 (727) 251 58 12, вн. 107; E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген. Өндірген мемлекет: Ресей



Стремительный прогресс в области технологий и новые знания об устройстве видимого и невидимого мира заставляют физиков-теоретиков искать новые объяснения установившемуся порядку вещей. И наиболее интригующими остаются рассуждения о пространстве и времени. С момента публикации мирового бестселлера «Краткая история времени» профессор Стивен Хокинг внимательно следил за развитием астрофизики, пока наконец не назрела необходимость ввести широкую публику в курс того, что изменилось на переднем крае науки. Тем временем мы вплотную приблизились к пониманию природы Вселенной во всей ее сложности. В захватывающем диалоге с читателем, используя доступные для каждого формулировки, автор раскрывает суть квантовой механики, путешествий во времени, черных дыр и теории относительности. Центральное место Стивен Хокинг по традиции отводит теории всего — как мы, обыватели, привыкли ее называть — или единой теории поля, Святому Граалю современной физики.

книги для любого настроения здесь



ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА АСТ

www.ast.ru | www.book24.ru

vk.com/izdatelstvoast
[@instagram.com/izdatelstvoast](https://instagram.com/izdatelstvoast)
facebook.com/izdatelstvoast
ok.ru/izdatelstvoast

