

СТИВЕН ХОКИНГ

МИР В ОРЕХОВОЙ СКОРЛУПКЕ



Династия



Новейшие тайны Вселенной в кратком и красочном изложении



СТИВЕН ХОКИНГ

МИР
В ОРЕХОВОЙ
СКОРЛУПКЕ

Новейшие тайны Вселенной в кратком и красочном изложении



Мир в ореховой скорлупке

Стивен Хокинг



амфора

САНКТ - ПЕТЕРБУРГ

2012

УДК 524.8
ББК 22.68
Х 70

STEPHEN HAWKING
The Universe in a Nutshell

Перевел с английского А. Г. Сергеев

*Издательство выражает благодарность
литературному агентству Synopsis
за содействие в приобретении прав*

*Защиту интеллектуальной собственности и прав
издательской группы «Амфора»
осуществляет юридическая компания
«Усков и Партнеры»*



Хокинг С.
Х 70 Мир в ореховой скорлупке / Стивен Хокинг ; [пер. с англ.
А. Сергеева]. — СПб. : Амфора. ТИД Амфора, 2012. — 218 с.
ISBN 978-5-367-02224-7

Один из самых известных физиков-теоретиков нашего времени Стивен Хокинг — автор этой блестяще иллюстрированной научно-популярной книги о происхождении Вселенной и природе пространства и времени.

УДК 524.8
ББК 22.68

ISBN 978-5-367-02224-7

© Stephen Hawking, 2001
© Moonrunner Design Ltd UK and
The Book Laboratory™ Inc.,
оригинальные иллюстрации, 2001
© Издание на русском языке,
перевод на русский язык,
оформление.
ЗАО ТИД «Амфора», 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ~ 7

ГЛАВА 1 ~ 11

Краткая история относительности

*О том, как Эйнштейн заложил основы двух фундаментальных теорий XX века:
общей теории относительности и квантовой механики*

ГЛАВА 2 ~ 37

Форма времени

*О том, что теория относительности
придает времени форму и как это можно примирить с квантовой теорией*

ГЛАВА 3 ~ 75

Мир в ореховой скорлупке

*О том, что Вселенная имеет множество историй, каждая из которых
определяется крошечным орешком*

ГЛАВА 4 ~ 109

Предсказывая будущее

*О том, как потеря информации
в черных дырах может ослабить нашу способность предсказывать будущее*

ГЛАВА 5 ~ 139

Защищая прошлое

*О том, возможны ли путешествия во времени
и способна ли высокоразвитая цивилизация, вернувшись в прошлое, изменить его*

ГЛАВА 6 ~ 163

Наше будущее: звездный путь или нет?

О том, как биологическая и электронная жизнь будут все быстрее и быстрее усложняться

ГЛАВА 7 ~ 181

О дивный браны мир

О том, живем ли мы на бране или являем собой всего-навсего голограммы

ГЛОССАРИЙ ~ 210

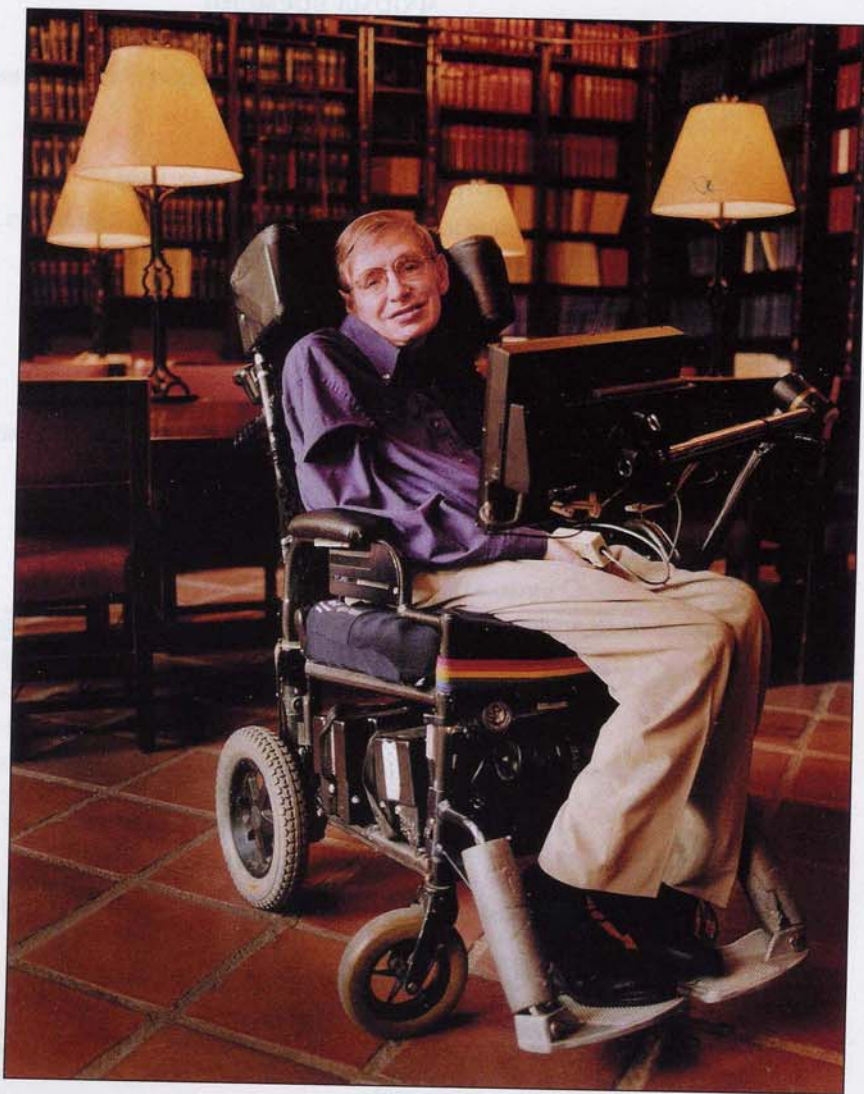
РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЧТЕНИЯ ~ 217

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ АВТОРСКИХ ПРАВ НА ИЛЛЮСТРАЦИИ ~ 218



МИР В ОРЕХОВОЙ СКОРЛУПКЕ

Стивен Хокинг.
2001. © Стюарт Козн





ПРЕДИСЛОВИЕ

Я не ожидал, что моя научно-популярная книга «Краткая история времени» окажется настолько успешной. В списке бестселлеров лондонской «Санди таймс» она продержалась более четырех лет — дольше любой другой книги, что особенно удивительно для издания о науке, ведь они обычно расходятся не очень быстро. Потом люди стали спрашивать, когда ожидать продолжения. Я противился, мне не хотелось писать что-то вроде «Продолжения краткой истории» или «Немного более длинной истории времени». А еще я был занят исследованиями. Но постепенно стало ясно, что можно написать другую книгу, которая имеет шанс оказаться проще для понимания. «Краткая история времени» была построена по линейной схеме: в большинстве случаев каждая следующая глава логически связана с предшествующими. Одним читателям это нравилось, но другие, застряв на первых главах, так и не добились до более интересных тем. Настоящая книга построена иначе — она скорее похожа на дерево: главы 1 и 2 образуют ствол, от которого отходят ветви остальных глав.

Эти «ответвления» в значительной степени независимы друг от друга, и, получив представление о «стволе», читатель может знакомиться с ними в произвольном порядке. Они связаны с областями, в которых я работал или о которых размышлял после публикации «Краткой истории времени». То есть отображают наиболее активно развивающиеся направления современных исследований. Внутри каждой главы я также попытался уйти от линейной структуры. Иллюстрации и подписи к ним указывают читателю альтернативный маршрут, как в «Иллюстрированной краткой истории времени», изданной в 1996 г. Врезки и замечания на полях позволяют затронуть некоторые темы глубже, чем это возможно в основном тексте.

В 1988 г., когда впервые вышла «Краткая история времени», впечатление было такое, что окончательная Теория Всего едва-едва маячила на горизонте. Насколько с тех пор изменилась ситуация? Приблизились ли мы к нашей цели? Как вы узнаете из этой книги, прогресс был весьма значительным. Но путешествие еще продолжается, и конца ему пока не видно. Как гово-



рится, лучше продолжать путь с надеждой, чем прибыть к цели*. Наши поиски и открытия питают творческую активность во всех сферах, не только в науке. Если мы достигнем конца пути, человеческий дух иссохнет и умрет. Но я не думаю, что мы когда-либо остановимся: будем двигаться если не в глубину, то в сторону усложнения, всегда оставаясь в центре расширяющегося горизонта возможностей.

Я хочу поделиться моим волнением от сделанных открытий и изобразить реальность такой, какой она предстает перед нами. Я сконцентрировался на тех вопросах, над которыми работал сам, в силу чувства причастности. Детали этой работы крайне специальные, но я уверен, что основные идеи можно передать и тому, кто не обладает большим математическим багажом. Надеюсь, что мне это удалось.

В работе над этой книгой у меня было много помощников. Особо я хотел бы отметить Томаса Хертога и Нила Ширера за их помощь с рисунками, подписями и врезками, Энн Харрис и Китти Фергюссон, которые редактировали рукопись (или, точнее, компьютерные файлы, поскольку все, что я пишу, появляется в электронной форме), Филиппа Данна из Book Laboratory и Moonrunner Design, который создал иллюстрации. Но кроме того, я хочу поблагодарить всех тех, кто дал мне возможность вести нормальную жизнь и заниматься научными исследованиями. Без них эта книга не была бы написана.

Стивен Хокинг
Кембридж, 2 мая 2001 г.

* Фраза из эссе Роберта Луиса Стивенсона «Virginibus Puerisque». —
Здесь и далее примеч. перев.



ГЛАВА 1

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

*О том, как Эйнштейн заложил основы
двух фундаментальных теорий XX века:
общей теории относительности и квантовой механики*



Professor Einstein

Albert Einstein™

LOW



Альберт Эйнштейн, создатель специальной и общей теорий относительности, родился в 1879 г. в немецком городе Ульме, позднее семья переехала в Мюнхен, где у отца будущего ученого, Германа, и его дяди, Якоба, была небольшая и не слишком преуспевающая электротехническая фирма. Альберт не был вундеркиндом, но утверждения, будто он не успевал в школе, выглядят преувеличением. В 1894 г. бизнес его отца прогорел, и семья переехала в Милан. Родители решили оставить Альберта в Германии до окончания школы, но он не выносил немецкого авторитаризма и спустя несколько месяцев бросил школу, отправившись в Италию к своей семье. Позднее он завершил образование в Цюрихе, получив в 1900 г. диплом престижного Политехникума (ETH*). Склонность к спорам и не любовь к начальству помешали Эйнштейну наладить отношения с профессорами ETH, так что никто из них не предложил ему места ассистента, с которого обычно начиналась академическая карьера. Только через два года молодому человеку наконец удалось устроиться на должность младшего клерка в Швейцарском патентном бюро в Берне. Именно в тот период, в 1905 г., он написал три статьи, которые не только сделали Эйнштейна одним из ведущих ученых мира, но и положили начало двум научным революциям — революциям, которые изменили наши представления о времени, пространстве и самой реальности.

К концу XIX века ученые считали, что вплотную подошли к исчерпывающему описанию Вселенной. По их представлениям, пространство было заполнено непрерывной средой — «эфиром». Лучи света и радиосигналы рассматривались как волны эфира, подобно тому как звук представляет собой волны плотности воздуха. Все, что требовалось для завершения теории, — это тщательно измерить упругие свойства эфира. Имея в виду эту задачу, Джефферсоновскую лабораторию в Гарвардском университете построили без единого железного гвоздя, чтобы избежать возможных помех в тончайших магнитных измерениях. Однако проектировщики забыли, что красно-коричневый кирпич, который использовался при возведении лаборатории, да и большинства других зданий Гарварда, содержит значительное количество железа. Здание служит по сей день, но в Гар-

* Eidgenössische Technische Hochschule — Высшее техническое училище.



Albert Einstein™

Альберт Эйнштейн. 1920



Рис. 1.1 (сверху)
ТЕОРИЯ НЕПОДВИЖНОГО ЭФИРА

Если бы свет был волной в упругом веществе, называемом эфиром, его скорость казалась бы выше тому, кто движется на космическом корабле ему навстречу (а), и ниже — тому, кто движется в том же направлении, что и свет (б).

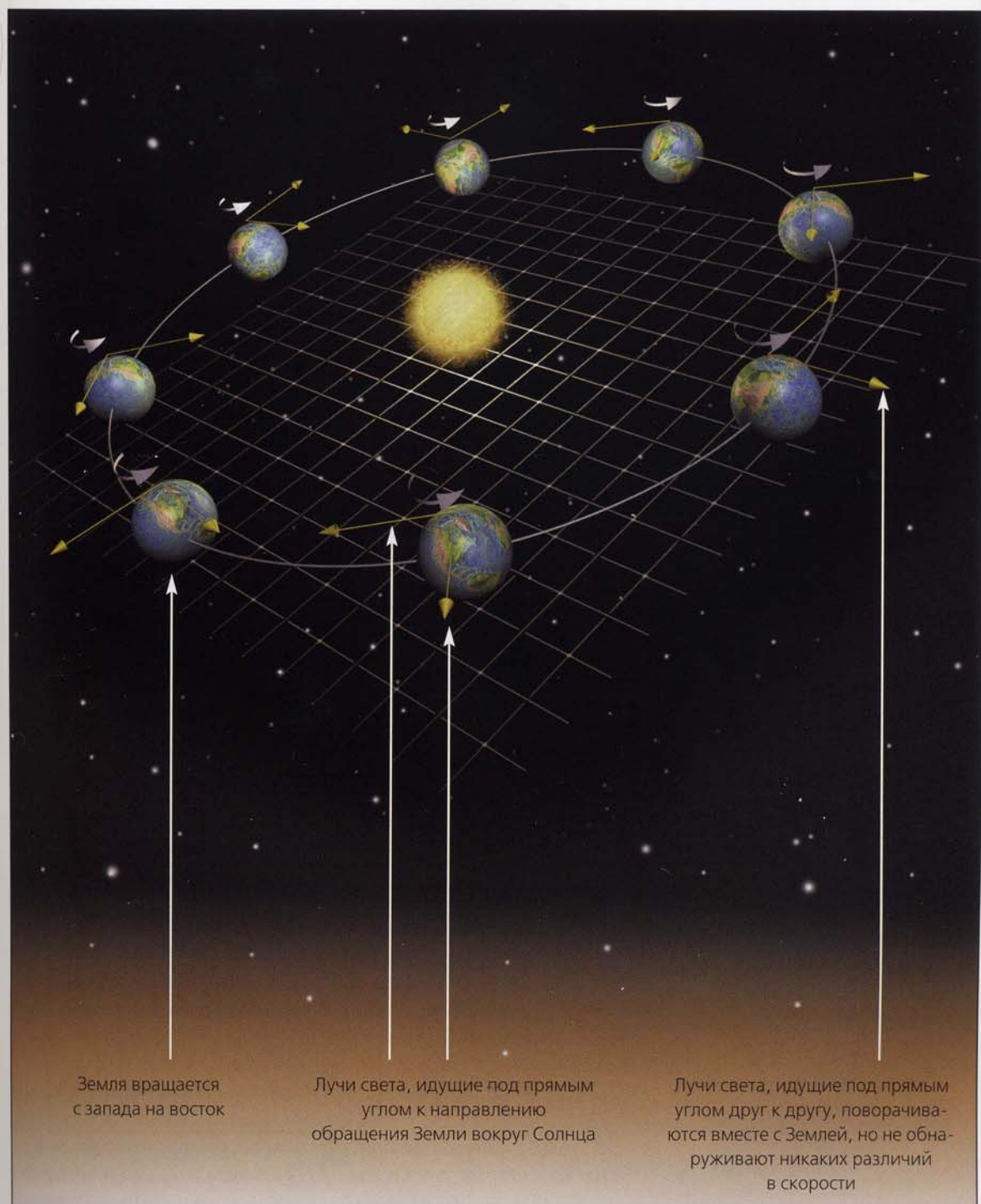
Рис. 1.2 (справа)
Не было обнаружено никаких различий между скоростью света в направлении движения Земли по орбите и скоростью света в перпендикулярном направлении.

варде так и не знают, какой вес смогут выдержать перекрытия библиотеки, не содержащие железных гвоздей.

К концу столетия концепция всепроникающего эфира начала сталкиваться с трудностями. Ожидалось, что свет должен распространяться по эфиру с фиксированной скоростью, но если вы сами движетесь сквозь эфир в том же направлении, что и свет, скорость света должна казаться меньше, а если вы движетесь в противоположном направлении, скорость света окажется больше (рис. 1.1).

Однако в ряде экспериментов эти представления не удалось подтвердить. Наиболее точный и корректный из них осуществили в 1887 г. Альберт Майкельсон и Эдвард Морли в Школе прикладных наук Кейза, Кливленд, штат Огайо. Они сравнили скорость света в двух лучах, идущих под прямым углом друг к другу. Поскольку Земля вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца, скорость и направление движения аппаратуры сквозь эфир меняется (рис. 1.2). Но Майкельсон и Морли не обнаружили ни суточных, ни годовых различий в скорости света в двух лучах. Получалось, будто свет всегда движется относительно вас с одной и той же скоростью, независимо от того, как быстро и в каком направлении движетесь вы сами (рис. 1.3).

Основываясь на эксперименте Майкельсона – Морли, ирландский физик Джордж Фитцджералд и голландский физик Хендрик Лоренц предположили, что тела, движущиеся сквозь эфир, должны сжиматься, а часы — замедляться. Это сжатие и замедление таковы, что люди всегда будут получать при измерениях одинаковую скорость света независимо от того, как они движутся относительно эфира. (Фитцджералд и Лоренц по-прежнему считали эфир реальной субстанцией.) Однако в статье, написанной в июне 1905 г., Эйнштейн отметил, что если



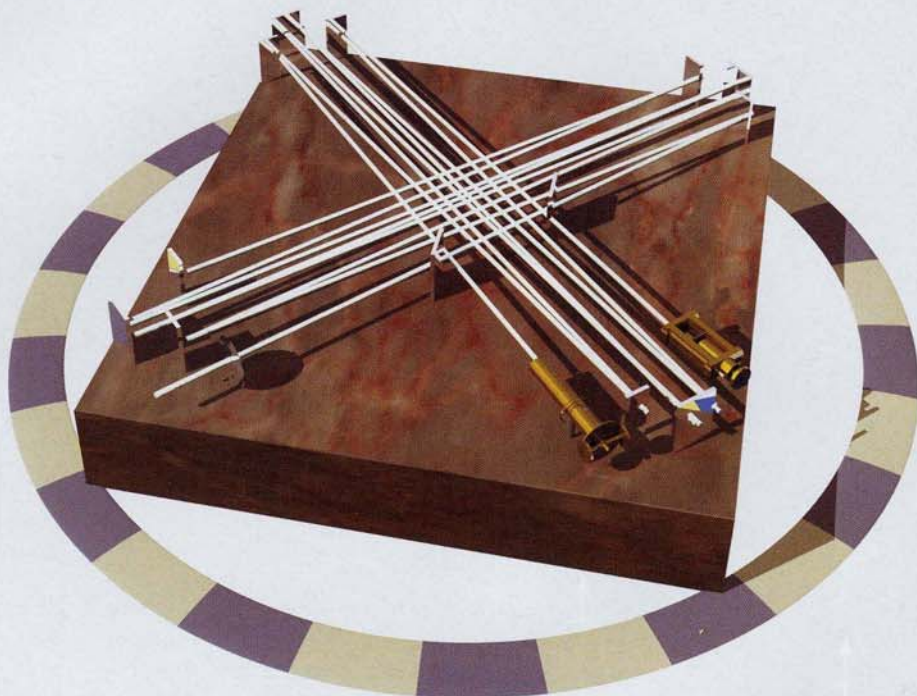
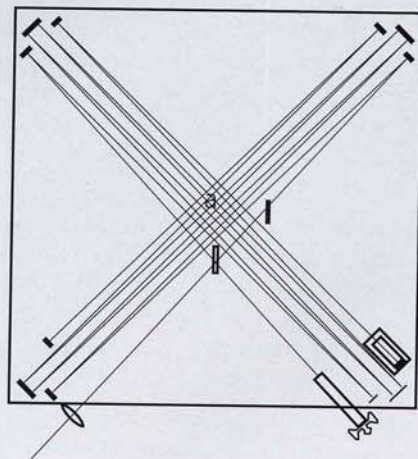
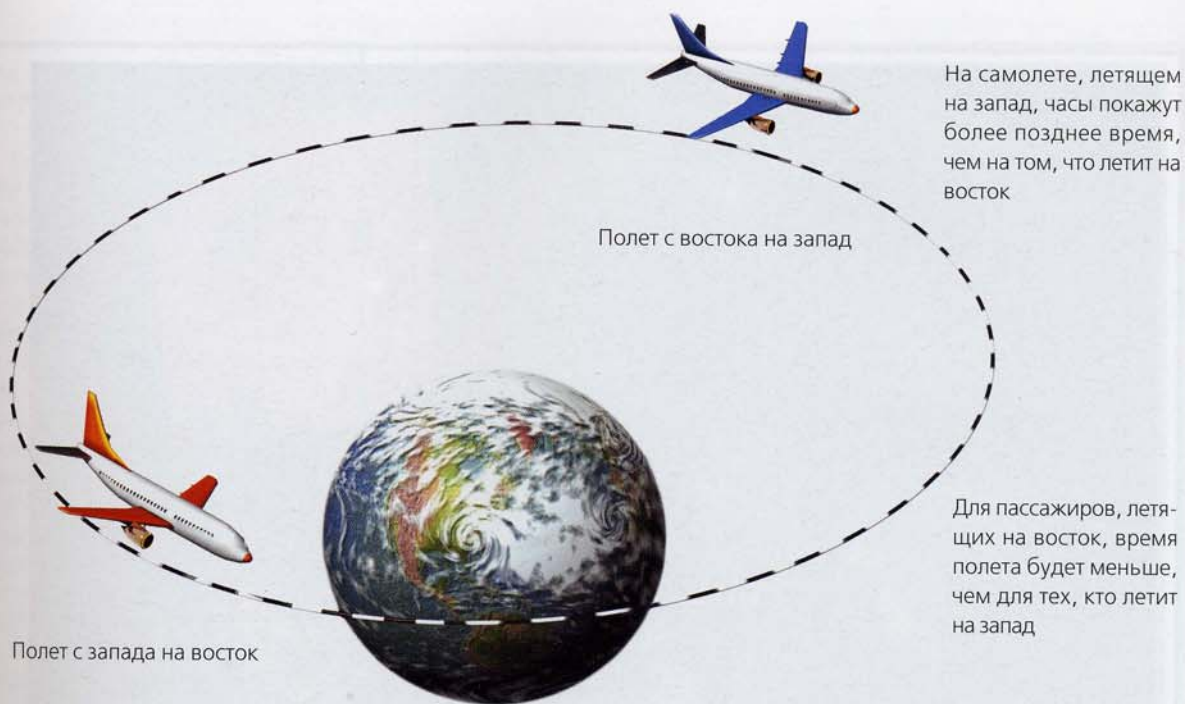


Рис. 1.3. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

Вверху: В интерферометре Майкельсона — Морли свет источника расщеплялся на два луча полупрозрачным зеркалом. Лучи двигались перпендикулярно друг другу, а потом объединялись вновь, попадая на полупрозрачное зеркало. Разница в скорости лучей света, движущихся в двух направлениях, могла бы привести к тому, что гребни волн одного луча пришли бы одновременно с впадинами волн другого и взаимно погасили друг друга.

Справа: Схема эксперимента, реконструированная по иллюстрации, которая появилась в журнале «Сайнтифик америкен» в 1887 г.





никто не может определить, движется он сквозь эфир или нет, то само понятие эфира становится лишним. Вместо этого он начал с постулата, что законы физики должны быть одинаковыми для всех свободно движущихся наблюдателей. В частности, все они, измеряя скорость света, должны получать одну и ту же величину, с какой бы скоростью ни двигались сами. Скорость света независима от их движений и одинакова во всех направлениях.

Но это требует отбросить представление о том, что существует единая для всех величина, называемая временем, которую измеряют любые часы. Вместо этого у каждого должно быть свое собственное, персональное время. Время двух человек будет совпадать, только если они находятся в покое друг относительно друга, но не в том случае, если они движутся.

Это было подтверждено рядом экспериментов. В одном из них два очень точных хронометра отправили вокруг света в противоположных направлениях, и по возвращении их показания слегка различались (рис. 1.4). Отсюда можно сделать вывод, что, желая продлить свою жизнь, надо постоянно лететь на восток, чтобы скорость самолета добавлялась к скорости вращения Земли. Однако выигрыш составит лишь доли секунды и будет полностью сведен на нет качеством пищи, которой кормят пассажиров авиакомпании.

Рис. 1.4

Одна из версий парадокса близнецов (см. рис. 1.5) была проверена экспериментально путем отправки двух высокоточных хронометров вокруг света в противоположных направлениях. При встрече показания часов, которые летели на восток, оказались немного меньше.



Рис. 1.5 (слева)
ПАРАДОКС БЛИЗНЕЦОВ

Согласно теории относительности каждый наблюдатель имеет свою меру времени. Это может приводить к так называемому парадоксу близнецов.

Один из близнецов (*a*) отправляется в космическое путешествие, в ходе которого движется с около-световой скоростью (*c*), а его брат (*b*) остается на Земле.

Из-за движения в космическом корабле время для путешественника (*a*) идет медленнее, чем для его близнеца (*b*) на Земле. Поэтому, вернувшись, космический путешественник (*a2*) обнаружит, что его брат (*b2*) постарел больше, чем он сам.

Хотя это кажется противоречащим здравому смыслу, ряд экспериментов подтверждает, что в этом сценарии путешествующий близнец действительно будет моложе.

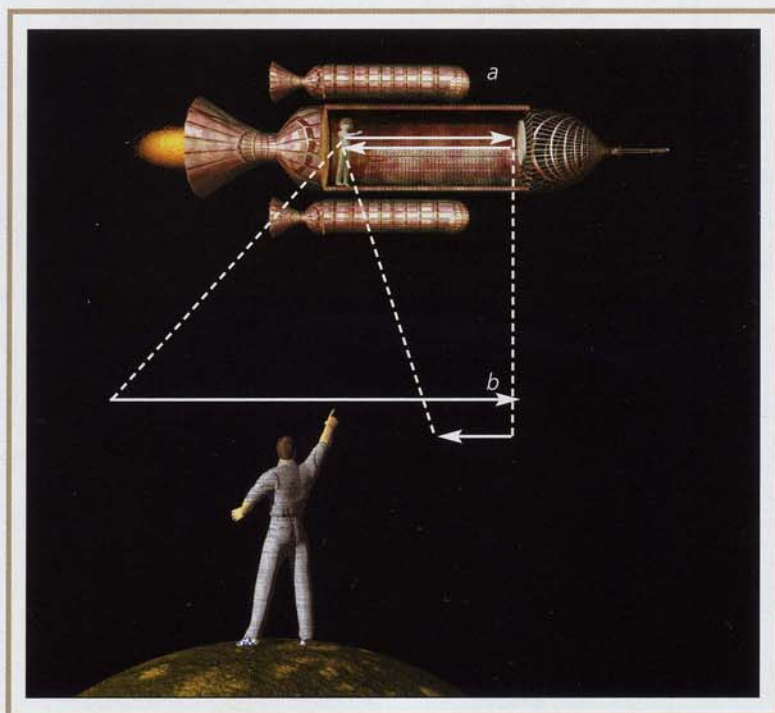


Рис. 1.6 (справа)

Космический корабль пролетает мимо Земли со скоростью, равной четырем пятым от скорости света. Импульс света испускается в одном конце кабины и отражается обратно в другом (*a*).

За светом следят люди на Земле и на корабле. Из-за движения космического корабля они разойдутся в оценке пути, пройденного светом (*b*).

Они также должны разойтись в оценке времени, которое свет затратил на движение туда и обратно, поскольку согласно постулату Эйнштейна скорость света постоянна для всех свободно движущихся наблюдателей.

Постулат Эйнштейна о том, что законы природы должны быть одинаковы для всех свободно движущихся наблюдателей, стал основой теории относительности, получившей такое название потому, что значение имеют только относительные движения. Ее красоту и простоту признают многие мыслители, но остается и немало тех, кто думает иначе. Эйнштейн отбросил два абсолюта науки XIX века: абсолютный покой, представленный эфиром, и абсолютное универсальное время, которое измеряют все часы. Многих людей тревожит эта концепция. Не подразумевается ли, спрашивают они, что *все на свете* относительно, так что нет больше абсолютных моральных стандартов? Это беспокойство ощущалось на протяжении всех 1920-х и 1930-х гг. Когда в 1921 г. Эйнштейну присуждали Нобелевскую премию, то ссылались на важную, но (по его масштабам) сравнительно небольшую работу, также выполненную в 1905 г. О теории относительности даже не упомянули, поскольку она считалась слишком спорной. (Я до сих пор два-три раза в неделю получаю письма, в которых мне сообщают, что Эйнштейн был неправ.) Несмотря на это, теория относительности сегодня полностью принята научным сообществом, а ее предсказания были проверены в бесчисленном количестве экспериментов (рис. 1.5, 1.6).

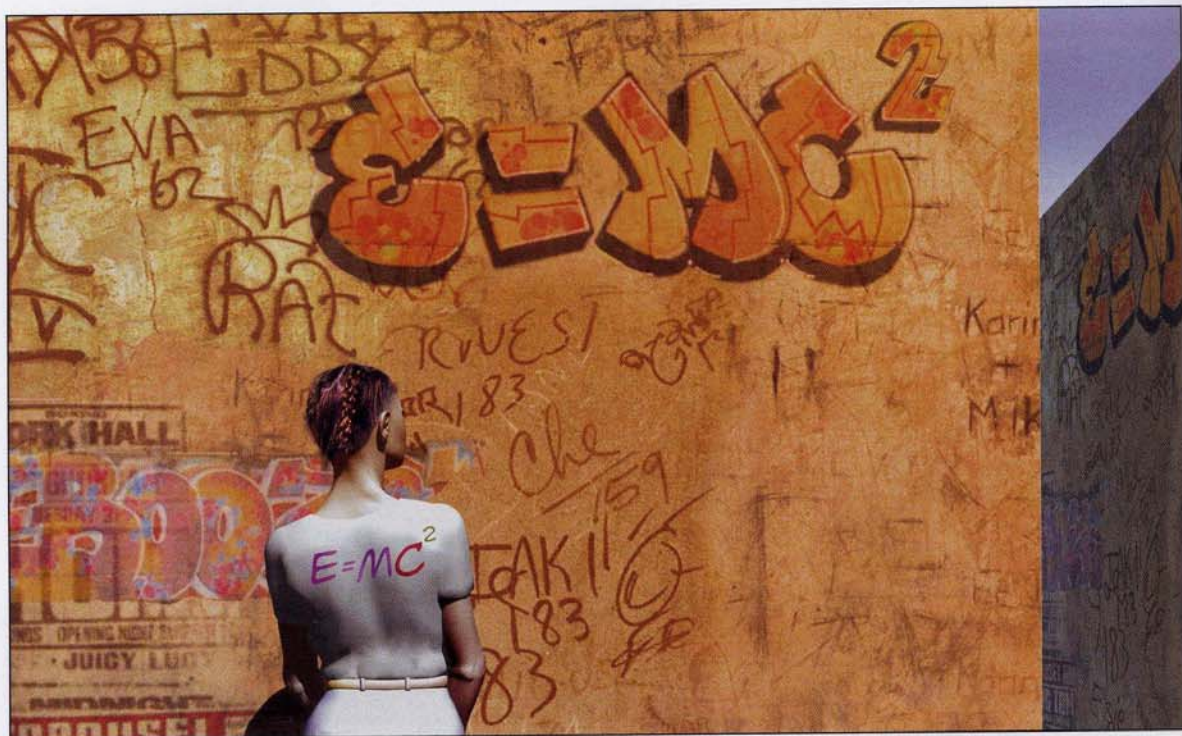


Рис. 1.7

$$E=mc^2$$



Очень важным следствием теории относительности стала связь между массой и энергией. Из постулата Эйнштейна о том, что скорость света должна быть одинакова для всех, вытекает невозможность двигаться быстрее, чем свет. Если использовать энергию для ускорения некоего объекта, будь это элементарная частица или космический корабль, его масса станет возрастать, делая дальнейшее ускорение все более трудным. Разогнать частицу до скорости света будет невозможно, поскольку на это потребуется бесконечное количество энергии. Масса и энергия эквивалентны, что и выражает знаменитая формула Эйнштейна $E = mc^2$. Это, вероятно, единственная физическая формула, которую узнают на улицах (рис. 1.7). Одним из ее следствий стало понимание того, что если ядро атома урана распадается на два ядра с немного меньшей суммарной массой, то при этом должно выделяться огромное количество энергии (рис. 1.8).

В 1939 г., когда стала очевидна перспектива новой мировой войны, группа ученых, которые понимали ее последствия, убедили Эйнштейна преодолеть пацифистские сомнения и поддержать своим авторитетом обращение к президенту Рузвельту с призывом к Соединенным Штатам начать программу ядерных исследований.



Это привело к появлению Манхэттенского проекта и, в конечном счете, бомб, которые взорвались над Хиросимой и Нагасаки в 1945 г. Некоторые люди винят за атомную бомбу Эйнштейна, поскольку он открыл соотношение между массой и энергией, но с тем же успехом можно обвинять Ньютона в крушении самолетов, поскольку он открыл гравитацию. Сам Эйнштейн не принимал никакого участия в Манхэттенском проекте и пришел в ужас от бомбардировки.

После своих пионерских статей 1905 г. Эйнштейн завоевал уважение в научном сообществе. Но только в 1909 г. ему предложили место в Цюрихском университете, что позволило расстаться с Швейцарским патентным бюро. Два года спустя он переехал в Немецкий университет в Праге, но в 1912 г. вернулся в Цюрих, на это раз — в ЕТН. Несмотря на антисемитизм, охвативший тогда большую часть Европы и проникший даже в университеты, Эйнштейн теперь очень высоко котируется как ученый. К нему поступили предложения из Вены и Утрехта, но он решил отдать предпочтение должности исследователя Прусской академии наук в Берлине, поскольку она освобождала его от преподавательских обязанностей. Он переехал в Берлин в апреле 1914 г., и вскоре к нему присоединились жена



ПРОРОЧЕСКОЕ ПИСЬМО,
ОТПРАВЛЕННОЕ ЭЙНШТЕЙНОМ
ПРЕЗИДЕНТУ РУЗВЕЛЬТУ
В 1939 г.

«В течение последних четырех месяцев благодаря работам Жолио во Франции, а также Ферми и Сициларда в Америке, вероятно, появилась возможность запуска ядерной цепной реакции в крупной массе урана, вследствие чего может быть высвобождена огромная энергия и получено большое количество элементов, подобных радию. Можно считать почти достоверным, что это удастся реализовать в ближайшем будущем.

Это новое явление способно также привести к созданию бомб и, что возможно, хотя уверенность в этом меньше, исключительно мощных бомб нового типа».



Рис. 1.8
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

Ядра состоят из протонов и нейтронов, которые удерживаются вместе сильным взаимодействием. Но масса ядра всегда меньше суммарной массы протонов и нейтронов, из которых оно состоит. Разница служит мерой ядерной энергии связи, которая удерживает частицы в ядре. Энергию связи можно вычислить по формуле Эйнштейна Δmc^2 , где Δm — разница между массой ядра и суммой масс входящих в него частиц; c — скорость света.

Именно выделение этой потенциальной энергии порождает разрушительную мощь ядерных устройств.

и двое сыновей. Но семейная жизнь не заладилась, и довольно быстро семья ученого вернулась в Цюрих. Несмотря на его эпизодические визиты к жене, они в конце концов развелись. Эйнштейн позднее женился на своей кузине Эльзе, которая жила в Берлине. Однако все годы Первой мировой войны он оставался свободным от семейных уз, отчего, возможно, этот период его жизни оказался таким плодотворным для науки.

Хотя теория относительности полностью соответствует законам, которые управляют электричеством и магнетизмом, она несовместима с ньютоновским законом тяготения. Этот последний говорит, что если изменить распределение вещества в одном месте пространства, то изменения гравитационного поля мгновенно проявятся повсюду во Вселенной. Это не только означает возможность передавать сигналы со сверхсветовой скоростью (что запрещено теорией относительности), но — для придания смысла понятию «мгновенно» — требует также существования абсолютного или универсального времени, от которого теория относительности отказалась в пользу индивидуального времени.

Эйнштейн знал об этой трудности с 1907 г., когда еще работал в бернском патентном бюро, но только в 1911 г. в Праге



(Kr-89). Образовавшееся ядро колеблется и является нестабильным

При распаде высвобождается в среднем 2,4 нейтрона и 215 МэВ энергии

(n). Нейтроны могут запустить цепную реакцию

Уравнение Эйнштейна связывает энергию E , массу m и скорость света с таким образом, что небольшая масса эквивалентна колоссальному количеству энергии:
 $E = mc^2$.



Связанный нейтрон



Протон



Свободный нейтрон

Гамма-излучение

(n)

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

Нейтрон, образовавшийся при распаде исходного U-235, ударяет другое ядро. Это вызывает его распад и запускает цепную реакцию дальнейших столкновений.

Если реакция способна самопроизвольно нарастать, ее называют критической, а соответствующую массу U-235 — критической массой.

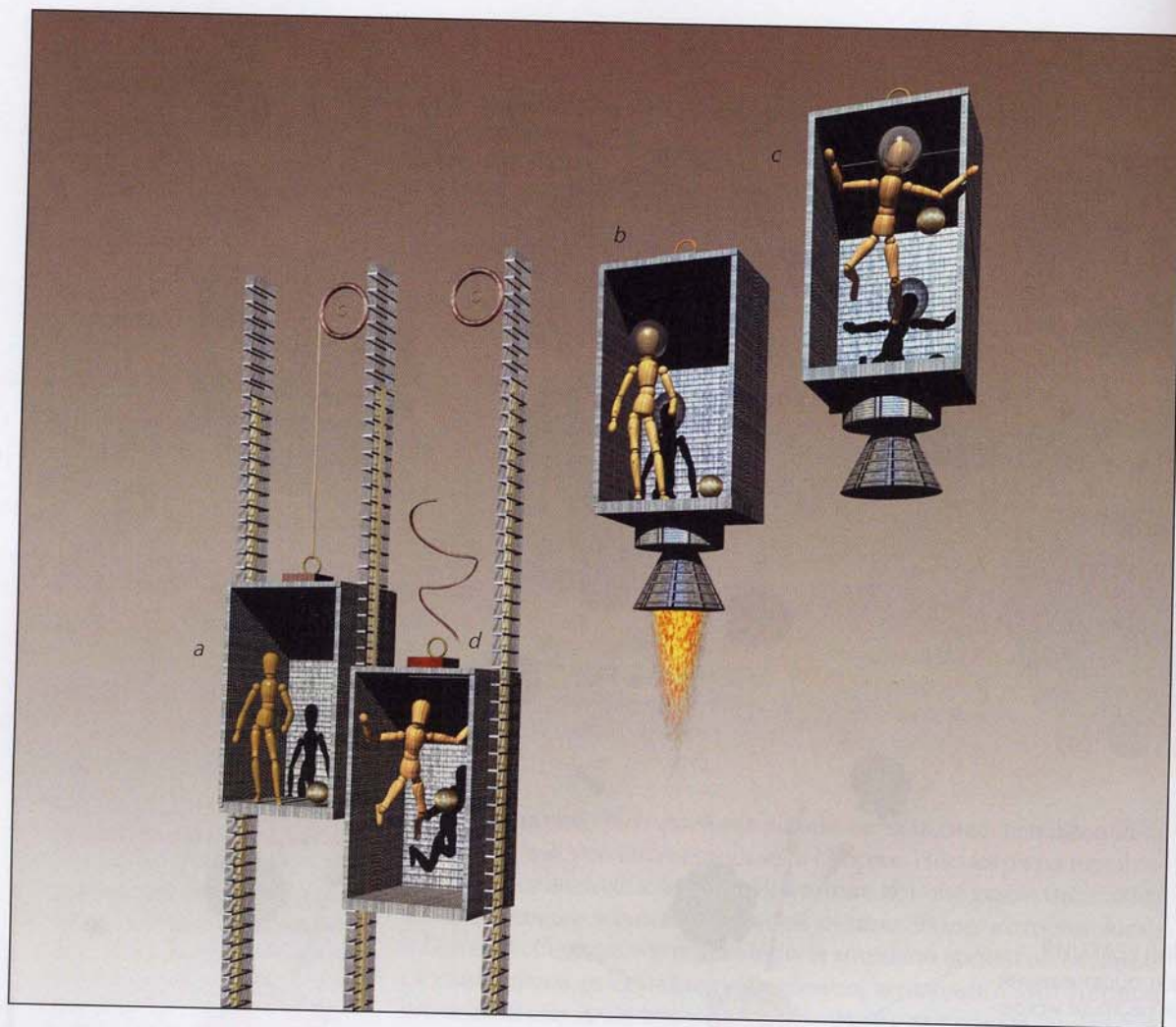


Рис. 1.9

Наблюдатель в контейнере не ощущает разницы между пребыванием в неподвижном лифте на Земле (а) и перемещением в ракете, движущейся с ускорением в свободном пространстве (b).

Отключение двигателя ракеты (с) ощущалось бы точно так же, как свободное падение лифта на дно шахты (d).

начал серьезно думать над проблемой. Он понял, что есть тесная связь между ускорением и гравитационным полем. Находясь в небольшом замкнутом помещении, например в лифте, нельзя сказать, покоится ли оно в земном гравитационном поле или ускоряется ракетой в открытом космосе. (Конечно, это было задолго до появления сериала «Звездный путь»*, и Эйнштейн скорее представлял себе людей в лифте, чем в космиче-

* Этот знаменитый американский фантастический сериал рассказывает о приключениях исследовательского звездолета «Энтерпрайз», способного двигаться во много раз быстрее света при помощи варп-двигателей, искривляющих пространство (от англ. warp — искривление). Съемки начались в 1966 г. и с перерывами продолжаются по настоящее время.



Рис. 1.10



Рис. 1.11

ском корабле.) Но в лифте нельзя долго ускоряться или свободно падать: все быстро закончится катастрофой (рис. 1.9).

Если бы Земля была плоской, мы могли бы с равным успехом приписать падение яблока на голову Ньютона как тяготению, так и тому, что Ньютон вместе с поверхностью Земли ускоренно двигался вверх (рис. 1.10). Такой эквивалентности между ускорением и гравитацией не наблюдается, однако, на круглой Земле: люди на противоположных сторонах земного шара должны были бы ускоряться в разных направлениях, оставаясь при этом на постоянном расстоянии друг от друга (рис. 1.11).

Но ко времени возвращения в Цюрих в 1912 г. в голове Эйнштейна уже сложилось понимание, что эквивалентность

Будь Земля плоской (рис. 1.10), с равным основанием можно было бы сказать, и что яблоко упало на голову Ньютона под действием гравитации, и что Земля вместе с Ньютоном двигалась с ускорением вверх. Эта эквивалентность не работает для сферической Земли (рис. 1.11), поскольку люди на противоположных сторонах земного шара должны удаляться друг от друга. Эйнштейн обошел это препятствие, введя искривленное пространство-время.

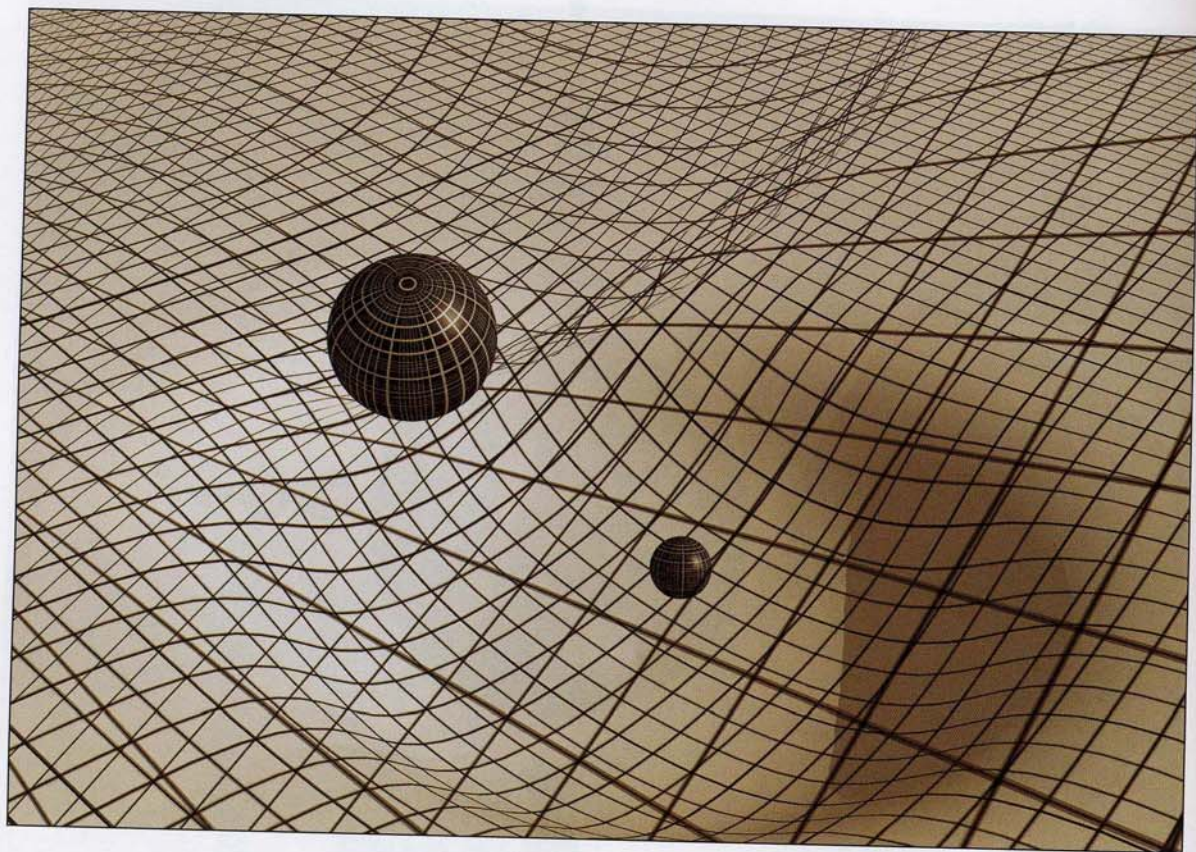


Рис. 1.12
ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА-
ВРЕМЕНИ

Ускорение и гравитация могут быть эквивалентны, только если массивное тело искривляет пространство-время, тем самым изгибая траектории объектов в своей окрестности.

должна работать, если пространство-время окажется искривленным, а не плоским, как считалось в прошлом. Идея состояла в том, что масса и энергия должны изгибать пространство-время, но как именно — это еще предстояло определить. Такие объекты, как яблоки или планеты, должны стремиться к тому, чтобы двигаться сквозь пространство-время по прямым линиям, но их пути выглядят искривленными гравитационным полем, потому что искривлено само пространство-время (рис. 1.12).

С помощью своего друга Марселя Гроссмана Эйнштейн изучил теорию искривленных пространств и поверхностей, которая была разработана ранее Георгом Фридрихом Риманом. Но Риман думал только об искривленном пространстве. Эйнштейн понял, что искривляется пространство-время. В 1913 г. Эйнштейн и Гроссман совместно написали статью, в которой выдвинули идею, что сила, о которой мы думаем как о гравитации, — это лишь проявление того, что пространство-время искривлено. Однако из-за ошибки Эйнштейна (и ему, как всем нам, свойственно было ошибаться), им не удалось найти уравне-



Professor Einstein

ния, которые связывают кривизну пространства-времени с находящимися в нем массой и энергией. Эйнштейн продолжил работать над проблемой в Берлине, где его не беспокоили домашние дела и практически не затронула война, и в итоге нашел правильные уравнения в ноябре 1915 г. Во время поездки в Гёттингенский университет летом 1915 г. он обсудил свои идеи с математиком Давидом Гильбертом, и тот независимо вывел те же самые уравнения на несколько дней раньше Эйнштейна. Тем не менее сам Гильберт признавал, что честь создания новой теории принадлежит Эйнштейну. Это была идея последнего — связать гравитацию с искривлением пространства-времени. И надо отдать должное цивилизованности тогдашнего германского государства, за то что научные дискуссии и обмен идеями могли без помех продолжаться даже в военное время. Какой контраст с эпохой нацизма, которая наступила двадцатью годами позже!

Новая теория искривленного пространства-времени получила название общей теории относительности, чтобы отличать ее от первоначальной теории, которая не включала гравитацию и ныне известна как специальная теория относительности. Она получила очень эффектное подтверждение в 1919 г., когда британская экспедиция наблюдала в Западной Африке незначительное изгибание света звезды, проходящего вблизи Солнца во время затмения (рис. 1.13). Это было прямым доказательством того, что пространство и время искривляются, и стимулировало самый глубокий пересмотр представлений о Вселенной, в которой мы живем, с тех пор как Евклид написал свои «Начала» около 300 г. н. э.



Albert Einstein™

low

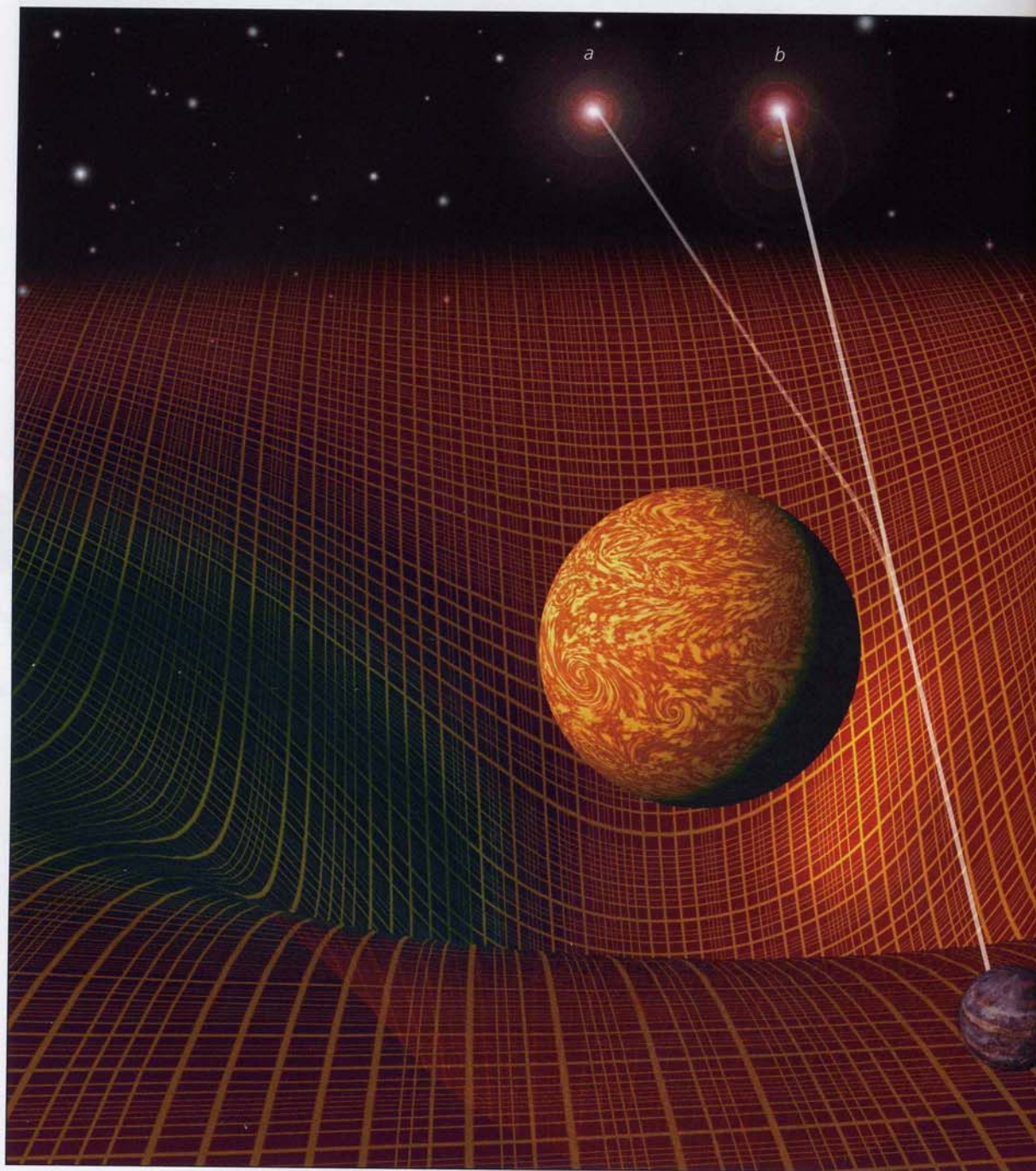




Рис. 1.13. ИСКРИВЛЕНИЕ СВЕТА

Свет звезды проходит вблизи Солнца и отклоняется, поскольку Солнце искривляет пространство-время (а). Это приводит к небольшому смещению видимого положения звезды при наблюдении с Земли (б). Увидеть такое можно во время затмения.

Общая теория относительности Эйнштейна превратила пространство и время из пассивного фона, на котором развиваются события, в активных участников динамических процессов во Вселенной. И отсюда выросла великая задача, которая остается на переднем крае физики XXI века. Вселенная заполнена материей, и эта материя искривляет пространство-время таким образом, что тела падают друг на друга. Эйнштейн обнаружил, что его уравнения не имеют решения, которое описывало бы статическую, неизменную во времени Вселенную. Вместо того чтобы отказаться от такой вечной Вселенной, в которую он верил наряду с большинством других людей, Эйнштейн подправил свои уравнения, добавив в них член, названный космологической постоянной, который искривлял пространство противоположным образом, так чтобы тела разлетались. Отталкивающий эффект космологической постоянной мог сбалансировать эффект притяжения материи, тем самым позволяя получить статическое решение для Вселенной. Это была одна из величайших упущенных возможностей в теоретической физике. Если бы Эйнштейн сохранил первоначальные уравнения, он мог бы предсказать, что Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. На деле же возможность меняющейся во времени Вселенной не рассматривалась всерьез вплоть до наблюдений, выполненных в 1920-х гг. на 100-дюймовом телескопе обсерватории Маунт-Вилсон.

Эти наблюдения обнаружили, что чем дальше находится другая галактика, тем быстрее она от нас удаляется. Вселенная расширяется таким образом, что расстояние между любыми двумя галактиками со временем постоянно увеличивается (рис. 1.14). Это открытие сделало ненужной космологическую постоянную, введенную, чтобы обеспечивать статическое решение для Вселенной. Позднее Эйнштейн называл космологическую постоянную величайшей ошибкой в своей жизни. Однако, похоже, она вовсе не была ошибкой: недавние наблюдения, описанные в главе 3, говорят о том, что в действительности космологическая постоянная может иметь небольшое, отличное от нуля значение.

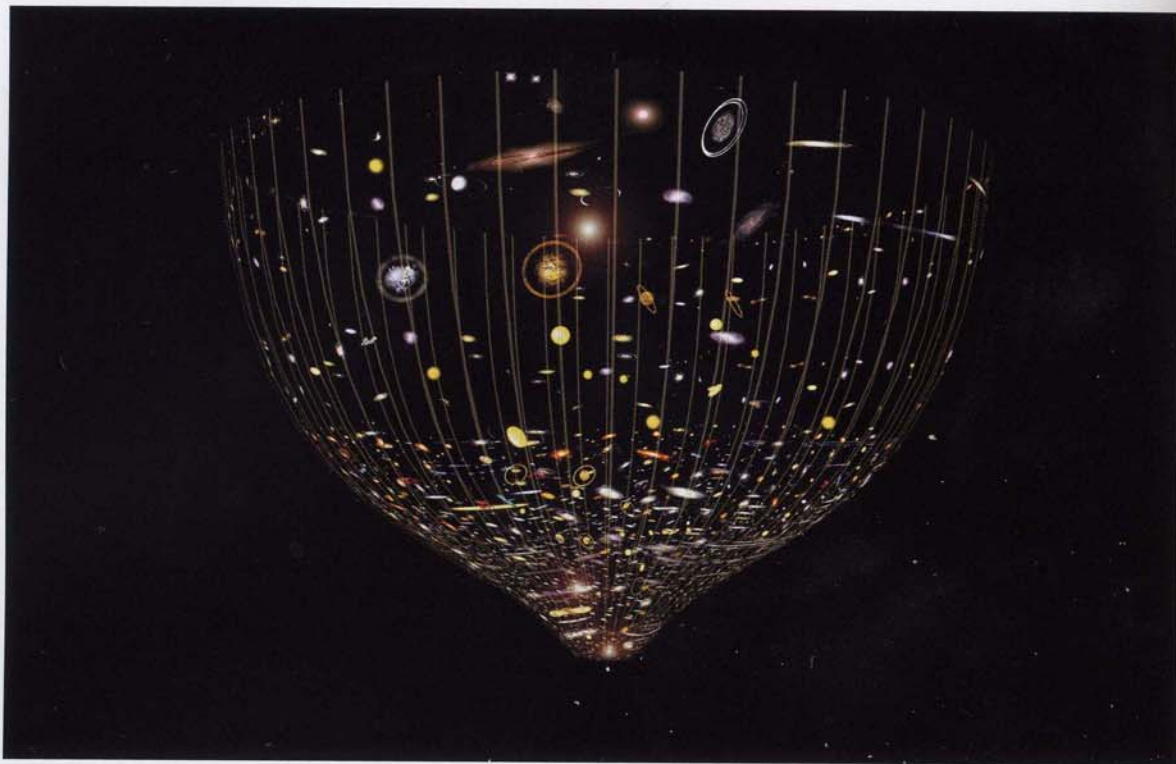
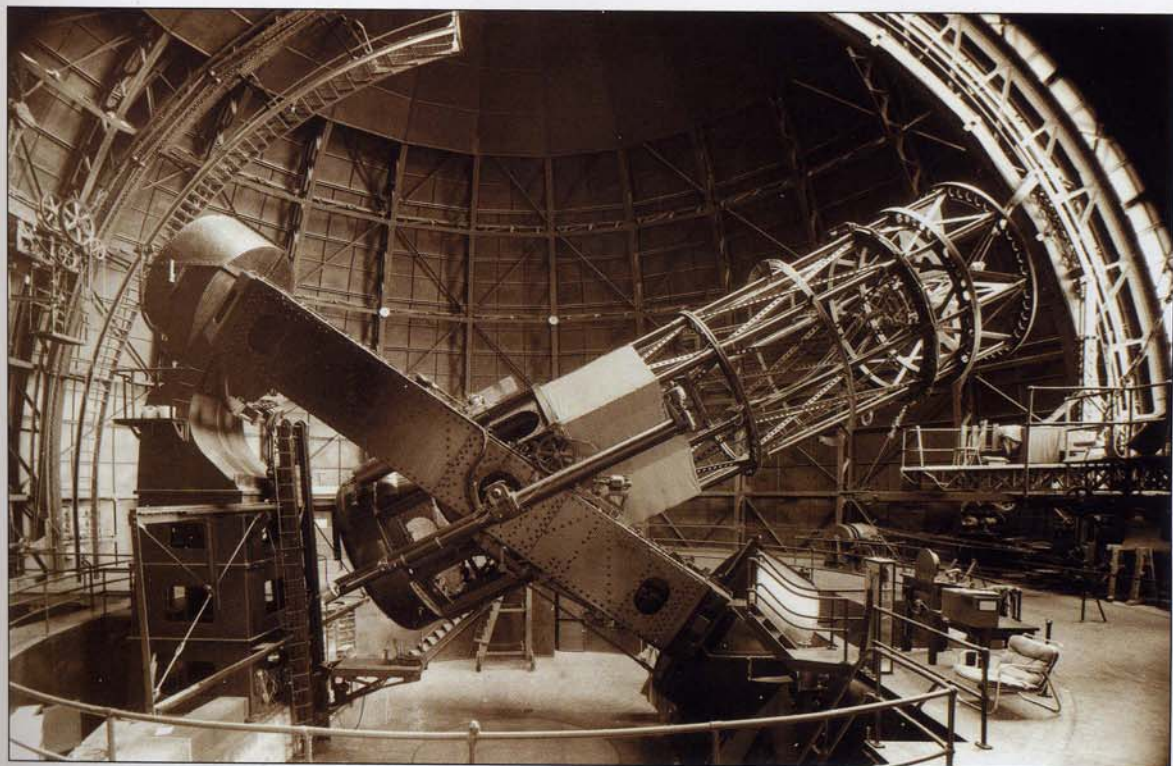


Рис. 1.14
Наблюдения за галактиками говорят о том, что Вселенная расширяется: расстояния между почти любой парой галактик увеличивается.

Общая теория относительности радикально изменила содержание дискуссий о происхождении и судьбе Вселенной. Статическая Вселенная может существовать вечно или быть создана в ее нынешнем виде некоторое время назад. Однако если галактики сейчас разбегаются, это означает, что в прошлом они должны были располагаться ближе. Около 15 миллиардов лет назад они буквально сидели друг на друге и плотность была очень высокой. Это было состояние «первичного атома», как назвал его католический священник Жорж Леметр, первым начавший изучать рождение Вселенной, которое мы теперь именуем Большим взрывом.

Эйнштейн, видимо, никогда не воспринимал Большой взрыв всерьез. Он, похоже, считал, что простая модель однородного расширения Вселенной должна нарушиться, если попытаться проследить движения галактик назад во времени, и что небольшие боковые скорости галактик приведут к тому, что они не столкнутся. Он считал, что ранее Вселенная могла находиться в фазе сжатия, но еще при весьма умеренной плотности испытать отражение и перейти к нынешнему расширению. Однако, как нам теперь известно, для того чтобы ядерные реакции в ран-



ней Вселенной смогли наработать то количество легких элементов, которое мы наблюдаем, плотность должна была достигать по крайней мере тонны на кубический сантиметр, а температура — десяти миллиардов градусов. Более того, наблюдения космического микроволнового фона указывают на то, что плотность, вероятно, достигала триллиона триллионов триллионов триллионов триллионов триллионов (1 с 72 нулями) тонн на кубический сантиметр. Нам также известно, что общая теория относительности Эйнштейна не позволяет Вселенной отразиться, перейдя из фазы сжатия в фазу расширения. Как будет рассказано в главе 2, мы с Роджером Пенроузом смогли показать: из общей теории относительности вытекает, что Вселенная началась с Большого взрыва. Так что теория Эйнштейна действительно предсказывает, что время имеет начало, хотя ему самому эта идея никогда не нравилась.

Еще менее охотно Эйнштейн признавал предсказание общей теории относительности о том, что для массивных звезд время должно прекращать свое течение, когда их жизнь заканчивается и они не могут больше генерировать достаточно тепла для сдерживания собственной силы притяжения, которая стре-

*Стодюймовый телескоп
Хукера в обсерватории
Маунт-Вилсон*



Рис. 1.15

Когда массивная звезда исчерпывает свои запасы ядерного топлива, она теряет тепло и сжимается. Искривление пространства-времени становится столь сильным, что возникает черная дыра, из которой свет не может вырваться. Внутри черной дыры наступает конец времени.

мится уменьшить их размеры. Эйнштейн полагал, что такие звезды должны приходить к равновесному конечному состоянию, но теперь мы знаем, что для звезд, вдвое превышающих по массе Солнце, подобного конечного состояния не существует. Такие звезды будут сжиматься, пока не станут черными дырами — областями пространства-времени, настолько искривленными, что свет не может выйти из них наружу (рис. 1.15).

Как показали мы с Пенроузом, из общей теории относительности следует: внутри черной дыры время заканчивается, как для самой звезды, так и для несчастного астронавта, которому случится туда упасть. Однако и начало, и конец времени будут точками, в которых уравнения общей теории относительности перестают работать. В частности, теория не может предсказать, что должно образоваться из Большого взрыва. Кое-кто видит в этом проявление божественной свободы, возможность запустить развитие Вселенной любым угодным Богу способом, но другие (включая меня) чувствуют, что в начальный момент Вселенная должна управляться теми же законами, что и в другие времена. В главе 3 описаны некоторые успехи, достигнутые на пути к этой цели, но у нас пока нет полного понимания происхождения Вселенной.

Причина, по которой общая теория относительности перестает работать в момент Большого взрыва, состоит в ее несовместимости с квантовой теорией, другой великой революционной концепцией XX века. Первый шаг в сторону квантовой теории был сделан в 1900 г., когда Макс Планк в Берлине открыл, что свечение разогретого докрасна тела удается объяснить, если свет испускается и поглощается только дискретными порциями — квантами. В одной из своих основополагающих статей, написанных в 1905 г., в период работы в патентном бюро, Эйнштейн показал, что планковская гипотеза квантов позволяет объяснить так называемый фотоэлектрический эффект — способность металлов испускать электроны, когда на них падает свет. На этом основаны современные детекторы света и телекамеры, и именно за эту работу Эйнштейн был награжден Нобелевской премией по физике.

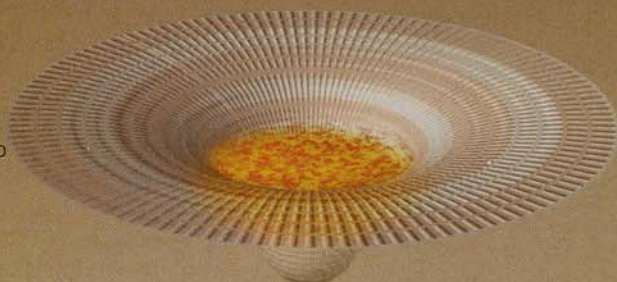
Эйнштейн продолжил работать над квантовой идеей в 1920-х гг., но он был глубоко обеспокоен трудами Вернера Гейзенберга в Копенгагене, Пола Дирака в Кембридже и Эрвина Шрёдингера в Цюрихе, которые разработали новую картину физической реальности, получившую название квантовой



3)
В черной дыре
наступает конец
времени



2)
Искривление нарастает по
мере сжатия звезды



1)
Пространство-время
искривляется вокруг
массивной звезды,
сжигающей ядерное топливо





Albert Einstein™



Альберт Эйнштейн
с куклой, изображающей его
самого, вскоре после переезда
в Америку

механики. Крохотные частицы лишились определенного положения и скорости. Чем точнее мы определим положение частицы, тем менее точно мы сможем измерить ее скорость, и наоборот. Эйнштейн был в ужасе от этой случайности и непредсказуемости в фундаментальных законах и так никогда полностью и не принял квантовой механики. Его чувства нашли выражение в знаменитом изречении: «Бог не играет в кости». Между тем большинство остальных ученых согласились с корректностью новых квантовых законов, которые великолепно согласовывались с наблюдениями и давали объяснения целому ряду прежде необъяснимых явлений. Эти законы лежат в основе современных достижений химии, молекулярной биологии и электроники — технологий, которые преобразили мир за последние полвека.

В декабре 1932 г., поняв, что нацисты вот-вот придут к власти, Эйнштейн покидает Германию и четыре месяца спустя отказывается от немецкого гражданства. Оставшиеся 20 лет своей жизни он провел в США, в Принстоне, штат Нью-Джерси, где работал в Институте перспективных исследований.

Многие немецкие ученые были евреями по национальности, а нацисты начали кампанию против «еврейской науки», что в числе прочих причин помешало Германии создать атомную бомбу. Эйнштейн и его теория относительности стали основными мишенями этой кампании. Была даже выпущена книга «Сто авторов против Эйнштейна», на что этот последний заметил: «Зачем сто? Если бы я был неправ, хватило бы одного». После Второй мировой войны он настаивал на том, чтобы союзники учредили всемирное правительство для контроля над ядерным оружием. В 1952 г. ему предложили стать президентом Государства Израиль, но Эйнштейн это предложение отклонил. Однажды он сказал: «Политика существует для мгновения, а уравнения — для вечности». Уравнения общей теории относительности Эйнштейна — лучшая эпитафия и памятник для него. Они просуществуют столько же, сколько Вселенная.

За последнее столетие мир изменился гораздо сильнее, чем за все предыдущие века. Причиной тому послужили не новые политические или экономические доктрины, а достижения технологии, которые стали возможны благодаря прогрессу фундаментальных наук. И кто может лучше символизировать этот прогресс, чем Альберт Эйнштейн?





Albert Einstein™

ГЛАВА 2

ФОРМА ВРЕМЕНИ

*О том, что теория относительности
придает времени форму и как это можно примирить
с квантовой теорией*



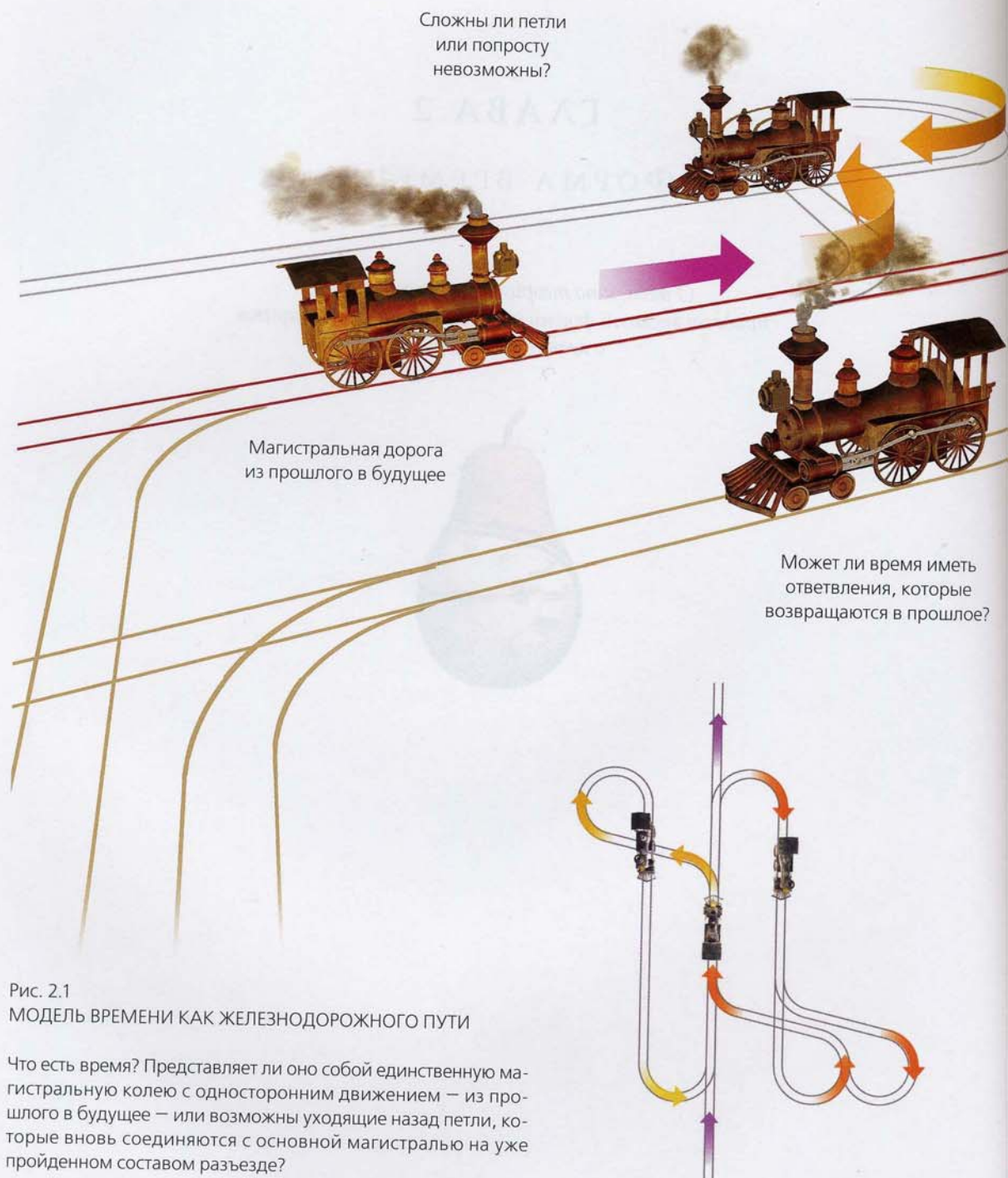
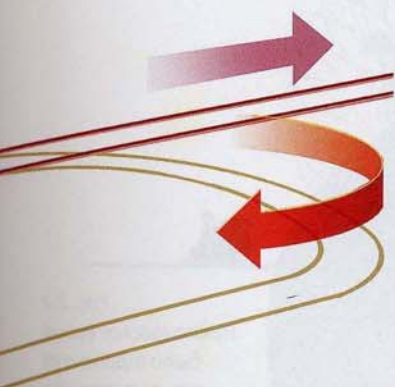


Рис. 2.1
МОДЕЛЬ ВРЕМЕНИ КАК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Что есть время? Представляет ли оно собой единственную магистральную колею с односторонним движением — из прошлого в будущее — или возможны уходящие назад петли, которые вновь соединяются с основной магистралью на уже пройденном составе разъезде?



Что такое время? Тот ли оно вечно катящийся поток, что смывает все наши мечты, как говорится в старинном псалме?* Или это колея железной дороги? Возможно, у нее есть петли и кольца, так что вы можете, продолжая движение вперед, вернуться к станции, которую уже миновали (рис. 2.1).

Чарльз Лэмб в XIX веке писал: «Ничто не озадачивает меня так, как время и пространство. И ничто не беспокоит меня меньше, чем время и пространство, поскольку я никогда не думаю о них». Большинство из нас почти никогда не беспокоится о времени и пространстве, чем бы они ни были; но все мы иногда задумываемся, что же такое время, откуда оно взялось и куда нас ведет.

Любая разумная научная теория, касается ли она времени или любого другого предмета, должна, по моему мнению, основываться на наиболее работоспособной философии науки — позитивистском подходе, который был разработан Карлом Поппером и другими. Согласно этому образу мысли научная теория — это математическая модель, которая описывает и систематизирует производимые нами наблюдения. Хорошая теория описывает широкий круг явлений на базе нескольких простых постулатов и дает ясные предсказания, которые можно проверить. Если предсказания согласуются с наблюдениями, теория выдерживает испытание, хотя никогда нельзя будет доказать ее правильность. С другой стороны, если наблюдения не соответствуют предсказаниям, придется либо отбросить, либо модифицировать теорию. (По крайней мере, предполагается, что так должно быть. На практике люди часто задаются вопросом о точ-

* Имеются в виду строки из 90-го псалма Исаака Уотса (1674–1748): «Время, как вечно катящийся поток, // Смывает всех своих детей; // Они летят забытые, словно сны, // Умиравшие с началом дня» (Time, like ever-rolling stream // Bears all its sons away; // They fly, forgotten, as a dream, // Dies at the op'ning day).

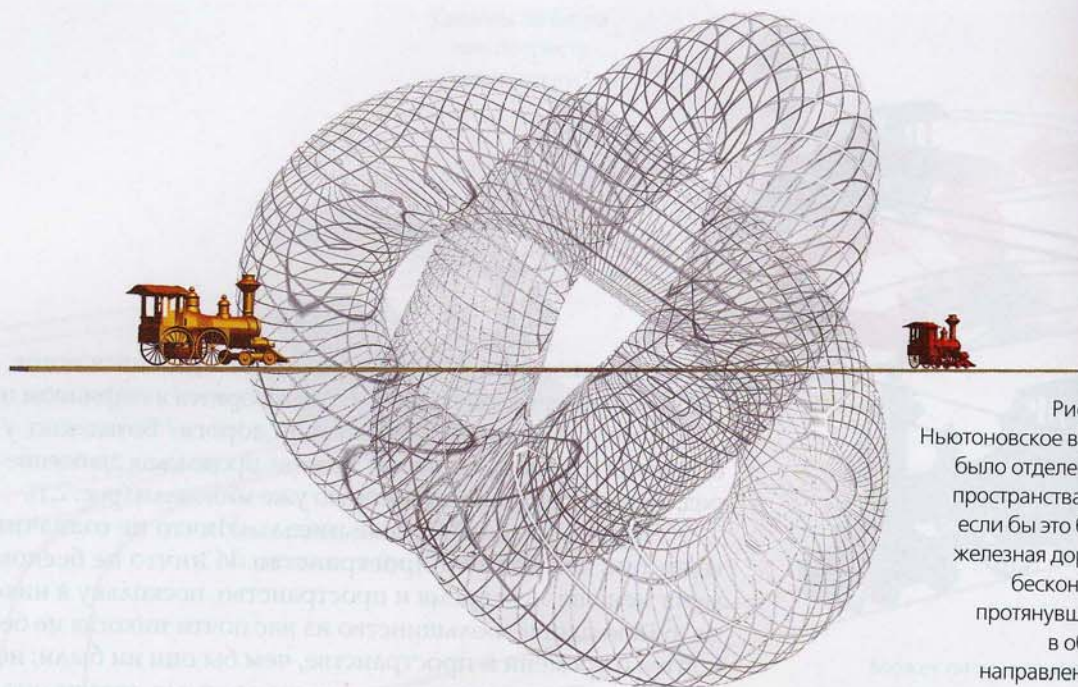
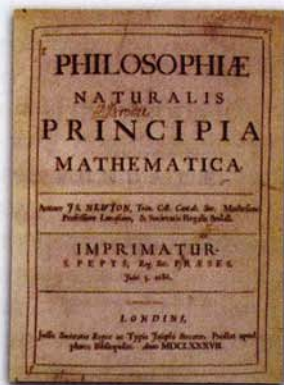


Рис. 2.2
Ньютоновское время
было отделено от
пространства, как
если бы это была
железная дорога,
бесконечно
протянувшаяся
в обоих
направлениях.



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

ности наблюдений, а также надежности и моральном облике тех, кто их выполнял.) Если принимать позитивистские принципы, как это делаю я, то невозможно сказать, что в действительности представляет собой время. В наших силах лишь описать то, что, как мы знаем, является очень хорошей математической моделью для времени, и перечислить, какие предсказания она позволяет сделать.

Исаак Ньютон дал нам первую математическую модель времени и пространства в своем труде «Principia Mathematica» («Математические начала натуральной философии»), опубликованном в 1687 г. Ньютон занимал в Кембридже кресло Лукасовского профессора математики*, которое ныне занимаю я, правда, в его время оно не имело электронного управления**.

* Речь идет о кафедре математики, основанной в 1663 г. Генри Лукасом (Henry Lucas) с условием, что занимающий ее профессор не должен участвовать в деятельности церкви. В 1980 г. Стивен Хокинг стал 17-м Лукасовским профессором.

** Хокинг намекает на инвалидное кресло, в котором вынужден перемещаться из-за тяжелой болезни. Он любит подшучивать над своим физическим состоянием.

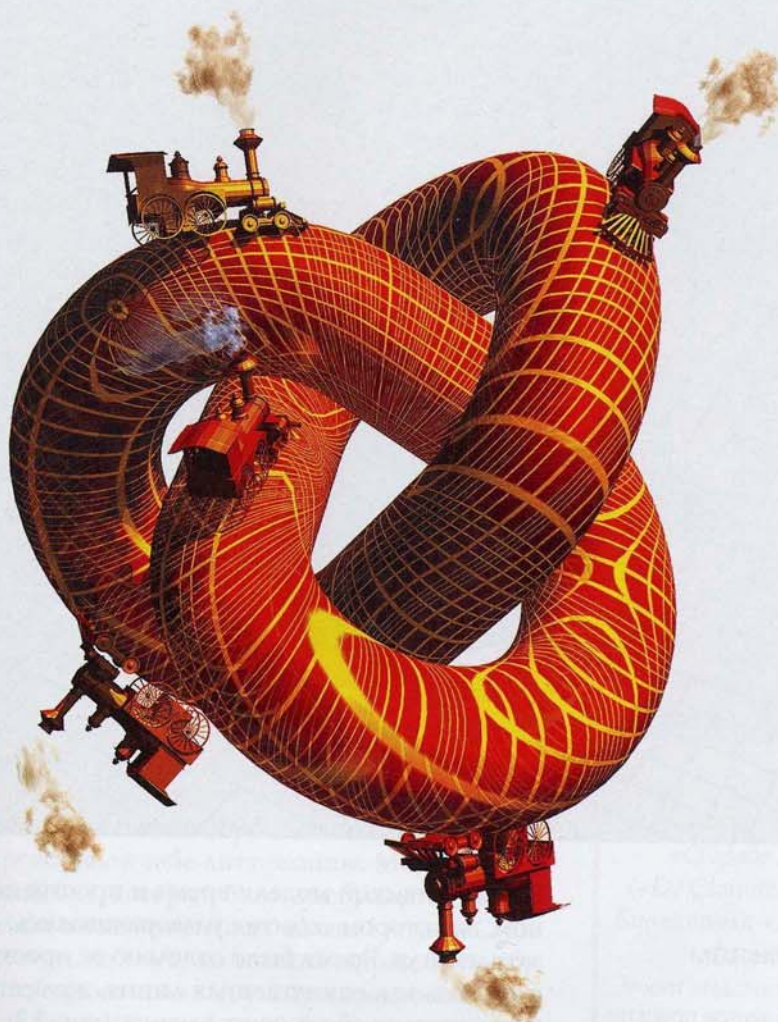


Рис. 2.3. ФОРМА И НАПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Теория относительности Эйнштейна, которая согласуется с большим числом экспериментов, говорит, что время и пространство неразделимо переплетены.

Невозможно искривить пространство, не затрагивая времени. Поэтому время имеет форму. Однако оно все равно движется в одном направлении, как паровозы на этом рисунке.

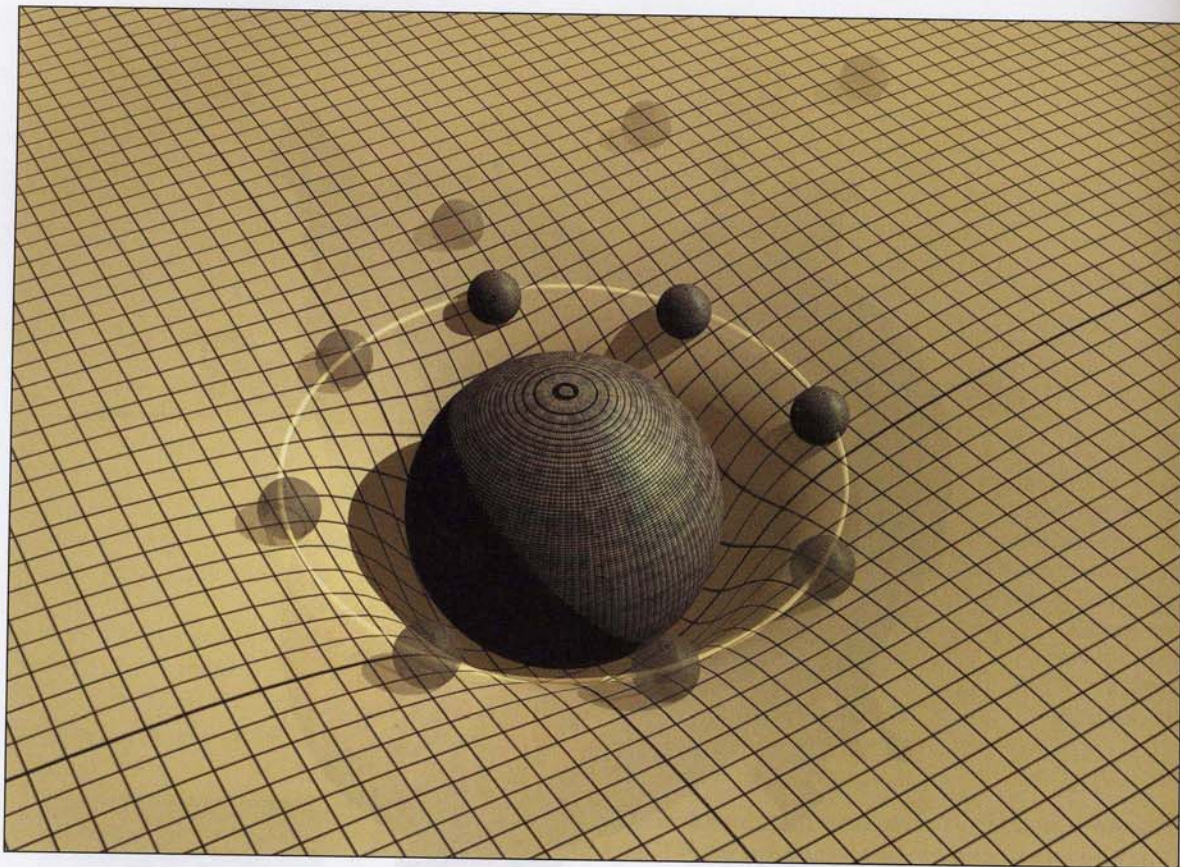


Рис. 2.4
АНАЛОГИЯ
С РЕЗИНОВЫМ ЛИСТОМ

Большой шар в центре представляет массивное тело, например звезду.

Под действием веса тела лист вблизи него искривляется. Шарик, катящийся по листу, отклоняется этой кривизной и движется вокруг большого шара, подобно тому как планеты в гравитационном поле звезды обращаются вокруг нее.

В ньютоновской модели время и пространство были тем фоном, на котором события разворачивались, но который они не затрагивали. Время было отделено от пространства и рассматривалось как единственная линия, железнодорожная колея, бесконечная в обоих направлениях (рис. 2.2). Само время считалось вечным в том смысле, что оно существовало и будет существовать всегда. В противоположность этому большинство людей полагало, что физический мир был создан в более или менее современном виде всего несколько тысяч лет назад. Это беспокоило философов, таких как немецкий мыслитель Иммануил Кант. Если Вселенная действительно создана, то зачем нужно было ждать целую вечность перед ее созданием? С другой стороны, если Вселенная существует вечно, то почему все, что должно произойти, еще не случилось, иначе говоря, почему история еще не закончилась? И в частности, почему Вселенная еще не достигла термодинамического равновесия с повсеместно одинаковой температурой?



Кант назвал эту проблему «антиномией чистого разума», поскольку она казалась ему логическим противоречием; она не имела решения. Но это было противоречием только в контексте ньютоновской математической модели, в которой время представляло собой бесконечную линию, не зависящую от того, что случается во Вселенной. Между тем, как было показано в главе 1, Эйнштейн в 1915 г. выдвинул совершенно новую математическую модель — общую теорию относительности. За годы, прошедшие с появления статьи Эйнштейна, мы добавили к ней кое-какие детали, но в целом наша модель по-прежнему основана на том, что предложил Эйнштейн. В этой и последующих главах будет описано, как развивались наши представления после публикации революционной статьи Эйнштейна. Это была история успешной работы большого числа людей, и я горжусь, что смог внести в нее свой небольшой вклад.

Общая теория относительности объединяет временное измерение с тремя измерениями пространства и образует то, что мы называем пространством-временем (рис. 2.3). Теория включает действие гравитации, утверждая, что наполняющие Вселенную вещество и энергия искривляют и деформируют пространство-время так, что оно перестает быть плоским. Объекты в пространстве-времени стремятся двигаться по прямым линиям, но поскольку оно само искривлено, их пути выглядят изогнутыми. Они движутся так, будто на них действует гравитационное поле.

В качестве грубой аналогии, которую не следует воспринимать буквально, представьте себе лист резины. Можно положить на него большой мяч, который будет изображать Солнце. Вес мяча продавит лист и вызовет его искривление вблизи Солнца. Если теперь запустить по листу маленький шарик, тот не будет катиться прямо от одного края к другому, а вместо этого станет двигаться вокруг большой массы, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца (рис. 2.4).

Эта аналогия неполна, поскольку в ней искривляется только двумерное сечение пространства (поверхность резинового листа), а время остается вовсе незатронутым, как в ньютоновской механике. Тем не менее в теории относительности, которая согласуется с большим числом экспериментов, время и пространство неразрывно связаны друг с другом. Нельзя добиться искривления пространства, не вовлекая также и время. Получается, что время имеет форму. Благодаря искривлениям пространство и время в общей теории относительности превращаются из пассивного фона, на котором развиваются события, в динамических участников происходящего. В теории Ньютона, где



Августин Блаженный.
Рисунок из его книги
«О граде Божьем»
(«De Civitate Dei»), XII в.
Библиотека «Лоренциана»,
Флоренция.
Этот мыслитель, живший
в V в. н. э., считал, что
времени не существовало
до сотворения мира.



время существует независимо от всего остального, можно спросить: что делал Бог до того, как Он создал Вселенную? Как говорил Августин Блаженный, не следует сводить эту тему к шуткам по примеру человека, сказавшего: «Он готовил ад для чрезмерно любопытных». Это слишком серьезный вопрос, над которым люди размышляли веками. Согласно Блаженному Августину, перед тем как Бог создал небеса и землю, Он вообще ничего не делал. На самом деле это очень близко к современным представлениям.

С одной стороны, в общей теории относительности время и пространство не существуют независимо от Вселенной и друг от друга. Они определяются посредством измерений, выполняемых внутри Вселенной, например по числу колебаний кварцевого кристалла в часах или по длине линейки. И совершенно ясно, что раз время определено подобным образом внутри Вселенной, то у него должны быть минимальный и максимальный отсчеты, иными словами, начало и конец. Не имеет никакого смысла спрашивать, что случилось до начала или после конца, поскольку нельзя указать таких моментов времени.

По-видимому, важно понять, действительно ли математическая модель общей теории относительности *предсказывает*, что Вселенная и само время должны иметь начало и конец. Общее для физиков-теоретиков, включая Эйнштейна, предубеждение состояло в том, что время должно быть бесконечным в обоих направлениях. С другой стороны, имелись неудобные вопросы о сотворении мира, которые, как казалось, находятся вне компетенции науки. Такие решения уравнений Эйнштейна, в которых время имело начало или конец, были известны, но они получались в очень специальных высокосимметричных частных случаях. Считалось, что для реального тела, коллапсирующего под действием собственной гравитации, давление и боковые скорости должны предотвратить падение всего вещества в одну точку, в которой плотность возрастает до бесконечности. Аналогично, если проследить назад во времени расширение Вселенной, могло оказаться, что материя вовсе не была выброшена из одной точки с бесконечной плотностью, называемой сингулярностью, которая может служить началом или концом времени.

В 1963 г. двое советских ученых, Евгений Лифшиц и Исаак Халатников, объявили: они располагают доказательством того, что все решения уравнений Эйнштейна с сингулярностью имеют особое распределение материи и скоростей. Вероятность того,

Наблюдатель смотрит назад
сквозь время

Галактики,
как они выглядели недавно

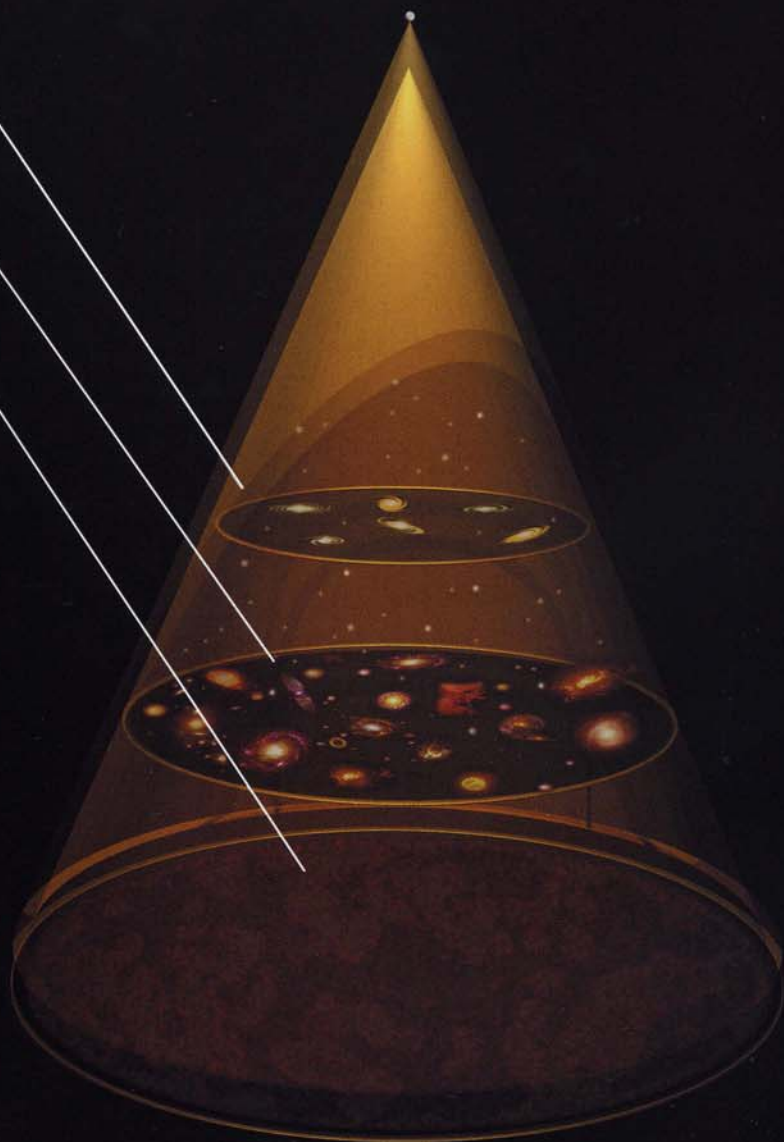
Галактики,
как они выглядели 5 млрд лет назад

Фоновое излучение



Рис. 2.5
СВЕТОВОЙ КОНУС
НАШЕГО ПРОШЛОГО

Когда мы смотрим на далекие галактики, то видим Вселенную такой, какой она была в прошлом, поскольку свет распространяется с конечной скоростью. Если мы представим время вертикальной осью, а два пространственных измерения — горизонтальными осями, то свет, который сейчас достигает нас в верхней точке, движется к нам по поверхности конуса.



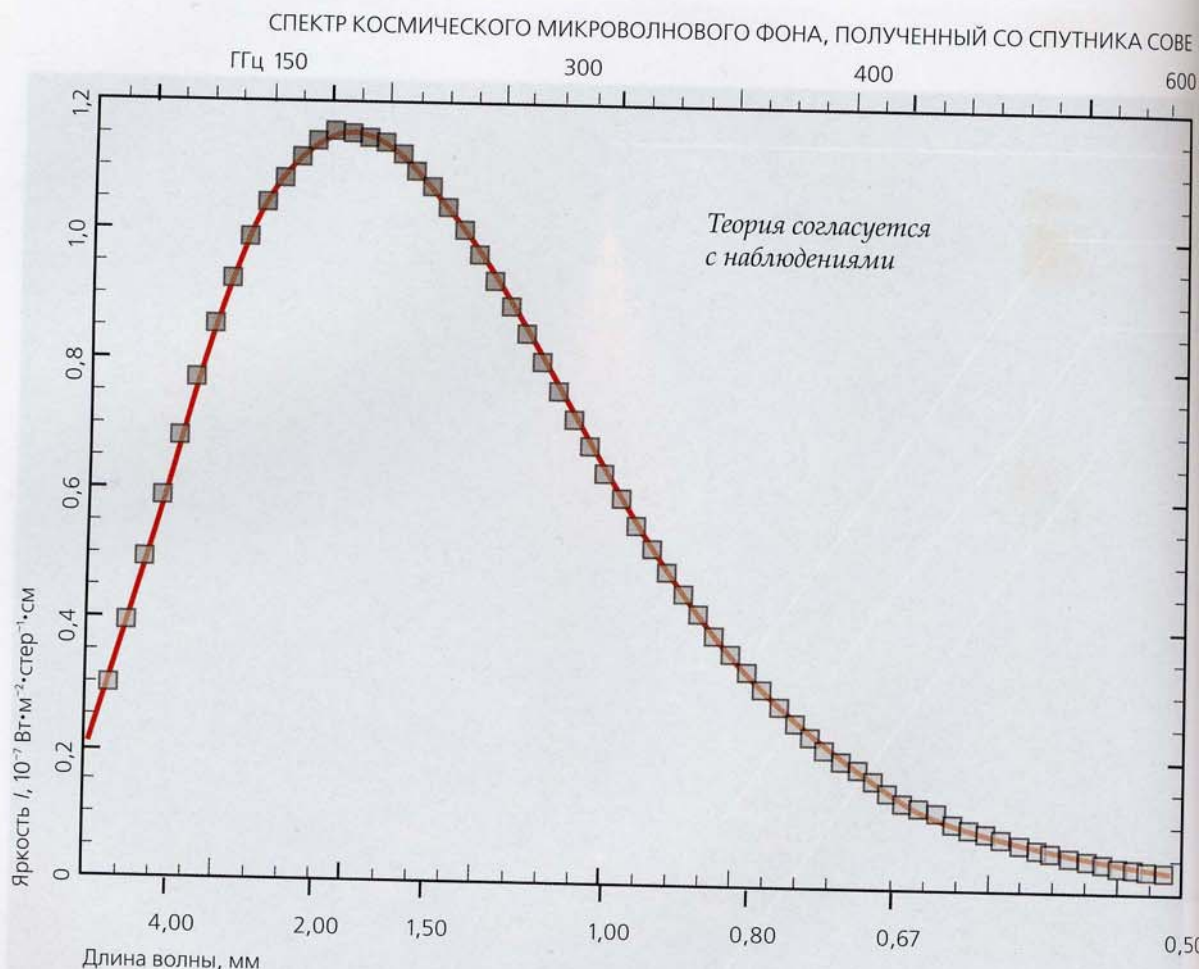
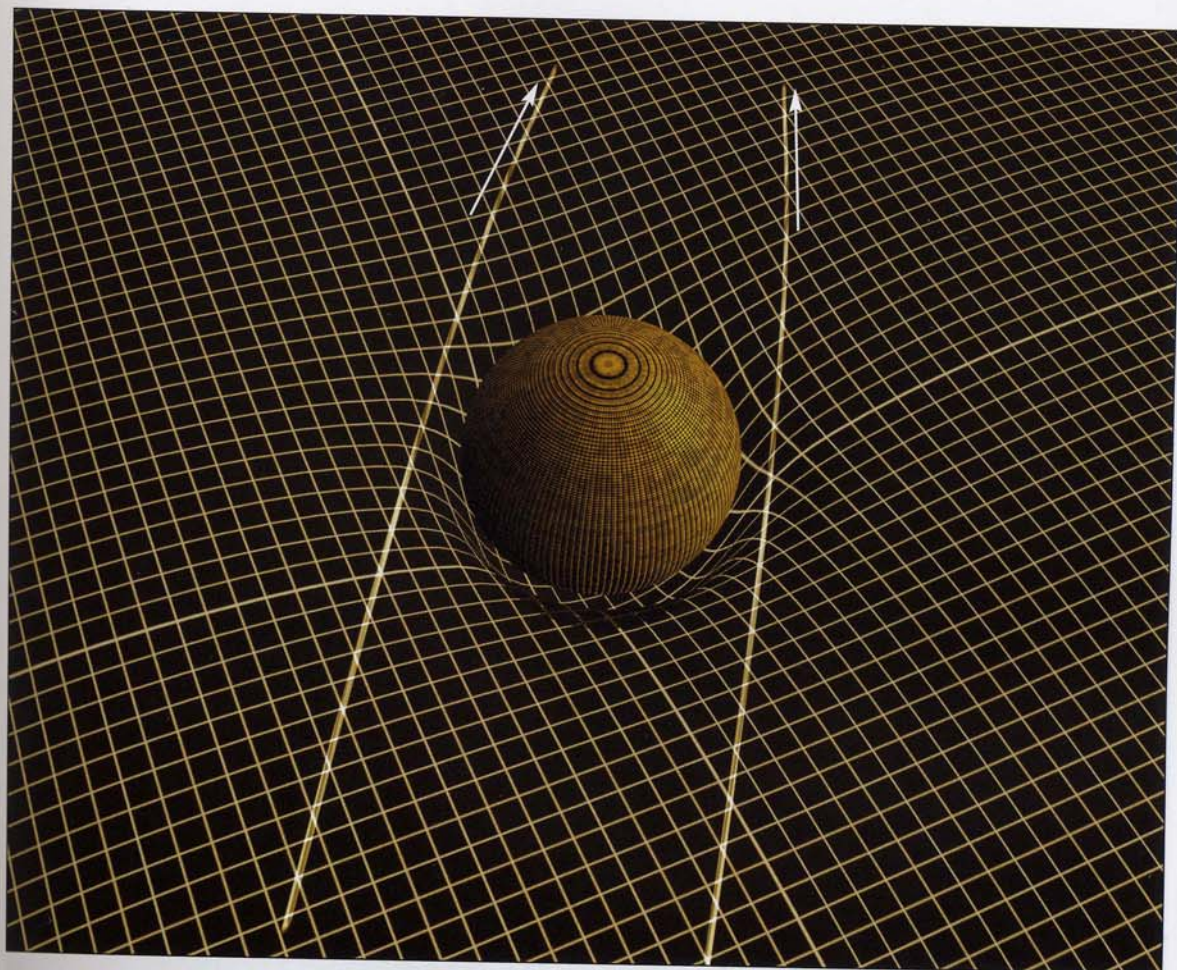


Рис. 2.6
ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА
МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА

Спектр космического микроволнового излучения, то есть распределение его интенсивности по частотам, характерен для нагретого тела. Чтобы излучение пришло в тепловое равновесие, оно должно многократно рассеиваться на веществе. Это указывает на то, что в световом конусе нашего прошлого должно было быть достаточно вещества, чтобы вызвать его стягивание.

что решение, представляющее нашу Вселенную, имеет такое специальное распределение, была практически нулевой. Почти все решения, которые могут соответствовать нашей Вселенной, должны обходиться без сингулярности с бесконечной плотностью. Эре, в течение которой Вселенная расширяется, должна была предшествовать фаза сжатия, во время которой вещество падало само на себя, но избегало столкновения, разлетаясь вновь в современной фазе расширения. Если бы все обстояло именно так, то время могло бы длиться вечно — от бесконечного прошлого до бесконечного будущего.

Не все согласились с аргументами Лифшица и Халатникова. Мы с Роджером Пенроузом применили другой подход, основанный не на детальном изучении решений, а на глобальной

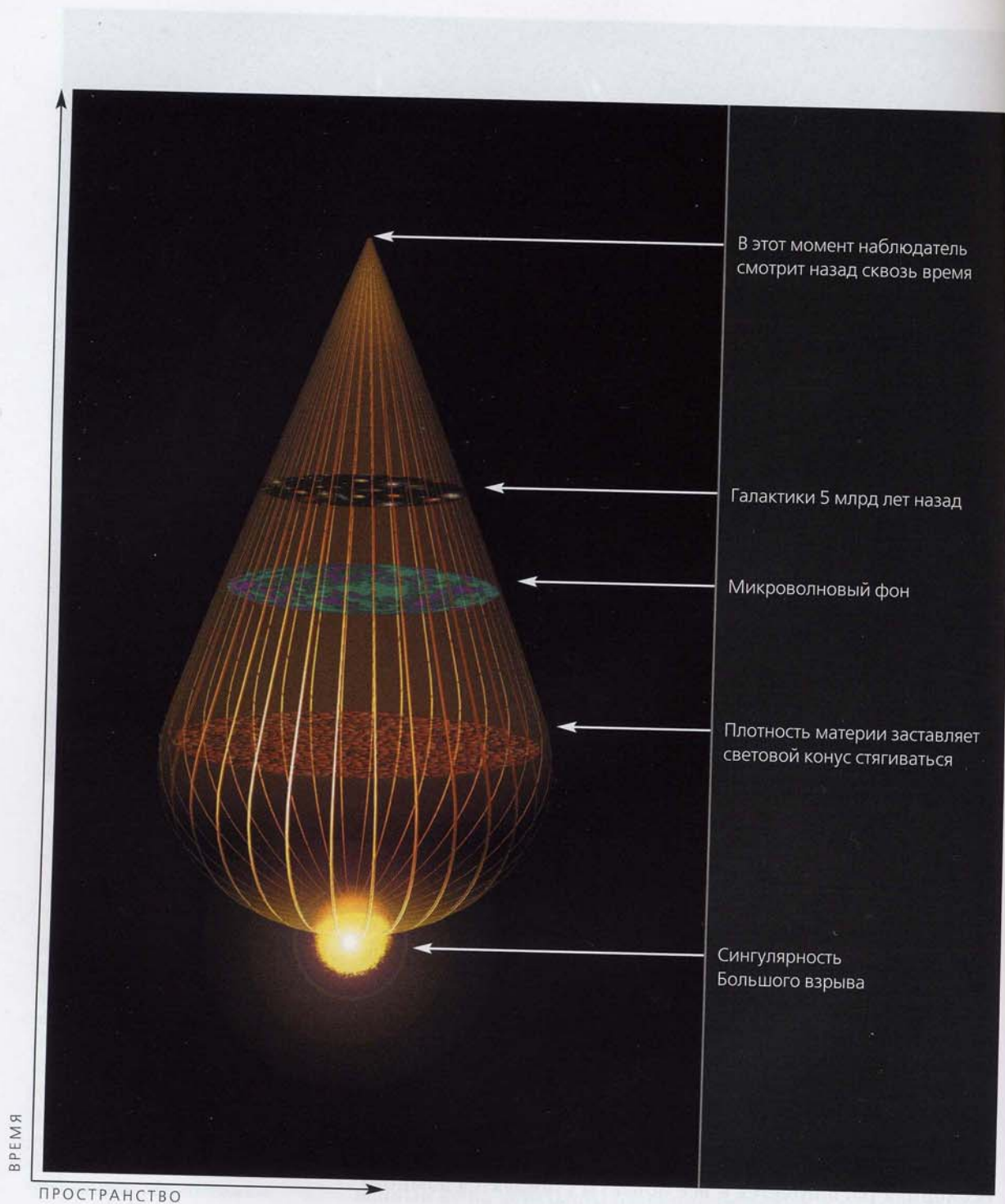


структуре пространства-времени. В общей теории относительности пространство-время искривляется не только находящимися в нем массивными объектами, но также энергией. Энергия всегда положительна, поэтому она всегда придает пространству-времени такую кривизну, которая сближает лучи друг с другом.

Рассмотрим световой конус прошлого (рис. 2.5), представляющий собой пути сквозь пространство-время лучей света далеких галактик, приходящих к нам в настоящее время. На диаграмме, где время направлено вверх, а пространство — в стороны, получается конус с вершиной, в которой находимся мы. По мере движения в прошлое, от вершины вниз по конусу, мы видим галактики во все более и более раннее время. Поскольку Вселенная расширяется и все объекты становятся намного

Рис. 2.7
ИСКРИВЛЕННОЕ
ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ

Поскольку гравитация вызывает притяжение, вещество всегда искривляет пространство-время так, что лучи света изгибаются один к другому.





ближе друг к другу, наш взгляд проходит через области со все большей плотностью материи. Мы наблюдаем слабый фон микроволнового излучения, который приходит к нам вдоль светового конуса прошлого из намного более раннего времени, когда Вселенная была значительно плотнее и горячее, чем сейчас. Настроивая приемник на разные частоты микроволн, мы можем измерить спектр излучения (распределение энергии по частотам). Мы обнаружили спектр, который характерен для излучения тела с температурой 2,7 градуса выше абсолютного нуля. Это микроволновое излучение малоприспособно для размораживания пищи, но сам факт, что его спектр столь точно соответствует излучению тела с температурой 2,7 градуса Кельвина, говорит о том, что оно должно приходить из области, непрозрачной для микроволн (рис. 2.6).

Итак, можно заключить, что наш световой конус прошлого, если проследить его назад, проходит через определенное количество вещества. Этого количества достаточно для искривления пространства-времени таким образом, чтобы лучи света в нашем световом конусе изогнулись навстречу друг другу (рис. 2.7).

По мере движения назад во времени поперечное сечение светового конуса прошлого достигнет максимального размера и вновь начнет уменьшаться. Наше прошлое имеет грушевидную форму (рис. 2.8).

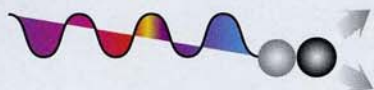
Следуя дальше вдоль светового конуса нашего прошлого, мы обнаружим, что положительная плотность энергии вещества заставляет лучи света загибаться друг к другу еще сильнее. Поперечное сечение светового конуса стягивается к нулевому размеру за конечное время. Это означает, что все вещество внутри светового конуса прошлого загнано в область, граница которой стягивается к нулю. Неудивительно, что мы с Пенроузом смогли доказать: в математической модели общей теории относитель-

Рис. 2.8. ГРУШЕВИДНОЕ ВРЕМЯ

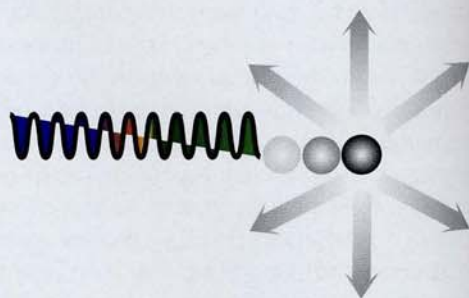
Если проследить световой конус нашего прошлого назад во времени, в ранней Вселенной он стянется под воздействием вещества. Вся Вселенная, которая доступна нашим наблюдениям, содержится в области, границы которой сжимаются до нуля в момент Большого взрыва. Это будет сингулярность, место, где плотность материи должна возрасти до бесконечности, а классическая общая теория относительности перестает работать.



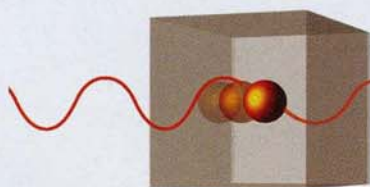
ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ



Низкочастотные волны искажают скорость частицы меньше



Высокочастотные волны искажают скорость частицы больше



Чем больше длина волны, используемая для наблюдения частицы, тем больше неопределенность положения этой последней



Чем меньше длина волны, используемая для наблюдения частицы, тем точнее определяется ее положение

Важным шагом к открытию квантовой теории стало выдвинутое в 1900 г. Максом Планком предположение, что свет всегда существует в форме небольших пакетов, которые он назвал квантами. Но хотя квантовая гипотеза Планка полностью объяснила наблюдаемый характер излучения горячих тел, полный масштаб ее следствий не осознавался до середины 1920-х гг., когда немецкий физик Вернер Гейзенберг сформулировал свой знаменитый

принцип неопределенности. Он заметил, что согласно гипотезе Планка чем точнее мы пытаемся измерить положение частицы, тем менее точно можем измерить ее скорость, и наоборот.

Более строго, он показал, что неопределенность положения частицы, умноженная на неопределенность ее импульса, всегда должна быть больше постоянной Планка, численное значение которой тесно связано с энергией, переносимой одним квантом света.



УРАВНЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА



Неопределенность
положения
частицы

×



Неопределенность
скорости частицы

×



Масса частицы

=

Не меньше постоянной Планка

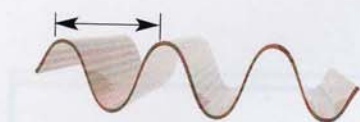
ности время должно иметь начало в виде того, что мы называем Большим взрывом. Аналогичные аргументы показывают, что время будет иметь конец, когда звезда или галактика коллапсирует под действием собственного тяготения и образует черную дыру. Мы обошли парадокс чистого разума Канта, отбросив его неявное предположение о том, что время имеет смысл независимо от Вселенной. Наша статья, доказывающая, что время имело начало, заняла второе место на конкурсе, организованном Фондом изучения гравитации (Gravity Research Foundation) в 1968 г., и мы с Роджером поделили щедрый приз в 300 долларов. Не думаю, что в том году какая-либо другая из поданных на конкурс работ имела столь непреходящую ценность.

Наша статья вызвала разнообразные отклики. Многих физиков она огорчила, но зато обрадовала тех религиозных лидеров, которые верили в акт Творения — здесь было его научное доказательство. Между тем Лифшиц и Халатников оказались в неловком положении. Они не могли ни оспорить математическую теорему, которую мы доказали, ни признать в условиях советской системы, что они ошиблись, а западные ученые оказались правы. И все же они сохранили лицо, найдя более общее семейство решений с сингулярностью, которое не было специальным в том смысле, в котором это относилось к их прежним решениям. Последнее позволило им объявить сингулярности, а также начало и конец времени советским открытием.

Большинство физиков по-прежнему инстинктивно не любят мысль о том, что время имеет начало или конец. Поэтому они отмечают, что данная математическая модель не

ПОЛЕ МАКСВЕЛЛА

В 1865 г. британский физик Джеймс Клерк Максвелл объединил все известные законы электричества и магнетизма. Теория Максвелла базируется на существовании «полей», которые передают действие из одного места в другое. Он догадался, что поля, которые передают электрические и магнитные возмущения, представляют собой динамические сущности: они могут колебаться и перемещаться в пространстве. Максвелловский синтез электромагнетизма можно выразить всего двумя уравнениями, которые описывают динамику этих полей. Он сам вывел первое важнейшее следствие своих уравнений — то, что электромагнитные волны всех частот распространяются в пространстве с одной и той же фиксированной скоростью, со скоростью света.



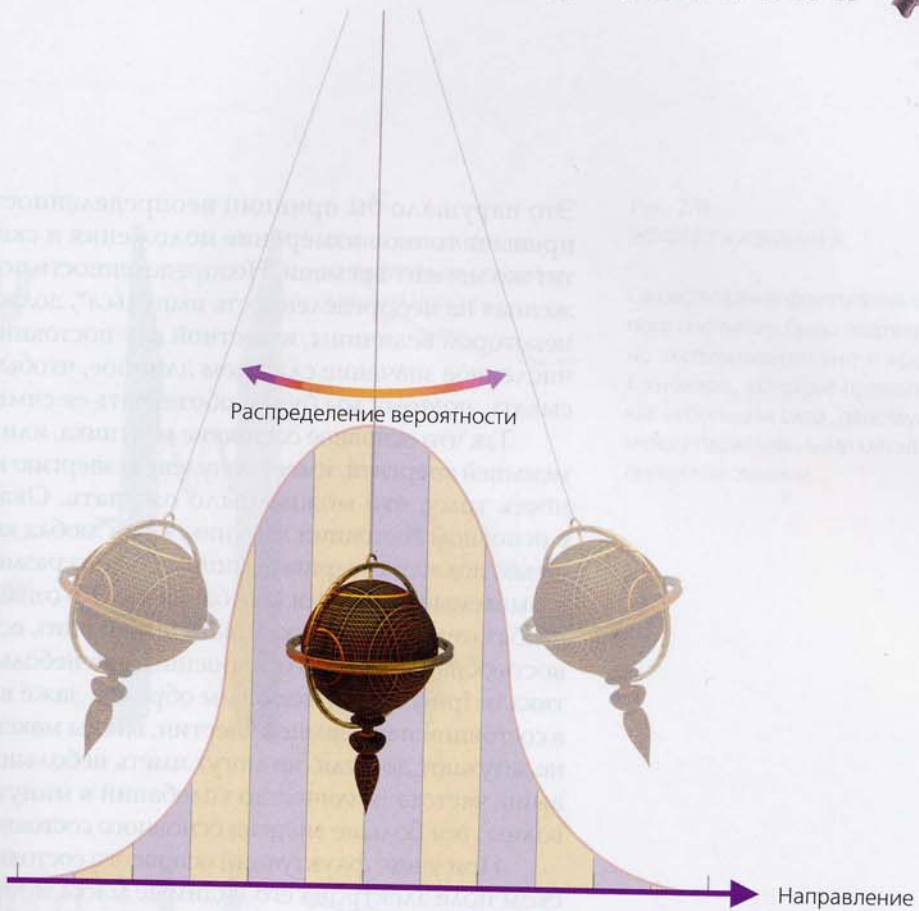
Длина волны — это расстояние между ее соседними гребнями



Рис. 2.9
ДВИЖЕНИЕ ВОЛНЫ
И КОЛЕБАНИЯ МАЯТНИКА

Электромагнитное излучение распространяется сквозь пространство как волна, в которой электрическое и магнитное поля колеблются, подобно маятнику, в направлении, поперечном движению самой волны. Излучение может состоять из колебаний полей с разными длинами волн.

может считаться хорошим описанием пространства-времени вблизи сингулярности. Причина состоит в том, что общая теория относительности, которая описывает силу гравитации, является, как отмечалось в главе 1, классической теорией и не учитывает неопределенности квантовой теории, которая управляет всеми другими известными нам силами. Эта несовместимость не играет никакой роли в большей части Вселенной на протяжении большей части времени, поскольку масштаб, в котором искривляется пространство-время, очень велик, а масштаб, в котором существенны квантовые эффекты, очень мал. Но вблизи сингулярности эти два масштаба становятся сравнимыми и квантовые гравитационные эффекты должны становиться существенными. Поэтому в теореме о сингулярности мы с Пенроузом в действительности установили, что наша классическая область пространства-времени ограничена со стороны прошлого и, возможно, со стороны будущего областями, в которых существенны эффекты квантовой гравитации. Чтобы понять происхождение и судьбу



Вселенной, нам необходима квантовая теория гравитации, и она будет предметом большей части этой книги.

Квантовые теории для таких систем, как атомы, с конечным числом частиц, были сформулированы в 1920-х гг. Гейзенбергом, Шрёдингером и Дираком. (Дирак также занимал когда-то мое кресло в Кембридже, но и при нем оно не было моторизовано.) Однако попытка распространить квантовые идеи на максвелловское (электромагнитное) поле, которое описывает электричество, магнетизм и свет, столкнулась с трудностями.

Можно представлять себе максвелловское поле состоящим из волн разной длины (длина волны — расстояние от одного ее гребня до другого). В волне поле колеблется от одного значения к другому, подобно маятнику (рис. 2.9).

Согласно квантовой теории основное состояние маятника, то есть состояние с наименьшей энергией, — это вовсе не покой в самой низкоэнергетической точке в направлении прямо вниз. В данном случае он имел бы одновременно определенное положение и определенную скорость, равную нулю.

Рис. 2.10
МАЯТНИК И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ВЕРОЯТНОСТИ

Согласно принципу Гейзенберга маятник не может висеть, указывая строго вниз, и обладать при этом нулевой скоростью. Квантовая теория предсказывает, что даже в состоянии наименьшей энергии он должен испытывать минимальные флуктуации.

Это означает, что положение маятника должно задаваться распределением вероятности. Если он находится в основном состоянии, то с наибольшей вероятностью будет указывать прямо вниз, но имеется также вероятность обнаружить его под небольшим углом к вертикали.



Это нарушало бы принцип неопределенности, который превращает точное измерение положения и скорости в один и тот же момент времени. Неопределенность положения, умноженная на неопределенность импульса*, должна быть больше некоторой величины, известной как постоянная Планка — ее численное значение слишком длинное, чтобы его здесь выписывать, поэтому мы будем обозначать ее символом $\hbar$.

Так что основное состояние маятника, или состояние с наименьшей энергией, имеет ненулевую энергию в противоположность тому, что можно было ожидать. Оказывается, даже в основном состоянии маятник, как и любая колебательная система, должен совершать минимального размера флуктуации, называемые нулевыми колебаниями. Это означает, что маятник необязательно будет указывать прямо вниз, есть также вероятность обнаружить его отклоненным на небольшой угол от вертикали (рис. 2.10). Подобным образом даже в вакууме, то есть в состоянии наименьшей энергии, волны максвелловского поля не затухают до нуля, но могут иметь небольшие размеры. Чем выше частота (количество колебаний в минуту) маятника или волны, тем больше энергия основного состояния.

При учете флуктуаций основного состояния в максвелловском поле электрона его видимые масса и заряд оказываются бесконечными, что, конечно, не соответствует наблюдениям. Однако в 1940-х гг. физики Ричард Фейнман, Джулиан Швингер и Синъитиро Томонага разработали согласованный метод устранения, или «вычитания», этих бесконечностей, чтобы иметь дело только с конечными наблюдаемыми значениями масс и энергий**. И все же флуктуации основного состояния вызывают небольшие эффекты, которые можно измерить и которые подтверждаются экспериментом. Похожие схемы избавления от бесконечностей работают и для полей Янга – Миллса в теории, которую разработали Чженьнин Янг и Роберт Миллс. Теория Янга – Миллса — это расширение теории Максвелла, которое описывает действие двух других сил, называемых слабым и сильным ядерными взаимодействиями. Однако в случае квантовой теории гравитации флуктуации основного состояния вызывают гораздо более серьезные эффекты. Здесь тоже каждая длина волны имеет свою энергию основного состояния.

* Импульс — произведение массы на скорость.

** Эта работа была отмечена Нобелевской премией по физике за 1965 г.

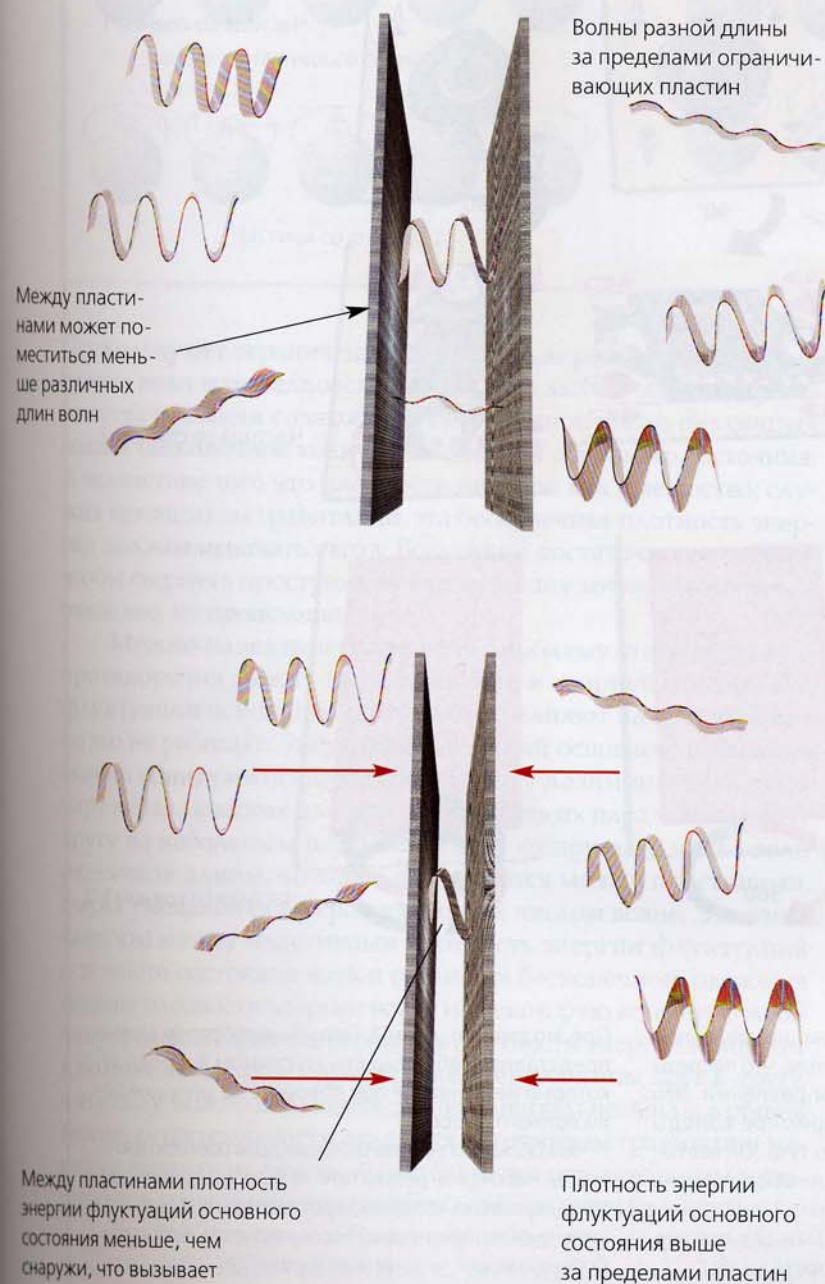


Рис. 2.11
ЭФФЕКТ КАЗИМИРА

Существование флуктуаций основного состояния было подтверждено экспериментально в эффекте Казимира, который проявляется как небольшая сила, действующая между параллельными металлическими пластинами.

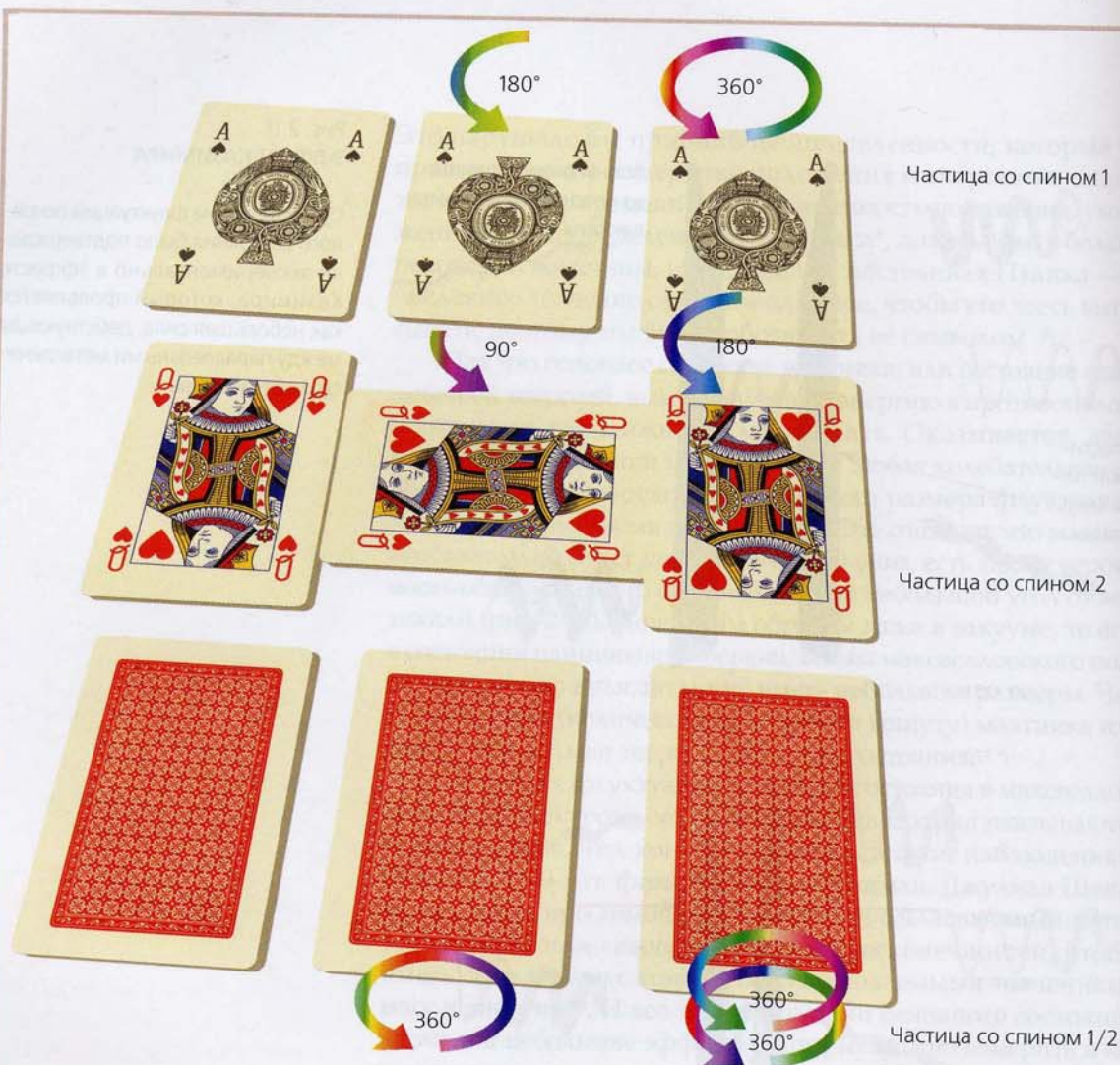


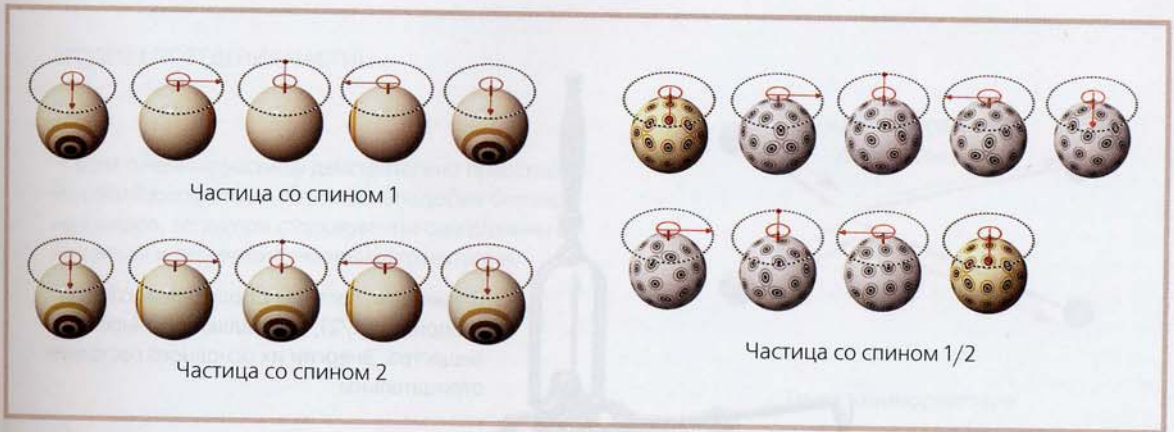
Рис. 2.12. СПИН

Все частицы обладают свойством, называемым спином, которое проявляется в том, что частицы по-разному выглядят с разных направлений. Это можно проиллюстрировать на примере колоды карт. Возьмем для начала пикового туза. Он выглядит неизменно только при полном обороте — на 360° . Поэтому говорят, что у него спин 1.

С другой стороны, у червовой дамы две головы. И потому она не меняется при повороте на 180° .

Про это говорят: спин 2. Подобным образом можно представить себе объекты со спином 3 и больше, которые не меняются при повороте на меньшие доли полного оборота.

Чем больше спин, тем меньшая доля оборота нужна, чтобы частица в результате осталась неизменной. Но удивительно, что существуют частицы, которые остаются неизменными только после двух полных оборотов. О таких говорят, что они имеют спин $1/2$.



Поскольку нет ограничений на то, сколь короткими могут быть длины волн максвелловского поля, то в любой области пространства-времени содержится бесконечное число различных волн и бесконечное количество энергии основного состояния. А вследствие того что плотность энергии, как и вещество, служит источником гравитации, эта бесконечная плотность энергии должна означать, что у Вселенной достаточно тяготения, чтобы свернуть пространство-время в одну точку, чего, однако, очевидно, не происходит.

Можно надеяться разрешить проблему этого внешнего противоречия между наблюдениями и теорией, заявив, что флуктуации основного состояния не влияют на гравитацию, но это не работает. Энергию флуктуаций основного состояния можно обнаружить благодаря эффекту Казимира. Если взять пару металлических пластин и поместить их параллельно друг другу на небольшом расстоянии друг от друга, то число волн различной длины, которые помещаются между пластинами, слегка уменьшится по сравнению с их числом вовне. Это означает, что между пластинами плотность энергии флуктуаций основного состояния хотя и останется бесконечной, окажется меньше плотности энергии вовне на некоторую конечную величину (рис. 2.11). Данная разница в плотности энергии приводит к появлению силы, которая прижимает пластины друг к другу, и эту силу можно наблюдать экспериментально. Силы в общей теории относительности являются источником гравитации наряду с веществом, так что было бы непоследовательным игнорировать гравитационный эффект этой разницы в энергии.

Другой подход к решению рассматриваемой проблемы — попробовать задействовать космологическую постоянную, такую как ввел Эйнштейн в попытке получить стацио-

Обычные числа

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

Грассмановские числа

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



Фермионы, частицы с полуцелым спином (например, $1/2$), составляют обычное вещество. Энергии их основного состояния отрицательны

Бозоны, частицы с целым спином ($0, 1, 2$ и т. п.), — из супергравитации $N = 8$. Энергии их основного состояния положительны

Рис. 2.13. СУПЕРПАРТНЕРЫ

Все известные частицы во Вселенной принадлежат к одной из двух групп: фермионам или бозонам.

Фермионы — это частицы с полуцелым спином (например, $1/2$), из них состоит обычное вещество. Энергии их основного состояния отрицательны.

Бозоны — это частицы с целым спином ($0, 1, 2$ и т. п.). Они связаны с силами, которые действуют между фермионами, например с гравитационным взаимодействием и светом. Энергии их основного состояния положительны.

Теория супергравитации предполагает, что каждый фермион и каждый бозон имеют суперпартнера со спи-

ном, который либо на $1/2$ больше, либо на $1/2$ меньше спина самой частицы. Например, фотон (который является бозоном) имеет спин, равный 1. Его энергия основного состояния положительна. Суперпартнером фотона является фотино — фермион со спином $1/2$. Поэтому его энергия основного состояния отрицательна.

В этой супергравитационной схеме мы получаем равное число бозонов и фермионов. Поместив энергии основного состояния бозонов на положительную чашу весов, а энергии фермионов — на отрицательную, мы увидим, что они компенсируют друг друга, устраняя самые большие бесконечности.



МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ЧАСТИЦ

1 Если точечные частицы действительно представляют собой дискретные объекты наподобие бильярдных шаров, тогда при столкновении они должны отклоняться и переходить на новые траектории.



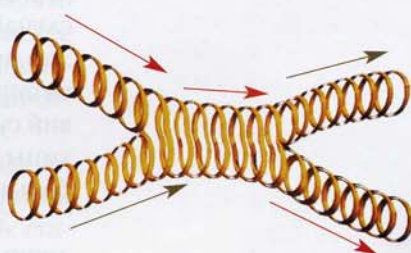
2 Вот что происходит при взаимодействии двух частиц, хотя эффект может быть и более впечатляющим.



3 Квантовая теория поля показывает, как сталкиваются две частицы, подобные электрону и его античастице, позитрону. Они на короткий момент аннигилируют друг с другом в яркой вспышке, порождая фотон, а он затем высвобождает энергию, порождая другую электрон-позитронную пару. Но это выглядит так, будто частицы просто отклонились, перейдя на новые траектории.



4 Если частицы являются не безразмерными точками, а одномерными замкнутыми струнами, которые колеблются как электрон и позитрон, тогда при столкновении и аннигиляции они порождают новую струну с другой формой колебаний. Высвобождая энергию, она делится на две струны, продолжающие движение по новым траекториям.



5 Если эти исходные струны рассматривать не в дискретные моменты, а на протяжении непрерывной, разворачивающейся во времени истории, то струны будут выглядеть как мировые поверхности.

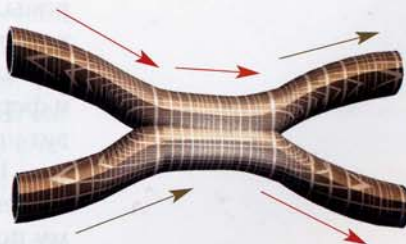




Рис. 2.14. КОЛЕБАНИЯ СТРУН

В теории струн фундаментальные объекты не частицы, занимающие единственную точку в пространстве, а одномерные струны. Эти струны могут иметь концы или замыкаться на себя, образуя петли.

В точности как струны скрипки, они могут поддерживать разные режимы колебаний или резонансные частоты, длины волн которых целое число раз укладываются между концами струны.

Но если разные частоты колебаний скрипичных струн порождают разные музыкальные тона, различные режимы колебаний в теории струн соответствуют разным массам и зарядам, что интерпретируется как различные фундаментальные частицы. Грубо говоря, чем короче длина волны колебания струны, тем больше масса частицы.

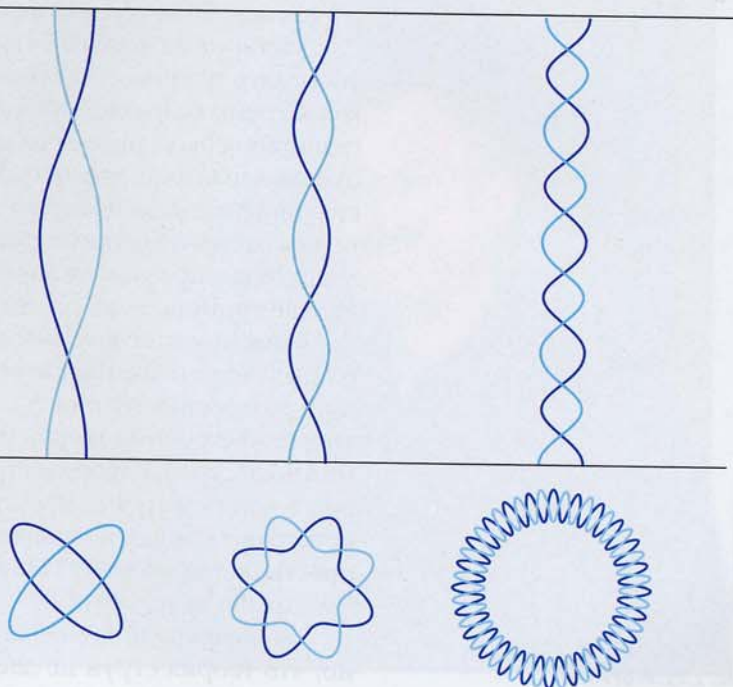
нарную Вселенную. Если эта постоянная имеет бесконечное отрицательное значение, она может в точности скомпенсировать бесконечное положительное значение энергии основного состояния в свободном пространстве, но такая космологическая постоянная кажется слишком искусственным предположением, и к тому же ее величина должна быть подогнана с невероятной точностью.

К счастью, в 1970-х гг. был открыт совершенно новый тип симметрии, который обеспечил естественный физический механизм сокращения бесконечностей, появляющихся из флуктуаций основного состояния. Суперсимметрия — это свойство наших современных математических моделей, которое можно описывать разными способами. Один из подходов состоит в том, чтобы объявить пространство-время имеющим дополнительные измерения помимо тех, с которыми мы знакомы на практике. Они называются размерностями Грассмана, поскольку отсчеты, производимые вдоль них, описываются грассмановскими, а не обычными действительными числами. Обычные числа коммутативны; не имеет значения, в каком порядке вы их перемножаете: 6 умножить на 4 — это то же самое, что 4 умножить на 6. Однако грассмановские величины *антикоммутативны*: x умножить на y равно $-y$ умножить на x .

Суперсимметрию впервые стали применять для исключения бесконечностей в материальных полях и полях Янга – Миллса в пространстве-времени, все измерения которого, как обычные, так и грассмановские, были плоскими, а не искривленными. Однако было естественно распространить подход на случай, когда те и другие измерения являются искривленными. Это привело к появлению ряда теорий, называемых супергравитацией, с разной степенью суперсимметрии. Одно из следствий суперсимметрии состоит в том, что у любого поля или частицы должны быть «суперпартнер» со спином либо на $1/2$ больше, либо на $1/2$ меньше (рис. 2.12).

Энергии основного состояния бозонов — полей с целочисленным спином (0, 1, 2 и т. д.) — положительны. С другой стороны, энергии основного состояния фермионов — полей, спин которых выражается полуцелыми числами ($1/2$, $3/2$ и т. д.), — отрицательны. Поскольку имеется одинаковое число бозонов и фермионов, крупнейшие бесконечности в теориях супергравитации сокращаются (рис. 2.13).

Не исключена, правда, возможность, что могут оставаться меньшие, но по-прежнему бесконечные величины. Никому пока не хватило упорства провести вычисления и выяснить, действительно ли эти теории полностью конечны.



По существующим оценкам, усердному студенту на это потребовалось бы лет двести, и потом неясно, как убедиться, что он не допустил ошибки уже на второй странице. Тем не менее вплоть до 1985 г. специалисты в основном верили, что большинство суперсимметричных теорий супергравитации должны быть свободны от бесконечностей.

А потом мода неожиданно изменилась. Было объявлено, что нет оснований полагать, будто теории супергравитации не содержат бесконечностей, и это привело к тому, что их стали считать безнадежно дефектными. Зато было провозглашено, что концепция, получившая название суперсимметричной теории струн, — единственное, что способно соединить гравитацию с квантовой теорией. Струны в данной теории, подобно тем, что встречаются обыденной жизни, являются одномерными объектами. У них есть только длина. Струны в теории струн движутся на фоне пространства-времени, а их колебания интерпретируются как частицы (рис. 2.14).

Если струны обладают грасмановскими измерениями наряду с обычными, их колебания будут соответствовать бозонам



и фермионам. В этом случае положительные и отрицательные энергии основных состояний в точности сокращаются, так что не остается никаких бесконечностей, даже малого порядка. Суперструны, как было объявлено, представляют собой Теорию Всего.

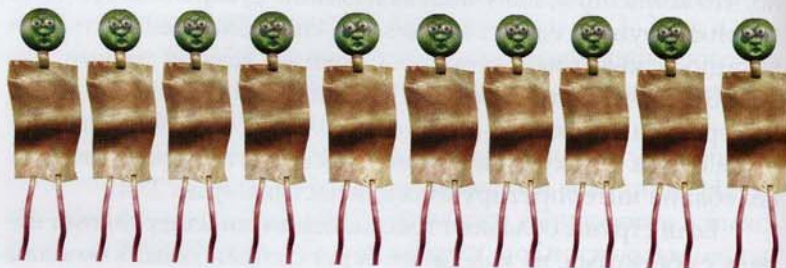
Историкам науки в будущем наверняка будет интересно построить график колебания пристрастий физиков-теоретиков. Струны безраздельно властвовали несколько лет, а супергравитация была низведена до статуса приближенной теории, годной при низких энергиях. Ярлык «низких энергий» был просто убийственным, несмотря даже на то, что в данном контексте низкоэнергетическими считались частицы, в миллиард миллиардов раз превосходящие по энергии те, что образуются при взрыве тротила. Будь супергравитация низкоэнергетическим приближением, ее нельзя было бы считать фундаментальной теорией Вселенной. Вместо нее на эту роль претендовали целых пять различных теорий суперструн. Но какая же именно из этих пяти струнных теорий описывает нашу Вселенную? И как можно построить теорию струн за пределами того приближения, в котором струны представляются поверхностями с одним пространственным и одним временным измерением в плоском пространстве-времени? Не могут ли струны искривлять фон пространства-времени?

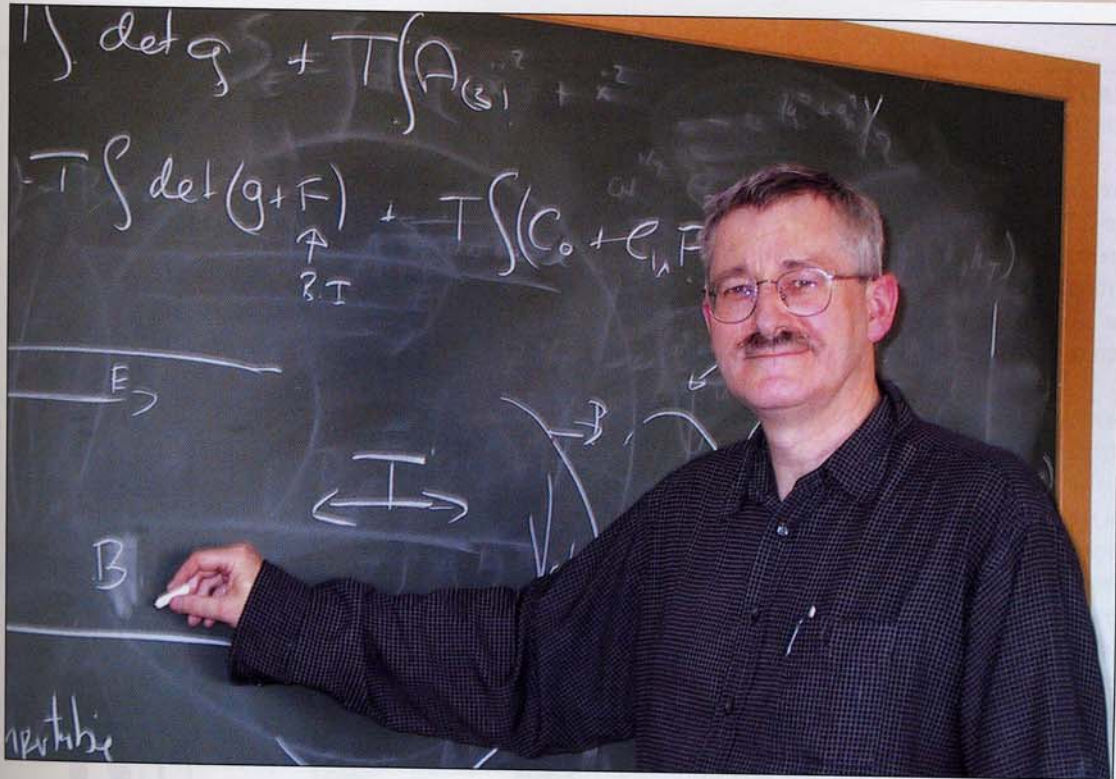
Рис. 2.15. Р-БРАНЫ

Р-браны — это объекты, протяженные в p измерениях. Частными их случаями являются струны, для которых $p = 1$, и мембраны ($p = 2$), но в 10- или 11-мерном пространстве-времени возможны и большие значения p . Часто некоторые или все из p измерений свернуты наподобие тора.

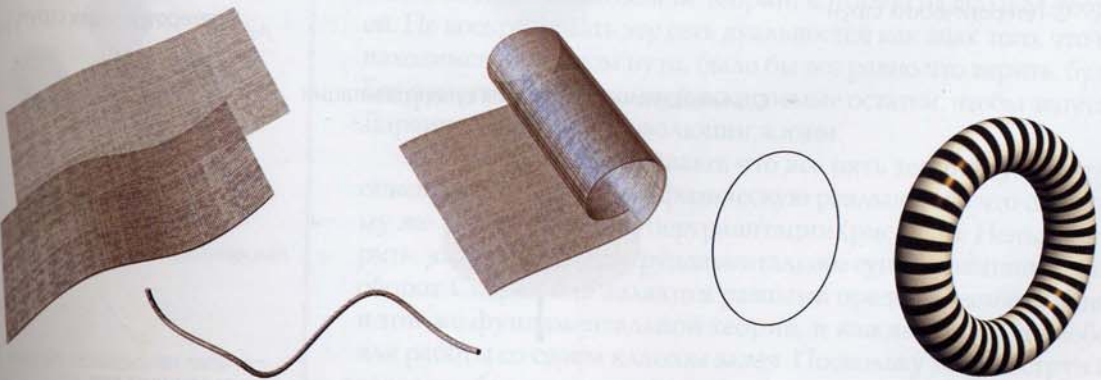
В следующие за 1985-м годы постепенно становилось ясно, что теория струн не дает законченной картины. Начать с того, что струны, как выяснилось, лишь один из элементов широкого класса объектов, которые могут иметь более одного измерения. Пол Таунсенд, который является, как и я, сотрудником факультета прикладной математики и теоретической физики Кембриджа и по большей части заложил основу для изучения таких объектов, стал называть их « p -бранами». Такая p -брана имеет протяженность в p направлениях. Так, при $p = 1$ брана является струной, при $p = 2$ — поверхностью или мембраной и т. д. (рис. 2.15). По-видимому, нет причин

*Мы считаем
самоочевидной истину:
все p -браны созданы
равными!*





Пол Таунсенд, гурӯ теорини струн



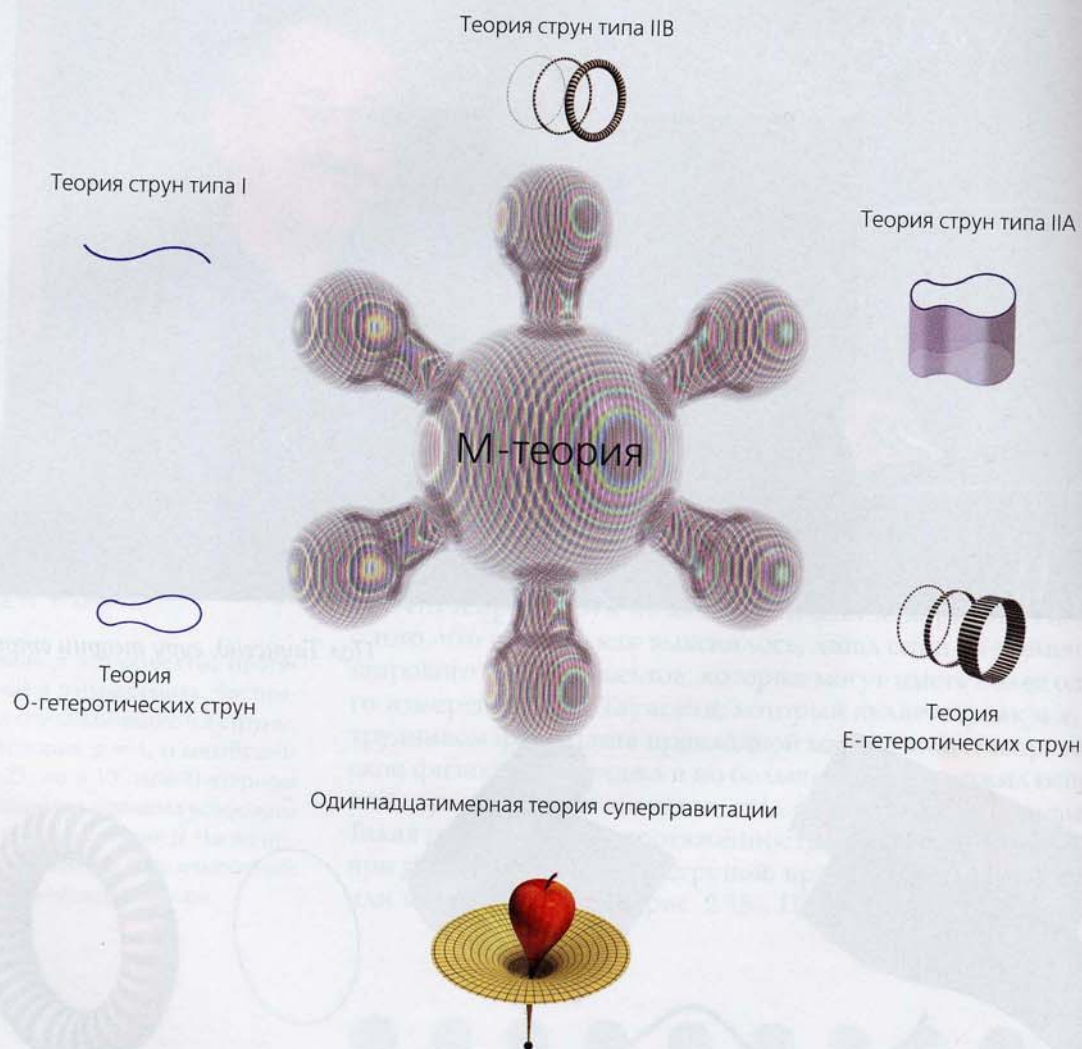
Пространственная ткань нашей Вселенной может иметь как протяженные, так и свернутые измерения. Мембраны можно рассмотреть лучше, если их свернуть

Свернутая
1-брана,
или струна

Поверхность
2-браны,
свернутая в тор



Рис. 2.16. ОБЪЕДИНЕННАЯ СХЕМА?



Существует сеть взаимосвязей, так называемых дуальностей, которые соединяют все пять теорий струн, а также 11-мерную супергравитацию. Дуальности предполагают, что разные теории струн — это лишь разные выражения одной и той же фундаментальной концепции, которую называют М-теорией.



До середины 1990-х гг. казалось, что имеется пять совершенно разных и никак между собой не связанных теорий струн.



М-теория объединяет пять теорий струн в единую теоретическую схему, но многие ее свойства еще предстоит понять.

отдавать предпочтение струнам с $p = 1$ перед струнами с другими значениями p . Напротив, следует принять принцип p -бранной демократии: все p -браны созданы равными*.

Все p -браны можно найти как решения уравнений теории супергравитации в 10 или 11 измерениях. Хотя 10 или 11 измерений, кажется, не слишком похожи на знакомое нам пространство-время, идея состоит в том, что дополнительные 6 или 7 измерений свернуты до такой малой величины, что мы их не замечаем; нам видны только остальные 4 больших и почти плоских измерения.

Должен сказать, что я с неохотой принимаю идею дополнительных измерений. Но для меня, как для позитивиста, вопрос «Существуют ли дополнительные измерения на самом деле?» не имеет смысла. Все, о чем можно спросить: действительно ли математическая модель с дополнительными измерениями хорошо описывает Вселенную? У нас пока нет наблюдений, объяснение которых требовало бы дополнительных измерений. Однако есть вероятность, что они могут появиться на Большом адронном коллайдере LHC в Женеве. Но вот что заставляет многих людей, включая меня, всерьез принимать модели с дополнительными измерениями: это наличие между этими моделями целой сети неожиданных соотношений, называемых дуальностями. Данные соотношения показывают, что все модели, по сути, являются эквивалентными, они лишь отражают разные аспекты одной и той же лежащей в основе теории, которую назвали М-теорией. Не воспринимать эту сеть дуальностей как знак того, что мы находимся на верном пути, было бы все равно что верить, будто Бог поместил среди камней ископаемые остатки, чтобы запутать Дарвина в вопросе об эволюции жизни.

Дуальности показывают, что все пять теорий суперструн описывают одну и ту же физическую реальность и что они к тому же эквивалентны супергравитации (рис. 2.16). Нельзя говорить, что суперструны фундаментальнее супергравитации, и наоборот. Скорее, они являются разными представлениями одной и той же фундаментальной теории, и каждый подход удобен для работы со своим классом задач. Поскольку теории струн не содержат бесконечностей, они хорошо подходят для расчета того, что случается, когда несколько высокоэнергетических частиц

* Хокинг перефразирует Декларацию независимости США — то ее место, где перечисляются неотъемлемые права человека (оно начинается словами: «Мы считаем самоочевидными истины: что все люди созданы равными...»).

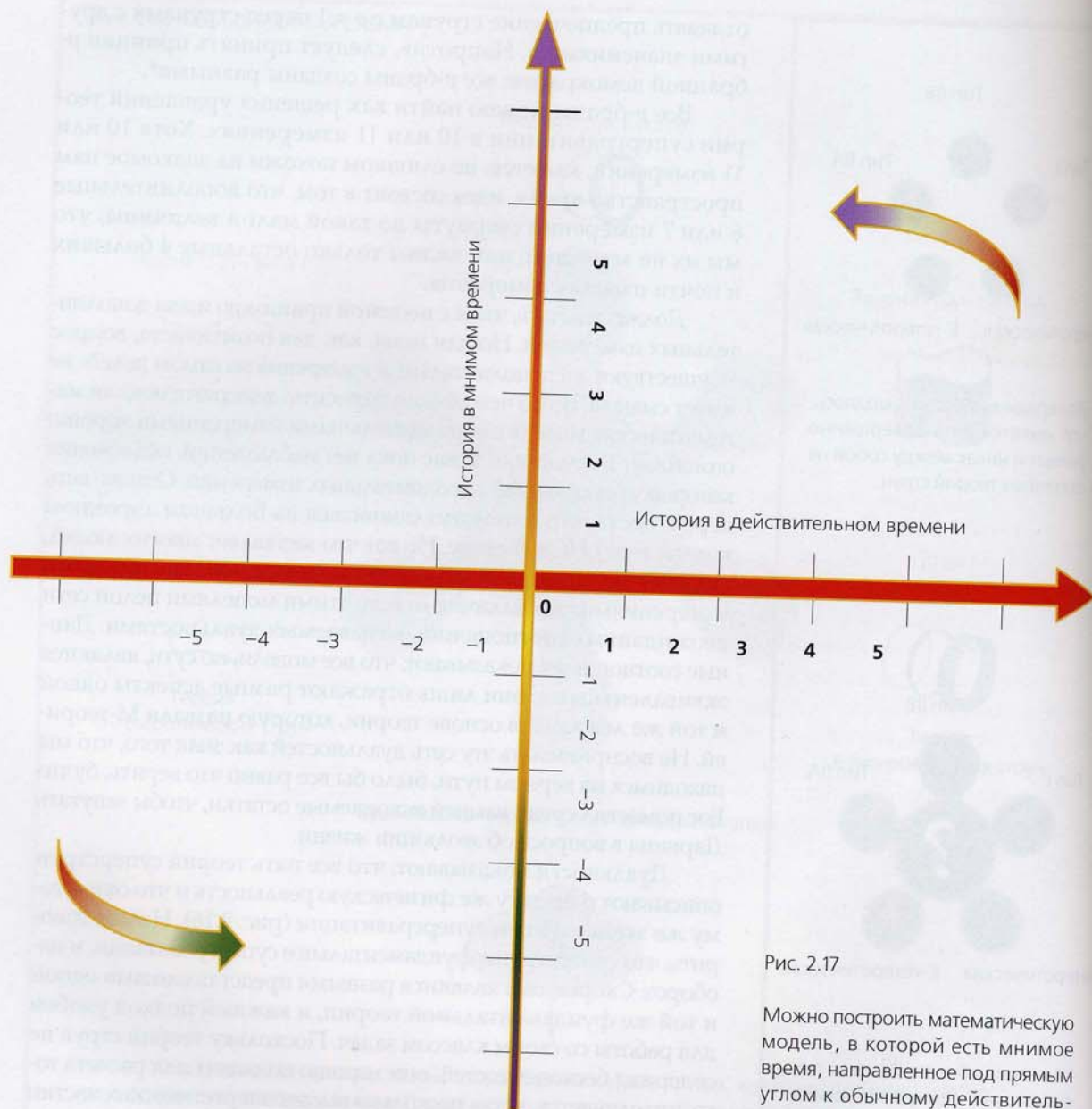


Рис. 2.17

Можно построить математическую модель, в которой есть мнимое время, направленное под прямым углом к обычному действительному времени. Модель включает правила, которые определяют историю в мнимом времени по истории в действительном времени, и наоборот.

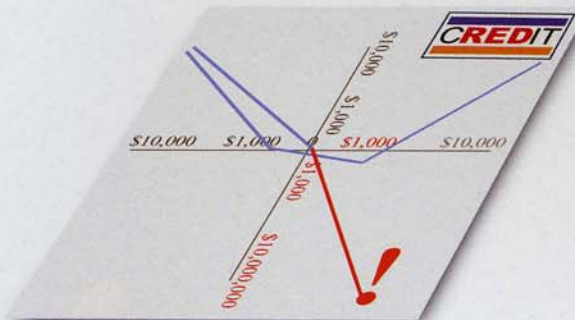


Рис. 2.18

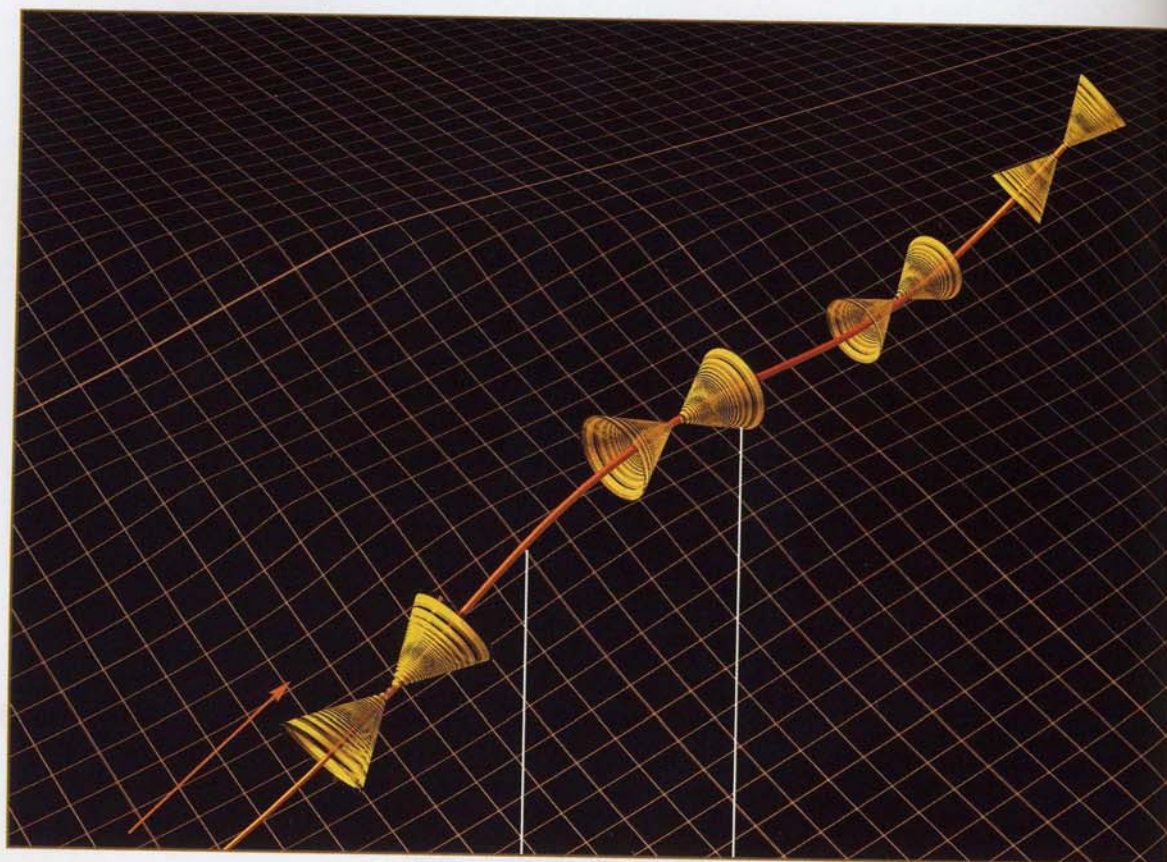
Мнимые числа — это математическая конструкция. У вас не может быть мнимого счета по кредитной карте.

сталкиваются и рассеиваются друг на друге. Однако они не слишком полезны для описания того, как энергия очень большого числа частиц искривляет Вселенную или образует связанное состояние, подобное черной дыре. В таких ситуациях требуется супергравитация, которая в основе представляет собой эйнштейновскую теорию искривленного пространства с некоторыми дополнительными типами материи. Именно эту картину я буду в основном использовать в дальнейшем.

Чтобы описать, как квантовая теория придает форму времени и пространству, будет полезно ввести концепцию мнимого времени. Термин «мнимое время» звучит так, будто заимствован из научной фантастики, но это вполне определенная математическая концепция: время, измеряемое так называемыми мнимыми числами. Можно представлять себе обычные действительные числа, такие как 1, 2, $-3,5$ и т. п., как соответствующие точки на оси, прочерченной слева направо: ноль в середине, положительные действительные числа — справа, отрицательные — слева (рис. 2.17).

Мнимые числа правомерно изобразить соответствующими отсчетами на вертикальной оси: ноль опять посередине, положительные мнимые числа — вверх, отрицательные мнимые — вниз. То есть мнимые числа допустимо представлять себе как новый тип чисел, расположенных под прямым углом к вещественным числам. Поскольку это чисто математическая конструкция, они не нуждаются в физической реализации; никто, например, не может иметь мнимое число органов или мнимый счет по кредитной карте (рис. 2.18).

Можно подумать, будто мнимые числа — это просто математическая игра, не имеющая никакого отношения к реальному миру. С точки зрения позитивистской философии, однако, невозможно определить, что является реальным. Все, что можно



Направление времени

История наблюдателя

Световые конусы

Рис. 2.19

В классическом пространстве-времени общей теории относительности действительное время отличается от пространственных направлений тем, что в направлении истории наблюдателя оно только увеличивается, тогда как пространственные координаты могут как увеличиваться, так и уменьшаться по ходу этой истории. С другой стороны, мнимое время квантовой теории подобно дополнительному пространственному измерению, поскольку может как увеличиваться, так и уменьшаться.

сделать, — это находить математические модели, описывающие Вселенную, в которой мы живем. Оказывается, математические модели, использующие мнимое время, предсказывают не только эффекты, которые мы уже наблюдаем, но также эффекты, которые мы пока не можем измерить, но в которые верим по другим причинам. Так что же все-таки действительно, а что мнимое? Неужели вся разница лишь в нашем сознании?

Классическая (то есть некантовая) общая теория относительности Эйнштейна объединяет действительное время и три измерения пространства в четырехмерное пространство-время. Но направление действительного времени отличается от трех пространственных измерений: мировая линия, или история наблюдателя, всегда направлена в сторону возрастания действительного времени (это означает, что время всегда течет из прошлого в будущее), но она может пролегать как в направлении



Рис. 2.20. МНИМОЕ ВРЕМЯ

В мнимом пространстве-времени, которое является сферой, направление мнимого времени может быть представлено расстоянием от южного полюса. При движении на север круги долготы, проходящие на постоянном расстоянии от южного полюса, становятся все больше и больше, что соответствует расширению Вселенной в мнимом времени. У экватора Вселенная достигает максимального размера и затем с увеличением мнимого времени вновь сжимается в точку на северном полюсе. Но хотя размер Вселенной становится на полюсах нулевым, в этих точках не будет сингулярностей просто потому, что Северный и Южный полюсы — совершенно обыкновенные точки на земной поверхности. Это указывает на то, что в мнимом времени рождение Вселенной может быть обычной точкой пространства-времени.



S

Мнимое время как линии широты

N

Рис. 2.21

Вместо широты направлению мнимого времени в сферическом пространстве-времени может соответствовать долгота. Поскольку все линии постоянной долготы сходятся в северном и южном полюсах, время там останавливается; увеличение мнимого времени оставляет вас на одном и том же месте, подобно тому как движение на запад на Северном полюсе Земли оставляет вас на Северном полюсе.



Мнимое время как линии долготы, которые встречаются на северном и южном полюсах



Информация,
падающая
в черную дыру

Восстановленная
информация

Формула, выражающая энтропию — число внутренних состояний черной дыры — через ее площадь, говорит о том, что информация, упавшая в черную дыру, может сохраняться наподобие записи и воспроизводиться, когда черная дыра испаряется.



увеличения, так и в сторону *уменьшения* любого из трех пространственных измерений. Иными словами, можно развернуться в обратную сторону в пространстве, но не во времени (рис. 2.19).

С другой стороны, поскольку мнимое время расположено под прямым углом к действительному, оно ведет себя подобно четвертому пространственному измерению. Поэтому оно может обладать гораздо более широким диапазоном возможностей, чем железнодорожная колея обычного действительного времени, которое может лишь иметь начало или конец либо замыкаться в круг. Именно в этом «мнимом» смысле время имеет форму.

Чтобы увидеть подобные возможности, представим пространство-время с мнимым временем как сферу, подобную поверхности Земли. Предположим, что мнимое время соответствует широте (рис. 2.20). Тогда история Вселенной в мнимом времени начинается на южном полюсе. Не имеет смысла вопрос «Что случилось до начала?». Таких моментов времени просто нет, точно так же, как точек южнее южного полюса. Полюс — самая обыкновенная точка на поверхности Земли, и там работают те же самые законы, что и в других точках. Это наводит на мысль, что начало Вселенной в мнимом времени может быть обычной точкой пространства-времени и что в начале должны соблюдаться все законы, которые действуют в остальной Вселенной. (Квантовое происхождение и эволюция Вселенной будут обсуждаться в следующей главе.)

Другой вариант поведения можно проиллюстрировать, если считать мнимое время долготой на Земле. Все меридианы сходятся на северном и южном полюсах (рис. 2.21). Так что время здесь останавливается в том смысле, что увеличение мнимого времени (или градуса долготы) оставляет вас на одном и том же месте. Это очень похоже на то, как обычное время кажется остановившимся на горизонте черной дыры. Мы выяснили, что это замирание действительного или мнимого времени (как обоих сразу, так и по одному) означает, что пространство-время имеет температуру, как это было открыто мною для случая черных дыр. Но черные дыры имеют не только температуру, они к тому же ведут себя так, будто обладают энтропией. Энтропия — это мера числа внутренних состояний (различных вариантов внутренней конфигурации), которые может иметь черная дыра, не меняя своего вида для внешнего наблюдателя, способного определить только ее массу, вращение и электрический заряд. Энтропия черной дыры выражается очень простой

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

ФОРМУЛА
ДЛЯ 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 небольшой фрагмент трехмерной голографической пластинки содержит достаточно информации, чтобы реконструировать полное трехмерное изображение яблока



ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП

Осознание того, что площадь поверхности горизонта, окружающего черную дыру, является мерой ее энтропии, навело на мысль о том, что максимальная энтропия любой замкнутой области никогда не может превзойти четверть площади охватывающей поверхности. Поскольку энтропия не что иное, как мера полной информации, содержащейся в системе, информация, связанная со всеми явлениями в трехмерном мире, может быть сохранена на его двумерной границе, подобно голографическому изображению. В определенном смысле мир можно было бы считать двумерным.

формулой, которую я вывел в 1974 г. Она равна площади горизонта черной дыры: один бит информации о ее внутреннем состоянии приходится на каждую фундаментальную единицу площади горизонта. Это говорит о глубокой связи между квантовой гравитацией и термодинамикой — наукой о теплоте (к сфере которой относится понятие энтропии). А еще наводит на мысль, что квантовая гравитация может проявлять своего рода голографические свойства (рис. 2.22).

Информация о квантовых состояниях внутри области пространства-времени может быть неким образом закодирована на ее границе, которая имеет на два измерения меньше. Это похоже на то, как голограмма содержит трехмерное изображение на двумерной поверхности. Если квантовая гравитация включает голографический принцип, это может означать, что у нас есть шанс проследить, что происходит внутри черной дыры. Большое значение имеет возможность предсказывать излучение, исходящее из черной дыры. Если это невозможно, значит, нельзя и предсказывать будущее настолько точно, как мы думаем. (Данный вопрос обсуждается в главе 4. Голографии посвящена глава 7.) Похоже, мы сами можем жить на 3-бране — четырехмерной (три пространственных плюс одно временное измерение) поверхности, которая ограничивает пятимерную область, а остальные размерности свернуты до очень малых размеров. При этом в состоянии мира на бране зашифровано то, что происходит в пятимерной области.

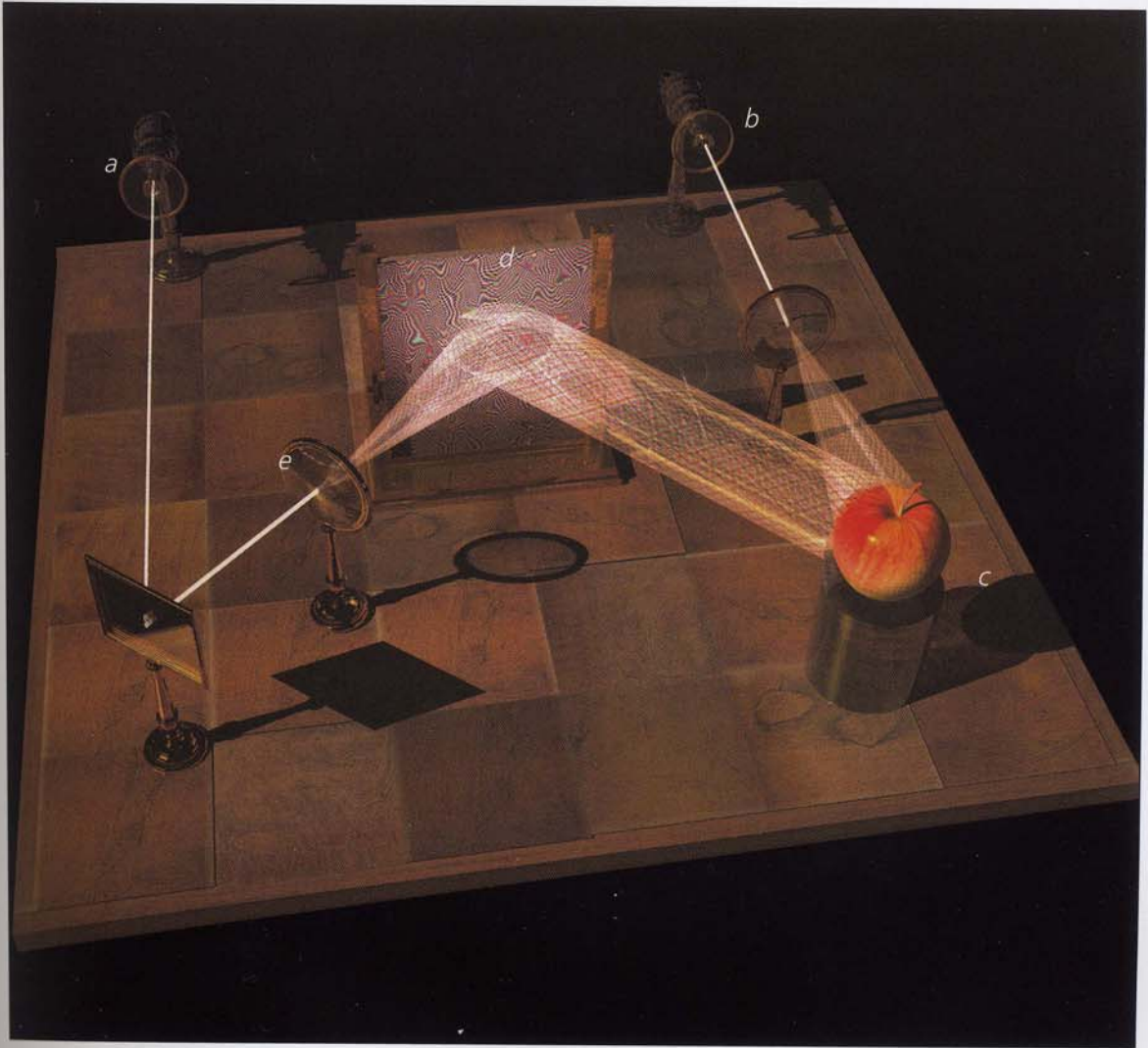


Рис. 2.22. По сути, голография — это проявление интерференции волн. Голограмма создается, когда свет от одного лазера разделяется на два отдельных пучка *a* и *b*. Один из них (*b*) рассеивается объектом *c* на светочувствительную пластинку *d*. Другой (*a*) проходит через линзу *e* и взаимодействует с рассеянным светом пучка *b*, создавая на пластинке интерференционный узор.

Когда лазер светит сквозь проявленную пластинку, восстанавливается полное *трехмерное* изображение исходного объекта. Наблюдатель может обойти голо-

графическое изображение и увидеть скрытые поверхности, которые на обычной фотографии не видны.

Двумерная поверхность пластинки (*слева*), в отличие от обычной фотографии, обладает замечательным свойством: любой, даже небольшой, фрагмент ее поверхности содержит всю информацию, необходимую для реконструкции целого изображения. [Строго говоря, голограмма содержит только информацию о внешнем виде объектов. Узнать, как выглядят детали, скрытые непрозрачной оболочкой, по голограмме невозможно. — *Перев.*]

ГЛАВА 3

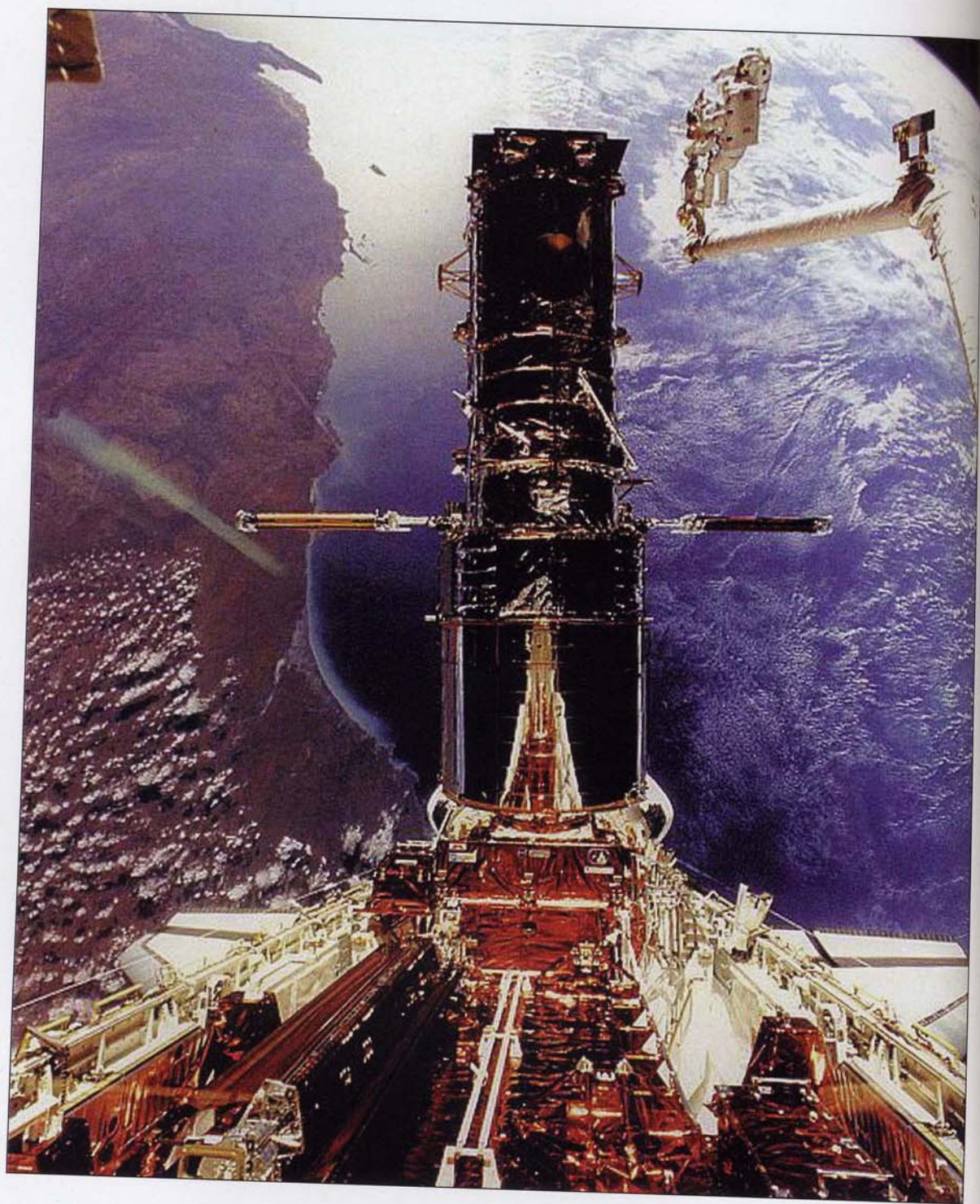
МИР В ОРЕХОВОЙ СКОРАЛУПКЕ

*О том, что Вселенная имеет множество историй,
каждая из которых
определяется крошечным орешком*





МИР В ОРЕХОВОЙ СКОРЛУПКЕ





Я бы и в ореховой скорлупе считал себя
властелином необъятного пространства*.

У. Шекспир. Гамлет. Акт 2, сцена 2

Гамлет мог иметь в виду, что хотя мы, люди, существа весьма ограниченные физически, наш разум свободен в своем стремлении познать весь мир и смело отправляется туда, куда не рисковали забираться даже герои «Звездного пути», — позволены самые страшные сны.

Действительно ли Вселенная бесконечна или просто очень велика? Вечна ли она или просто имеет большое время жизни? Как может наш конечный ум познать бесконечную Вселенную? Не слишком ли большая самоуверенность даже предпринимать такую попытку? Не рискуем ли мы повторить судьбу Прометея, который согласно классическому мифу украл у Зевса огонь и научил им пользоваться людей, а в наказание за безрассудную смелость был прикован к скале и стал добычей орла, прилетавшего выклеивать его печень?

Вопреки предостережению, заключенному в легенде, я верю, что мы можем и должны пытаться понять Вселенную. Мы уже достигли замечательных успехов в понимании космоса, особенно в последние годы. У нас еще нет полной картины, но, возможно, она уже не за горами.

Самый очевидный факт относительно космоса состоит в том, что он тянется и тянется все дальше и дальше. Это подтверждают современные инструменты, такие как телескоп «Хаббл», который позволяет нам заглянуть в глубочайший космос. Там мы видим миллиарды и миллиарды галактик различных форм и размеров (рис. 3.1). Каждая галактика содержит неисчислимые миллиарды звезд, и у многих из них есть планеты. Мы живем на планете, обращающейся вокруг



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

Слева: Обновление оптики космического телескопа «Хаббл» в ходе полета космического челнока. Внизу видно побережье Австралии

* Перевод К. Р. (Константина Романова).



*Спиральная галактика
NGC 4414*



*Спиральная галактика
с перемычкой NGC 4314*



*Эллиптическая галактика
NGC 147*

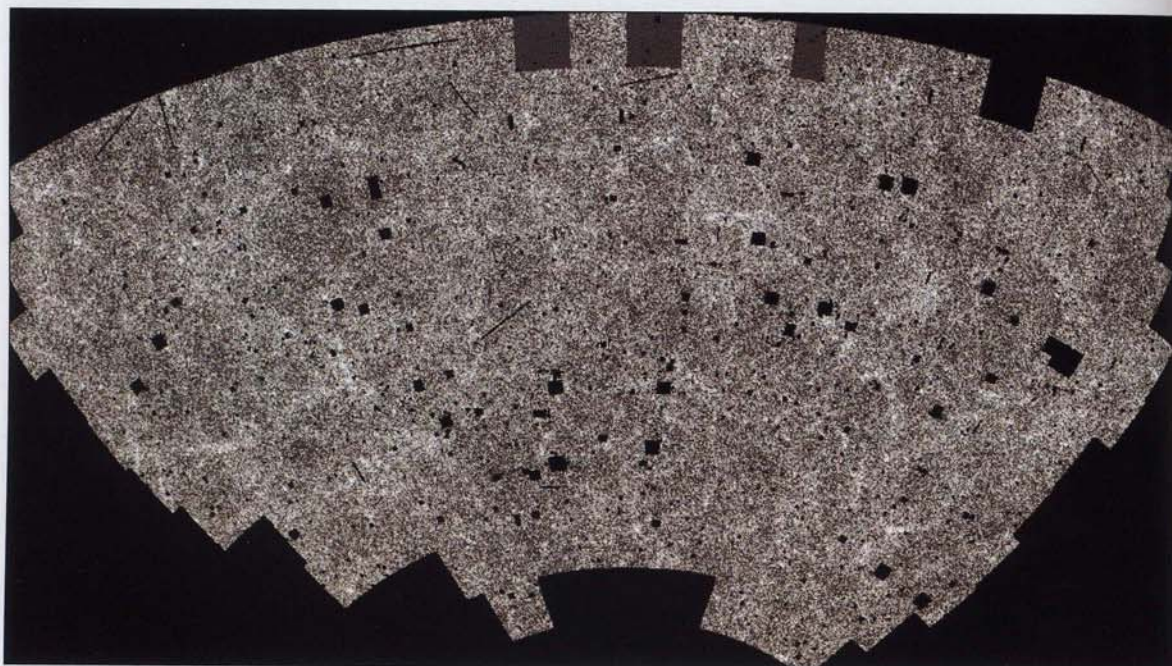
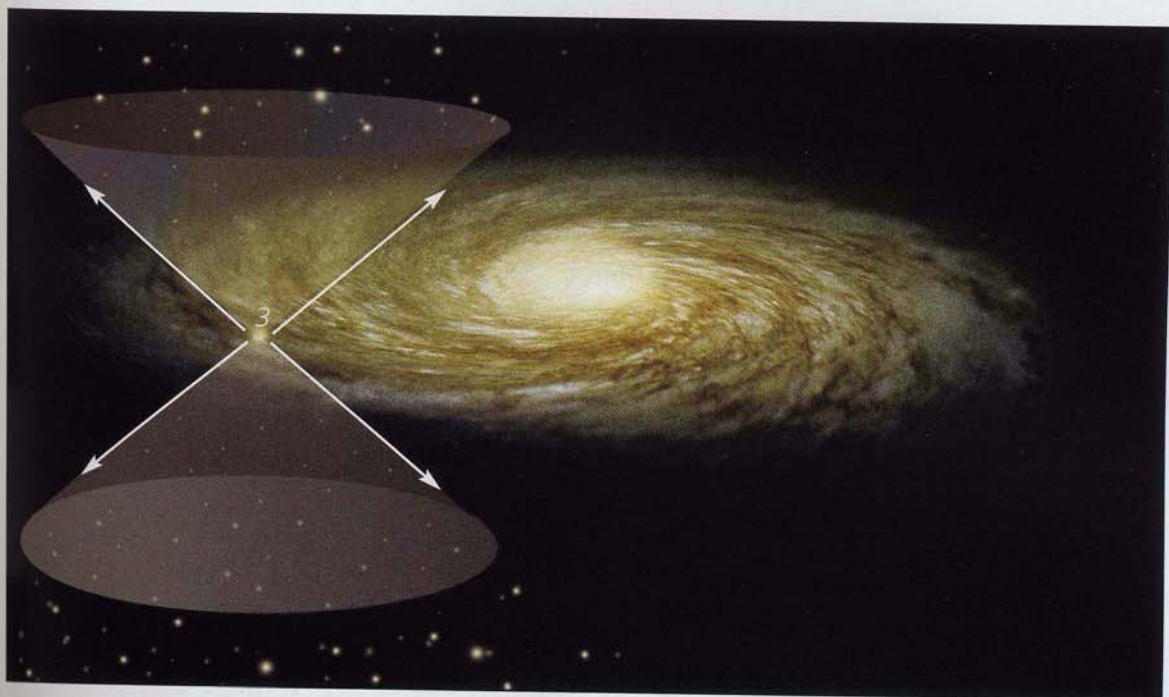


Рис. 3.1

Когда мы смотрим в глубины Вселенной, то видим миллиарды и миллиарды галактик. Галактики могут иметь разные формы и размеры; они могут быть эллиптическими или спиральными, подобно нашему Млечному Пути.



звезды во внешнем рукаве спиральной галактики Млечный Путь. Пыль в спиральных рукавах мешает нам наблюдать Вселенную вблизи плоскости галактики, но в направлении двух конусов по сторонам от этой плоскости видимость отличная, и мы можем определять положения далеких галактик (рис. 3.2). Мы обнаружили, что галактики распределены в космосе приблизительно однородно с отдельными локальными сгущениями и пустотами. Кажется, что плотность галактик на очень больших расстояниях снижается, но, скорее всего, из-за удаленности их свет становится настолько слабым, что мы просто их не регистрируем. Насколько мы можем судить, Вселенная тянется в пространстве бесконечно (рис. 3.3).

Хотя Вселенная во всех точках космоса выглядит почти одинаково, она определенно меняется во времени. До начала XX века это не осознавалось — считали, что в основном она неизменна. Ей полагалось существовать в течение бесконечного времени, но это приводило к абсурдным выводам. Если бы звезды светили бесконечно долго, они должны были бы прогреть Вселенную до своей температуры. Даже в ночное время все небо светилось бы так же ярко, как Солнце, поскольку в любом направлении взгляд в конце концов упирался бы

Рис. 3.2

Наша планета Земля (З) обращается вокруг Солнца в периферийном районе спиральной галактики Млечный Путь. Межзвездная пыль в спиральных рукавах мешает нам вести наблюдения в направлении плоскости Галактики, но по сторонам от нее открывается хороший обзор.

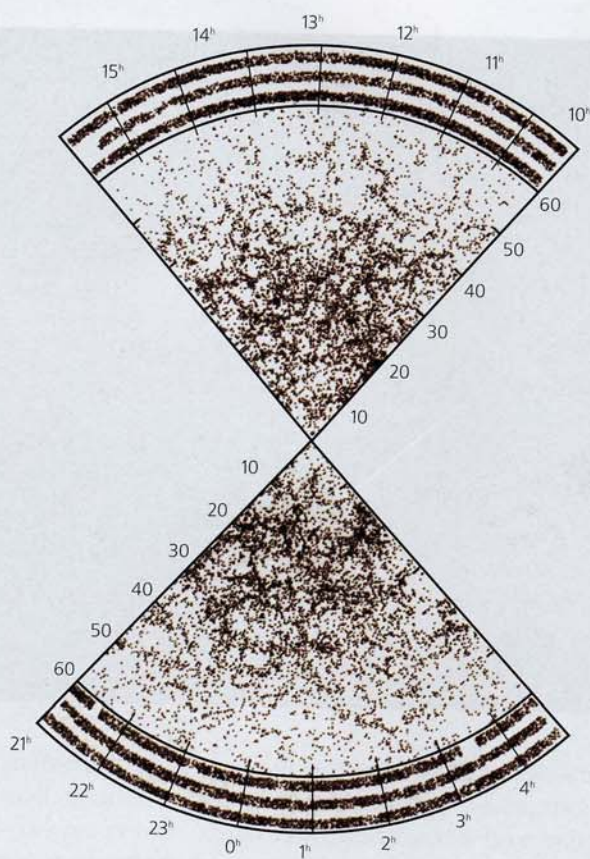


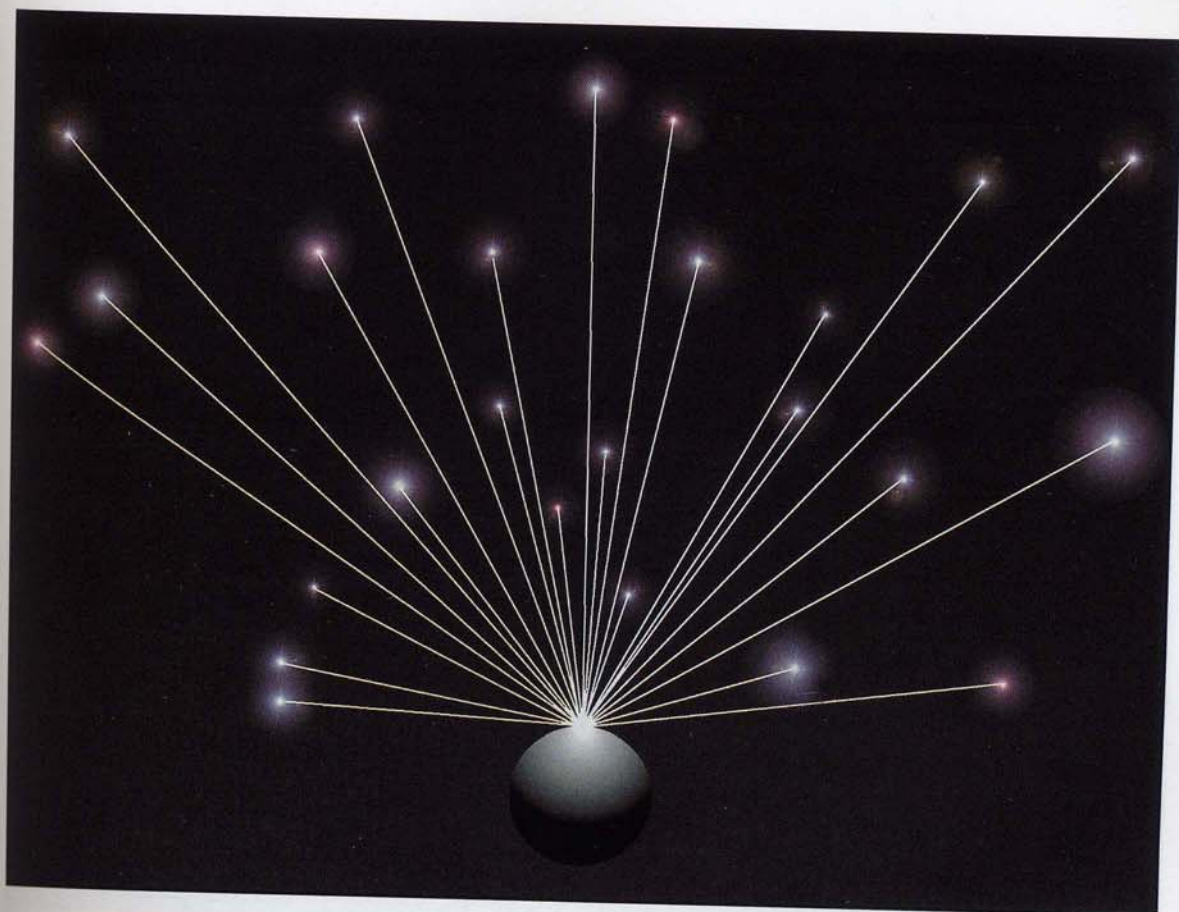
Рис. 3.3

Мы видим, что, за исключением отдельных локальных сгущений, галактики распределены в пространстве почти однородно.

либо в звезду, либо в пылевое облако, разогретое до той же температуры, что и звезды (рис. 3.4).

Все мы наблюдали ночное небо и знаем, что оно темное, и это очень важно. Отсюда следует, что Вселенная не может вечно пребывать в том же состоянии, что и сегодня. В прошлом, конечно время назад, должно было произойти нечто, что заставило звезды зажечься, а это значит, что свет очень далеких звезд еще не успел до нас дойти. Потому-то небо по ночам не ослепляет нас со всех сторон.

Но если звезды вечно находились на своих местах, почему они вдруг зажглись несколько миллиардов лет назад? Какой таймер сообщил им, что пришло время светиться? Как мы знаем, над этим ломали голову многие философы, которые, подобно Иммануилу Канту, верили, что Вселенная существует вечно. Однако большинство людей вполне устраивала



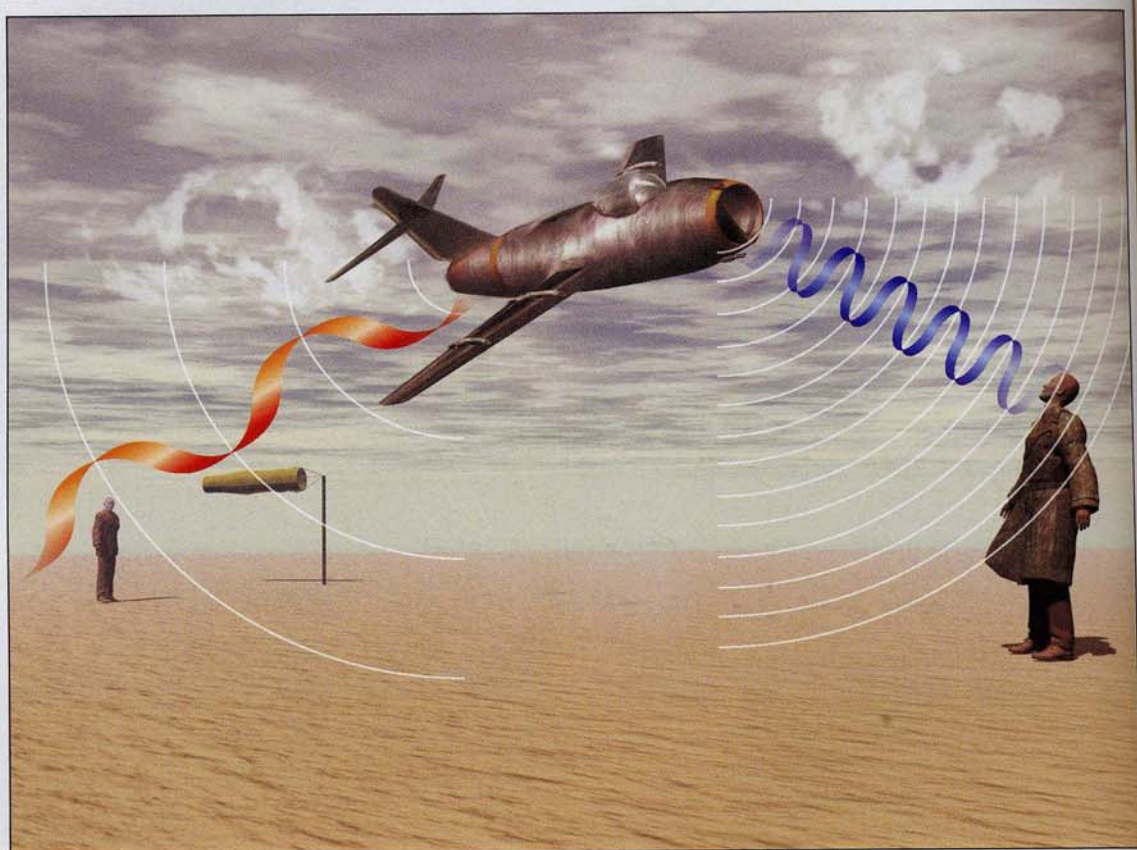
мысль о том, что Вселенная была создана всего несколько тысяч лет назад в целом такой, какова она сейчас.

Расхождения с этим представлением стали появляться благодаря наблюдениям Весто Слайфера и Эдвина Хаббла во втором десятилетии XX века. А в 1923 г. Хаббл открыл, что многочисленные едва заметные пятнышки на небе, называемые туманностями, на самом деле являются другими галактиками, огромными конгломератами таких же звезд, как наше Солнце, но находящихся на огромном расстоянии. Чтобы они выглядели такими маленькими и бледными, расстояния должны быть столь велики, что свету понадобятся миллионы или даже миллиарды лет, чтобы дойти до нас. Это значит, что Вселенная не могла появиться лишь несколько тысяч лет назад.

Второе открытие Хаббла было еще более замечательным. Астрономы знают, что, анализируя свет других галактик,

Рис. 3.4

Если бы Вселенная была статичной и бесконечной во всех направлениях, повсюду на ночном небе взгляд упирался бы в звезды и оно светило бы так же ярко, как поверхность Солнца.



ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Эффект Доплера, обнаруживающий связь между длиной волны и скоростью, мы наблюдаем едва ли не каждый день.

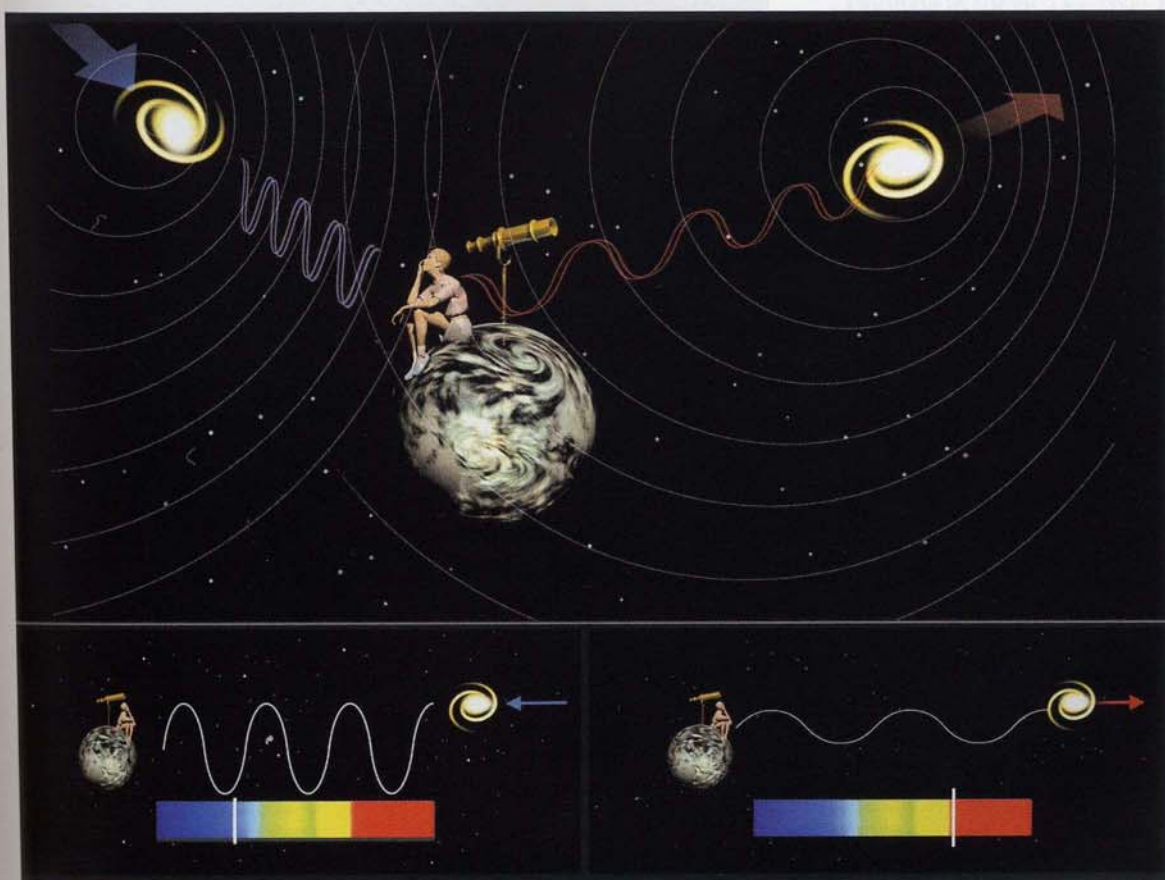
Прислушайтесь к самолету, который пролетает над головой. Когда он приближается, звук двигателя кажется высоким, а когда удаляется — низким.

Высокий тон соответствует более коротким звуковым волнам (с малым расстоянием от одного

гребня волны до следующего) и более высоким частотам (числу волн, приходящих в секунду).

Эффект Доплера вызван тем, что приближающийся самолет окажется ближе к вам, когда породит следующий гребень волны, а значит, расстояние между гребнями сократится.

Аналогично, когда самолет удаляется, длины волн увеличиваются, а тональность воспринимаемого звука понижается.



можно определить, движутся ли они к нам или от нас (рис. 3.5). К их огромному удивлению, оказалось, что почти все галактики удаляются. Более того, чем дальше находятся галактики, тем быстрее движутся прочь. Именно Хаббл осознал драматическое следствие этого открытия: на больших масштабах каждая галактика удаляется от любой другой. Вселенная расширяется (рис. 3.6).

Открытие расширения Вселенной стало одной из величайших интеллектуальных революций XX века. Оно оказалось совершенно неожиданным и полностью изменило ход дискуссии о происхождении Вселенной. Если галактики разлетаются, они должны были в прошлом находиться ближе друг к другу. Исходя из нынешнего темпа расширения мы можем заключить, что где-то между 10 и 15 миллиардами лет назад они находились очень близко друг от друга. Как описано

Рис. 3.5

Эффект Доплера также проявляется и для световых волн. Если галактика остается на постоянном расстоянии от Земли, характерные линии в ее спектре будут появляться на обычных стандартных позициях. Однако если она от нас удаляется, волны будут выглядеть более длинными или растянутыми, а характерные спектральные линии сместятся в красную сторону (*справа*). Если же галактика приближается к нам, тогда волны будут выглядеть сжатыми, а линии испытают голубое смещение (*слева*).



*Соседняя с нами галактика,
Туманность Андромеды,
параметры которой были
измерены Хабблом
и Слайфером*

ХРОНОЛОГИЯ ОТКРЫТИЙ,
СДЕЛАННЫХ СЛАЙФЕРОМ
И ХАББЛОМ МЕЖДУ
1910 И 1930 гг.

1912 — Слайфер получил спектры четырех туманностей и обнаружил в трех из них красное смещение, а в спектре Туманности Андромеды — голубое смещение. Он сделал вывод, что Туманность Андромеды приближается к нам, а остальные туманности от нас удаляются.

1912–1914 — Слайфер измерил спектры еще 12 туманностей. У всех, кроме одной, оказалось красное смещение.

1914 — Слайфер представил свои результаты Американскому астрономическому обществу. Хаббл при этом присутствовал.

1918 — Хаббл начал исследовать туманности.

1923 — Хаббл определил, что спиральные туманности (в том числе Туманность Андромеды) — это другие галактики.

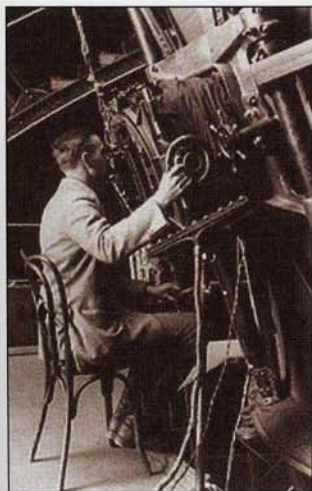
1914–1925 — Слайфер и другие астрономы продолжали измерения доплеровских сдвигов. К 1925 г. было измерено 43 красных смещения и 2 голубых.

1929 — Хаббл и Мильтон Хьюмасон, продолжив измерения доплеровских сдвигов и обнаружив, что на больших масштабах каждая галактика выглядит удаляющейся от других, объявили, что Вселенная расширяется.



в предыдущей главе, нам с Роджером Пенроузом удалось показать: из общей теории относительности Эйнштейна вытекает, что Вселенная и само время должны иметь начало в форме грандиозного взрыва. Оттого и темно ночное небо: ни одна звезда не могла светить дольше, чем десять — пятнадцать миллиардов лет — время, прошедшее с момента Большого взрыва.

Мы привыкли, что одни события вызываются другими, более ранними событиями, которые, в свою очередь, обусловлены еще более ранними. Существует тянущаяся в прошлое цепь причинности. Но, предположим, что эта цепь имеет начало. Предположим, что было первое событие. Что вызвало его? Это не тот вопрос, которым хотело бы заниматься большинство ученых. Они стараются его избежать, либо заявляя, как русские, что у Вселенной не было начала, либо утверж-



Эдвин Хаббл у 100-дюймового телескопа обсерватории Маунт-Вилсон. 1930

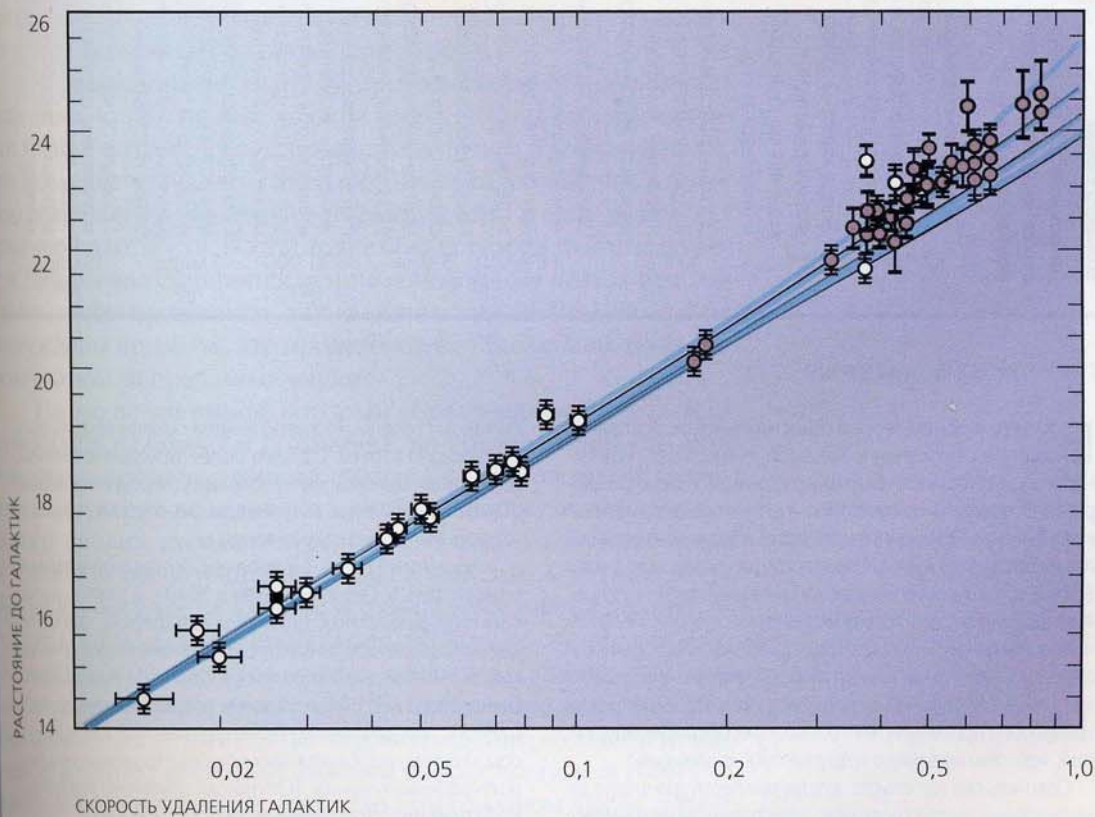
Рис. 3.6. ЗАКОН ХАББЛА

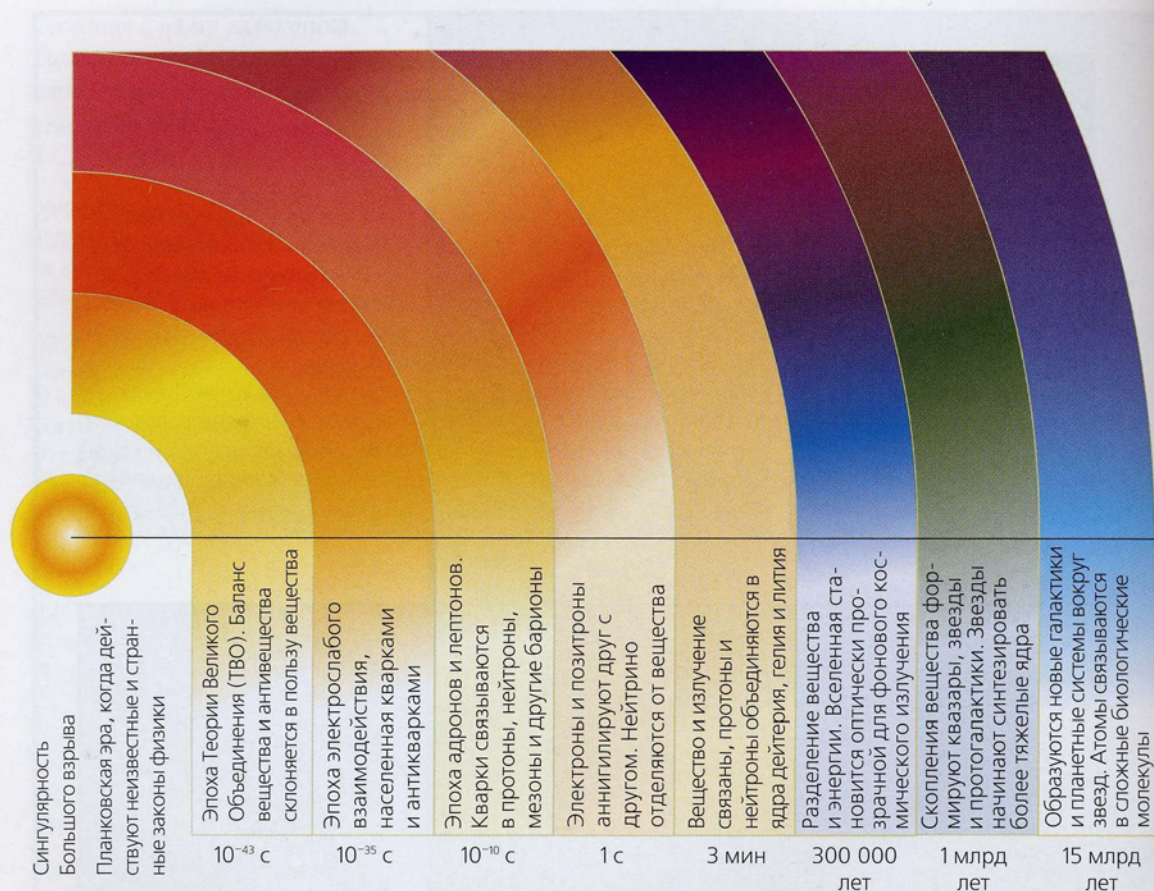
Анализируя свет других галактик, Эдвин Хаббл открыл в 1920-х гг., что почти все галактики удаляются от нас со скоростью V , которая пропорциональна расстоянию R от Земли: $V = H \times R$.

Эта важная закономерность, названная законом Хаббла, установила, что Вселенная расширяется, а постоянная Хаббла H задает скорость ее расширения.

На графике отражены последние данные наблюдений за красными смещениями галактик, подтверждающие, что закон Хаббла действует на огромных расстояниях от нас.

Небольшой изгиб вверх на больших расстояниях говорит о том, что расширение ускоряется, возможно под влиянием энергии вакуума.





ГОРЯЧИЙ БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

Если верна общая теория относительности, Вселенная началась с бесконечно высокой температуры и плотности в сингулярности Большого взрыва. По мере расширения Вселенной температура и интенсивность излучения убывали. Примерно через одну сотую долю секунды после Большого взрыва температура составляла около 100 млрд градусов, а Вселенная была наполнена в основном фотонами, электронами, нейтрино (очень легкими частицами) и их античастицами, а также некоторым количеством протонов и нейтронов. В течение следующих трех минут Вселенная охладилась примерно до 1 млрд градусов, а протоны и нейтроны стали образовывать гелий, изотопы водорода и другие легкие элементы.

Сотни тысяч лет спустя, когда температура упала до нескольких тысяч градусов, электроны замедлились

до такой степени, что легкие ядра смогли захватывать их, образуя атомы. Однако более тяжелые элементы, из которых мы состоим, такие как углерод и кислород, образовались лишь миллиарды лет спустя в результате горения гелия в ядрах звезд.

Эту картину плотной горячей Вселенной впервые описал физик Георгий Гамов в 1948 г. в статье, написанной совместно с Ральфом Альфером, где было сделано замечательное предсказание, что излучение той очень горячей эпохи и сегодня все еще должно быть вокруг нас. Предсказание ученых подтвердилось в 1965 г., когда физики Арно Пензиас и Роберт Вильсон зарегистрировали космическое фоновое микроволновое излучение. [Открытие отмечено Нобелевской премией по физике за 1978 г. — Перев.]



дая, что вопрос о ее происхождении лежит вне сферы науки и относится к метафизике и религии. Мое мнение состоит в том, что истинный ученый не должен принимать ни одну из этих позиций. Если действие законов природы приостанавливается у начала Вселенной, почему бы им не нарушаться также и в другие времена? Закон не закон, если он выполняется только иногда. Мы должны попытаться научно объяснить начало Вселенной. Возможно, эта задача окажется нам не по силам, но, по крайней мере, мы должны попробовать.

Хотя доказанные нами с Пенроузом теоремы продемонстрировали, что Вселенная должна иметь начало, они практически ничего не говорят о природе этого начала. Они указывают, что Вселенная началась с Большого взрыва, состояния, в котором вся она и все, что в ней есть, было сжато в одну точку бесконечной плотности. В этой точке общая теория относительности Эйнштейна становится неприменимой и ее нельзя использовать, чтобы предсказать, как именно началась Вселенная. Мы вынуждены признать, что происхождение Вселенной, по-видимому, лежит за пределами науки.

Но это не тот вывод, который обрадовал бы ученых. Как отмечалось в главах 1 и 2, причина, по которой общая теория относительности не работает вблизи Большого взрыва, состоит в том, что она не включает принцип неопределенности, который вносит элемент случайности в квантовую теорию и о котором Эйнштейн высказался в том смысле, что Господь Бог не играет в кости. Однако все свидетельствует в пользу того, что Господь Бог завзятый игрок. Можно представлять себе Вселенную как огромное казино, в котором по каждому случаю бросают кости или крутят барабан рулетки (рис. 3.7). Возможно, вы думаете, что держать казино — очень ненадежный бизнес, поскольку каждый бросок кости или спин рулетки несет риск потери денег. Но при большом числе ставок выигрыши и проигрыши усредняются и выходит результат,



который *можно* предсказать (рис. 3.8). Владельцы казино устроивают так, чтобы отклонения усреднялись в их пользу. Вот почему они богаты. Единственный шанс выиграть для вас — поставить все свои деньги на небольшое число бросков костей или спин рулетки.

Точно так же и со Вселенной. Когда она столь велика, как сегодня, в ней совершается очень большое число бросков костей, результат усредняется и его можно предсказать. Вот почему классические законы работают для больших систем. Но когда Вселенная очень мала, как вблизи момента Большого взрыва, кости бросаются лишь небольшое число раз и принцип неопределенности становится очень важен.

Поскольку Вселенная постоянно бросает кости, чтобы выяснить, что случится дальше, у нее нет единственной истории, как можно было бы подумать. Напротив, Вселенная обладает всеми возможными историями — каждой с определенной вероятностью. Среди них должна быть и такая, в которой сборная Белиза взяла все золотые медали на Олимпийских играх, хотя, возможно, у нее и низкая вероятность. Мысль о том, что Вселенная имеет множество историй, может показаться научной фантастикой, но сегодня она принимается как научный факт. Ее сформулировал Ричард Фейнман, который был великим физиком и большим оригиналом.

Мы сейчас работаем над тем, чтобы совместить эйнштейновскую общую теорию относительности и фейнмановскую идею множественности историй в полной единой теории, которая описывает все, что случается во Вселенной. Единая теория позволит рассчитать, как будет развиваться Вселенная, если нам известно, как началась ее история. Но сама по себе единая теория не позволит узнать, с чего началась Вселенная, каким было ее исходное состояние. Для этого необходимы так называемые граничные условия, правила, которые говорят нам, что происходит на краях Вселенной, на краях пространства и времени.

Если бы край Вселенной проходил через обычную точку в пространстве и времени, мы могли бы двинуться дальше и заявить, что вышли за пределы Вселенной. С другой стороны, если бы Вселенная обрывалась на краю, где пространство и время скомканы, а плотность бесконечна, было бы очень трудно задать осмысленные граничные условия.

И все же мы с моим коллегой Джимом Хартлом поняли, что есть третий вариант. Возможно, Вселенная не имеет гра-

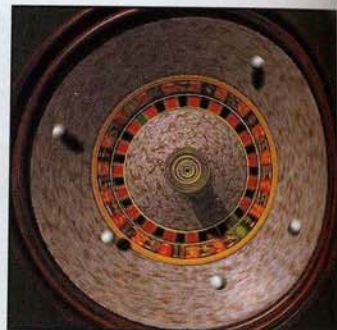
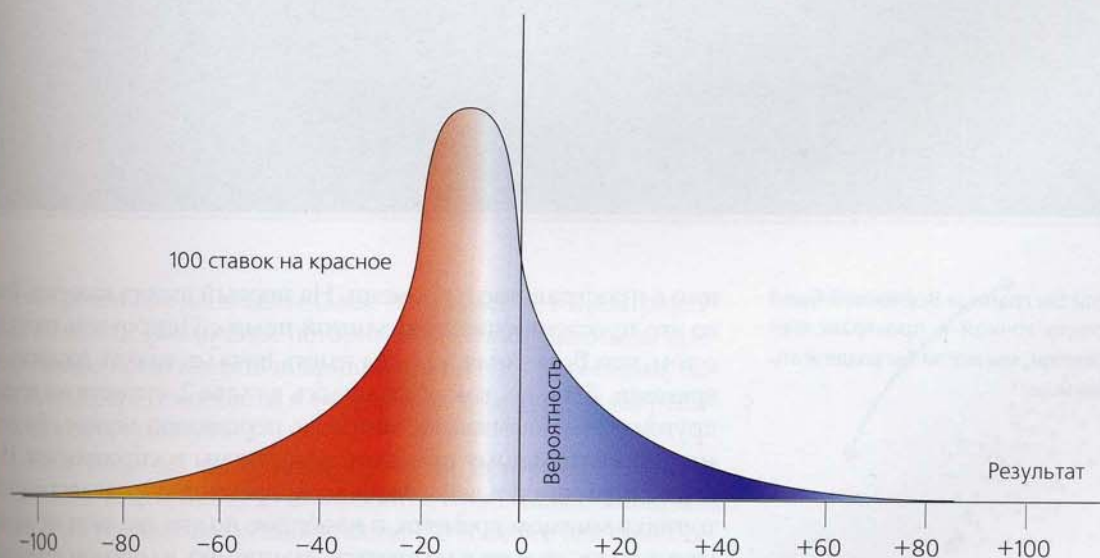
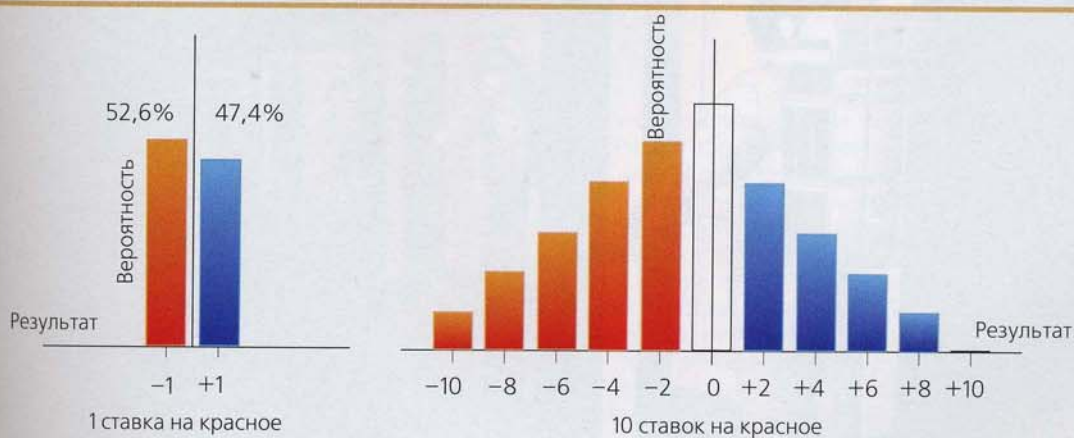
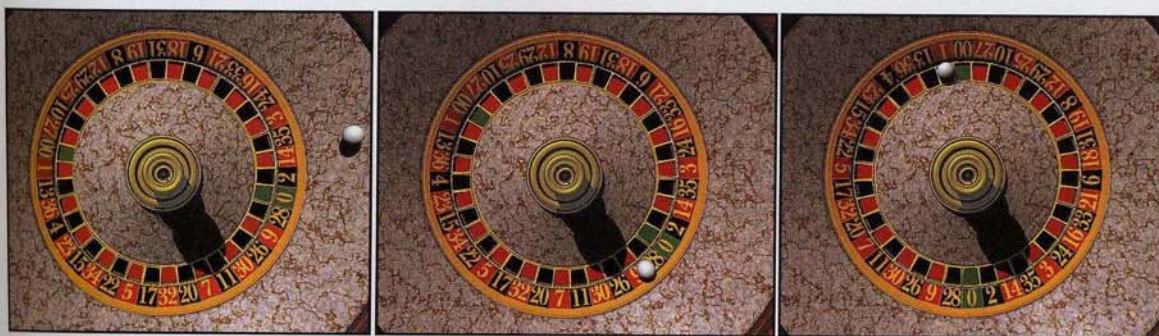


Рис. 3.7 (вверху)

Рис. 3.8 (справа)

Если игрок много раз ставит на красное, то можно с высокой точностью предсказать его выигрыш или проигрыш, поскольку результаты отдельных розыгрышей усредняются.

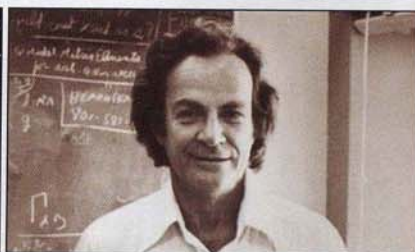
С другой стороны, невозможно предсказать исход любой отдельной ставки.





Если бы граница Вселенной была просто точкой в пространстве-времени, мы могли бы раздвигать границы.

ниц в пространстве и времени. На первый взгляд кажется, будто это противоречит доказанной нами с Пенроузом теореме о том, что Вселенная должна иметь начало, то есть границу во времени. Однако, как объяснялось в главе 2, существует время другого типа, называемое мнимым, перпендикулярное обычному действительному времени, которое мы воспринимаем. История Вселенной в действительном времени определяет его историю в мнимом времени, и наоборот, но эти два типа истории могут очень сильно различаться. Например, в мнимом времени Вселенная может не иметь начала или конца. Мнимое время ве-



Надписи на доске в Калифорнийском технологическом в момент смерти Фейнмана в 1988 г. [Слева: «Чего не могу создать, того не понимаю», «Знаю, как решить любую решенную проблему». — Перев.]

Ричард Фейнман

ФЕЙНМАНОВСКИЕ ИСТОРИИ

Ричард Фейнман родился в Нью-Йорке, в Бруклине, в 1918 г. В 1942-м получил докторскую степень под руководством Джона Уилера в Принстонском университете. Вскоре после этого был привлечен к участию в Манхэттенском проекте. Фейнман прославился неутомимым характером и розыгрышами (в Лос-Аламосе он развлекался, вскрывая сейфы с секретной информацией), а также тем, что был выдающимся физиком: он стал ключевым разработчиком теории атомной бомбы. Самую суть его личности составляло неуемное любопытство к окружающему миру. Оно не только послужило двигателем его научного успеха, но и привело к удивительным достижениям, таким как расшифровка иероглифов майя.

После Второй мировой войны Фейнман предложил новый, очень эффективный взгляд на квантовую механику, за что в 1965 г. получил Нобелевскую премию. Он поставил под сомнение фундаментальное классическое представление о том, что каждая частица имеет только одну историю. Вместо этого он предполо-

жил, что частицы перемещаются из одного места в другое вдоль всех возможных путей в пространстве-времени. С каждой траекторией Фейнман связал два числа: одно для величины (амплитуды) волны, а другое для ее фазы (положение в цикле — гребень или впадина). Вероятность того, что частица попадет из точки А в точку В, определяется суммированием волн, связанных с каждым возможным путем из А в В.

В обыденном мире предметы перемещаются из исходной точки в конечную только по одному пути. Это тем не менее согласуется с фейнмановской идеей множественности историй (суммирования по историям), поскольку для больших объектов его правило назначения чисел каждому пути гарантирует, что при совместном учете вклады всех путей, кроме одного, нейтрализуются. Только один из бесконечного числа путей имеет значение, когда мы рассматриваем движение макроскопических объектов, и эта траектория в точности соответствует той, что следует из классических, ньютоновских законов движения.

дет себя почти как дополнительное направление в пространстве. В частности, различные истории Вселенной в мнимом времени можно представлять искривленными поверхностями, подобными сфере, плоскости или седлу, но в четырех измерениях, а не в двух (рис. 3.9).

Если, подобно седлу или плоскости, истории Вселенной уходят в бесконечность, то появляются проблемы с заданием граничных условий на бесконечности. Но если все истории Вселенной в мнимом времени представляют собой замкнутые поверхности, подобные поверхности Земли, то можно полностью

Классический путь частицы



В фейнмановском интеграле по путям учитываются все возможные траектории

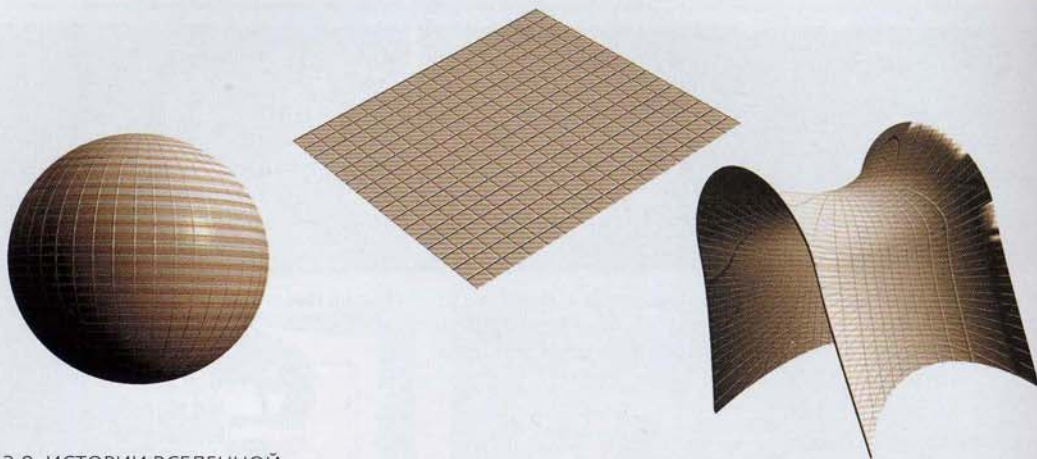


Рис. 3.9. ИСТОРИИ ВСЕЛЕННОЙ

Если истории Вселенной уходят на бесконечность, как в случае седла, то встает проблема задания граничных условий на бесконечности. Если все истории Вселенной

в мнимом времени представляют собой замкнутые поверхности, подобные поверхности Земли, тогда задавать граничные условия вовсе не требуется.

ЗАКОНЫ ЭВОЛЮЦИИ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Закон физики указывают, как начальное состояние меняется во времени. Например, если мы бросим в воздух камень, закон тяготения позволит с высокой точностью предсказать его последующее движение.

Но мы не можем предсказать, где упадет камень, основываясь на одних только законах. Нам надо также знать скорость и направление его движения в момент, когда он отрывается от руки. Другими словами, мы должны знать начальные или, как еще говорят, граничные условия движения камня.

Космология пытается описать эволюцию целой Вселенной, используя законы физики. Поэтому мы должны задаться вопросом, каковы были начальные условия Вселенной, к которым мы должны применить эти законы.

Начальное состояние может оказать весьма существенное влияние на фундаментальные свойства Вселенной, возможно даже на свойства элементарных частиц и взаимодействий, которые имеют решающее значение для развития биологической жизни.

Одно из предположений состоит в условии *отсутствия границ*, в том, что время и пространство конечны и образуют замкнутые поверхности, не имеющие границ. Предположение об отсутствии границ основывается на идее Фейнмана о множественности историй, но история частицы в фейнмановской сумме в данном случае заменяется полным пространством-временем, которое представляет историю всей Вселенной. Условие отсутствия границ — это, если быть точным, ограничение возможных историй Вселенной теми пространствами-временами, которые не имеют границ в мнимом времени. Другими словами, граничные условия для Вселенной состоят в том, что она не имеет граничных условий.

Космологи в настоящее время изучают вопрос, может ли начальная конфигурация, удовлетворяющая предположению об отсутствии границ, возможно совместно со слабым антропным принципом, привести к развитию Вселенной, подобной той, что мы наблюдаем.



уйти от задания граничных условий. Поверхность Земли не имеет никаких границ или краев. Не было достоверных сообщений, что люди с них срывались.

Если истории Вселенной в мнимом времени действительно являются замкнутыми поверхностями, как предположили мы с Хартлом, это должно иметь важные последствия для философии и для картины нашего происхождения. Вселенная в таком случае полностью замкнута и самодостаточна; не требуется ничего за ее пределами, чтобы заводить часы и заставлять их идти. Все в мире должно определяться законами природы и приводиться в движение бросанием костей внутри Вселенной. Хотя это, возможно, звучит как предположение, но я в это верю, так же как и многие другие ученые.

Даже если граничное условие для Вселенной состоит в отсутствии граничных условий, у нее все равно будет не одна история. Согласно Фейнману у нее имеется множество историй. Для каждой возможной замкнутой поверхности должна быть своя история в мнимом времени, и каждая из них определяет историю в вещественном времени.

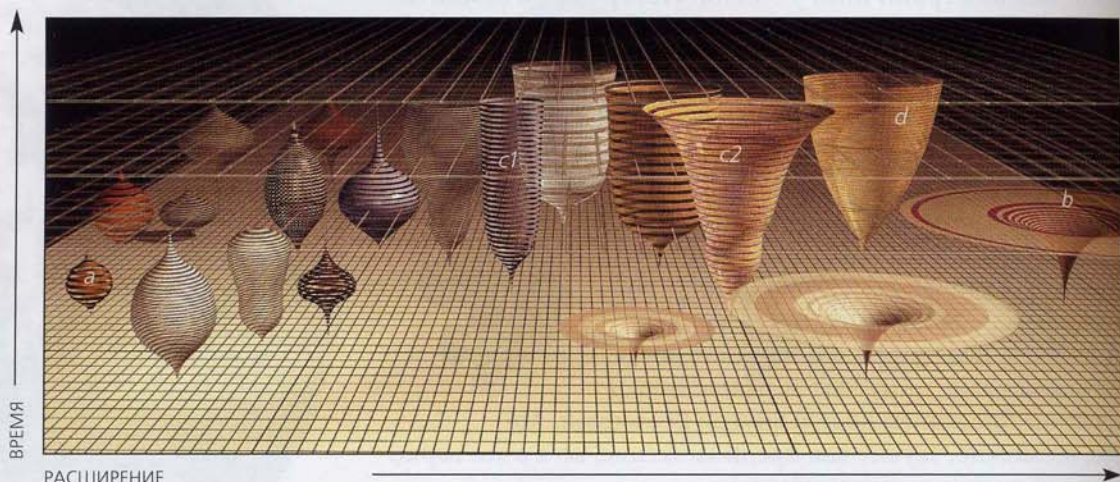
В результате мы получаем для Вселенной сверхразнообразие возможностей. Что же выделяет конкретную Вселенную, в которой мы живем, из набора всех возможных Вселенных? С одной стороны, можно заметить, что многие возможные истории Вселенной не приводят к последовательному образованию галактик и звезд, что принципиально для нашего появления на свет. Хотя не исключено, что разумные существа могут развиваться без галактик и звезд, это кажется маловероятным. Вот почему

факт существования нас самих, способных задать вопрос «Почему Вселенная такова, какова она есть?», накладывает ограничения на историю мира, в котором мы живем. Этот факт указывает на то, что реализоваться должна одна из небольшого подмножества историй, в которых имеются галактики и



Поверхность Земли не имеет границ или краев. Слухи о падении людей за край Земли несколько преувеличены.





АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП

Грубо говоря, антропный принцип утверждает, что мы видим Вселенную такой, как она есть, отчасти потому, что существуем. Этот взгляд диаметрально противоположен надеждам на создание объединенной теории, способной давать однозначные предсказания на основании исчерпывающего набора законов физики и согласно которой наш мир таков, каков он есть, поскольку не может быть другим. Существует много разных вариаций антропного принципа: начиная со слабых до тривиальности и кончая столь сильными, что они становятся абсурдными. Хотя большинство ученых неохотно признает лишь сильный антропный принцип, есть такие, кто готов оспаривать даже рассуждения, основанные на слабом.

Слабый антропный принцип сводится к объяснению того, в каких из множества эпох или частей Вселенной мы *могли бы* жить. Например, Большой взрыв должен был произойти порядка 10 млрд лет назад: Вселенная должна быть достаточно старой, чтобы

некоторые звезды уже завершили свою эволюцию и наработали такие составляющие нас элементы, как кислород и углерод, но в то же время достаточно молодой, чтобы еще оставались звезды, способные поддерживать своей энергией существование жизни.

В рамках предположения об отсутствии границ можно использовать фейнмановские правила для назначения чисел каждой истории Вселенной, чтобы определить, какими свойствами она будет обладать с наибольшей вероятностью. В этом контексте антропный принцип проявляется как требование того, чтобы истории содержали разумную жизнь. Конечно, нас меньше беспокоил бы антропный принцип, если бы можно было показать, что из множества различных начальных конфигураций Вселенная склонна развиваться так, что бы образовался мир, подобный тому, что мы наблюдаем. Это могло бы означать, что начальное состояние той части мира, в которой мы обитаем, не обязательно должно было выбираться с особой тщательностью.



Рис. 3.10

Слева: вселенные (a), которые коллапсируют, становясь закрытыми. Справа: открытые вселенные (b), которые продолжают расширяться вечно.

Пограничные вселенные, балансирующие между падением на себя и дальнейшим расширением (c1), или с двойной инфляцией (c2) могут служить прибежищем разумной жизни. Наша Вселенная (d) пока продолжает расширяться.



Двойная инфляция оставляет шанс разумной жизни



Раздувание нашей собственной Вселенной пока продолжается

звезды. Это иллюстрация так называемого антропного принципа. Он говорит, что Вселенная должна быть более или менее похожа на ту, что мы наблюдаем, поскольку, если бы она оказалась иной, не было бы никого, кто мог бы ее наблюдать (рис. 3.10). Многим ученым не нравится антропный принцип, поскольку он кажется им нечетким и не обладающим большой предсказательной силой. Однако антропному принципу можно придать точную формулировку, и он кажется существенным при обсуждении происхождения Вселенной. М-теория, упомянутая в главе 2, допускает огромное разнообразие историй Вселенной. Большинство из этих историй не подходят для развития разумной жизни: пустые, слишком короткие, чрезмерно искривленные или неподходящие еще по каким-то параметрам. Причем согласно идее Ричарда Фейнмана о множественности историй эти необитаемые варианты могут иметь очень высокую вероятность (см. с. 92).

Фактически не имеет значения, сколько может быть историй, в которых нет разумных существ. Нас интересует только то подмножество, в котором разумная жизнь развивается. Необязательно, чтобы она была чем-то похожа на людей. Маленькие зеленые человечки тоже годятся. Возможно, они даже больше подходят. За человеческой расой числится не так уж много разумных свершений.

В качестве примера силы антропного принципа рассмотрим число измерений пространства. Из практики хорошо



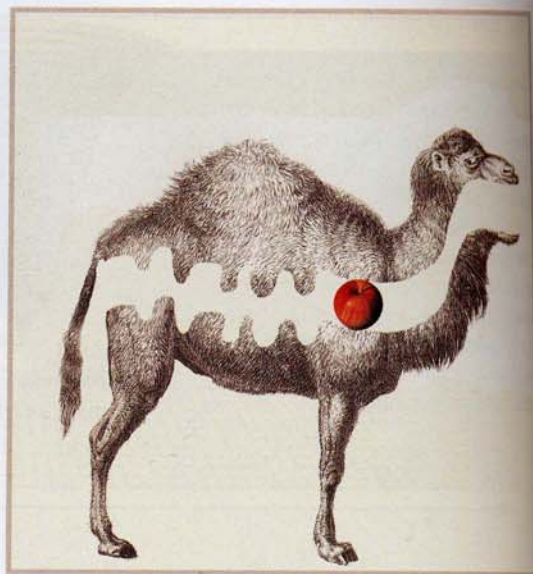


Рис. 3.11

С расстояния соломинка в стакане может выглядеть как одномерная линия.

известно, что мы живем в трехмерном пространстве. Это означает, что положение точки в пространстве можно задать тремя числами, например широтой, долготой и высотой над уровнем моря. Но почему пространство трехмерно? Почему не два, не четыре, не какое-то другое число измерений, как бывает в научной фантастике? В М-теории пространство имеет девять или десять измерений, но считается, что шесть или семь из них свернуты до очень малых размеров и только три измерения достаточно велики и являются приблизительно плоскими (рис. 3.11).

Почему мы не обитаем в сценарии, где свернуты восемь измерений и только два доступны восприятию? Двумерным животным было бы нелегко переваривать пищу. Если бы их пищеварительный тракт проходил насквозь, он разделял бы животное надвое и бедное создание распалось бы на части. Так что двух плоских измерений недостаточно для сколько-нибудь сложной и разумной жизни. С другой стороны, если бы было четыре или больше «развернутых» измерений, гравитационное притяжение между двумя телами быстрее возрастало бы при сближении. Это означает, что вокруг звезд не было бы стабильных орбит для планет. Планеты либо падали бы на звезды (рис. 3.12, *вверху*), либо пропадали в темноте и холоде окружающего космоса (рис. 3.12, *внизу*).

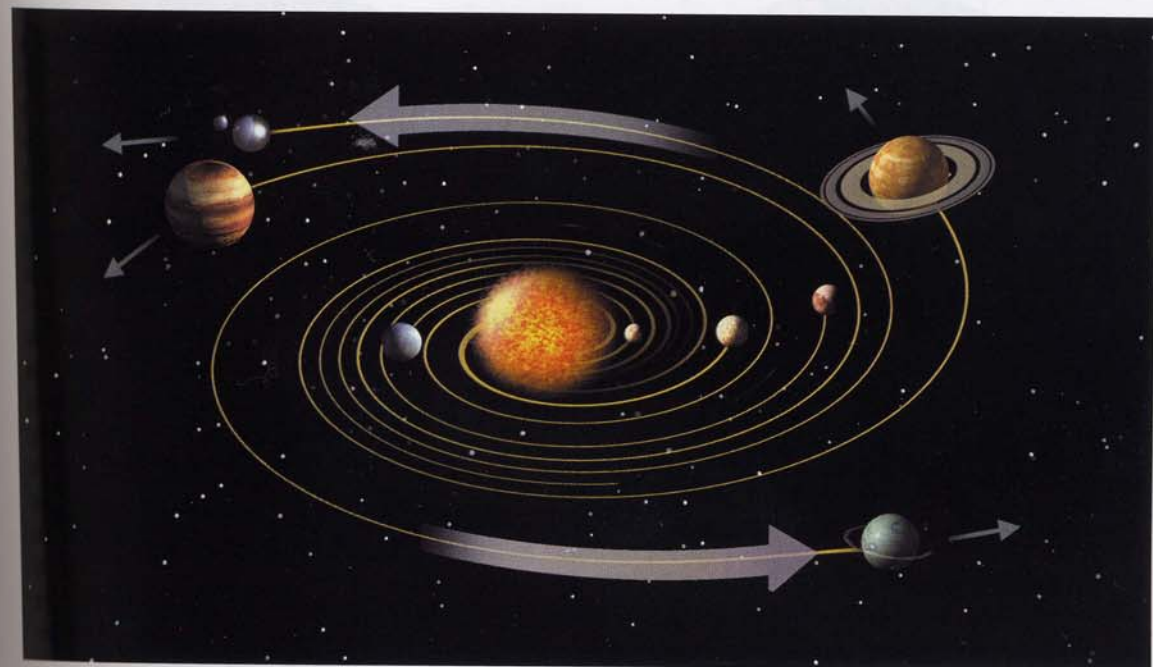


Рис. 3.12
В таком мире планеты либо падали бы на звезды (*вверху*), либо пропадали во мраке и холоде космоса (*внизу*).



История в мнимом времени

История в действительном времени

Рис. 3.13

Простейшая история без границ в мнимом времени — это сфера.

Она детерминирует историю в действительном времени, которая испытывает инфляционное расширение.

Аналогичным образом были бы нестабильны орбиты электронов в атомах и привычное нам вещество не могло бы существовать. Так что, хотя концепция множественности историй позволяет существовать любому числу несвернутых измерений, только в сценариях с тремя такими измерениями могут быть разумные существа. Лишь в этих сценариях будет задан вопрос «Почему пространство имеет три измерения?».

Простейшая история Вселенной в мнимом времени — это сфера, подобная поверхности Земли, но с двумя дополнительными измерениями (рис. 3.13). Она задает в действительном времени, которое является предметом нашего опыта, такую историю, в которой Вселенная одинакова во всех точках пространства и расширяется во времени. В этом отношении она похожа на Вселенную, в которой мы живем. Однако скорость расширения получается очень большой и продолжает увеличиваться.



Рис. 3.14

ЭНЕРГИЯ ВЕЩЕСТВА

ГРАВИТАЦИОННАЯ ЭНЕРГИЯ

ваться. Такое ускоряющееся расширение называют инфляцией, поскольку оно напоминает, как в постоянно ускоряющемся темпе растут цены.

Инфляция пен обычно считается негативным явлением, но в случае Вселенной она очень выгодна. Сильная инфляция сглаживает любые комки материи, которые могли образоваться в ранней Вселенной. По мере расширения Вселенная заимствует энергию у гравитационного поля, чтобы создать больше вещества. Положительная энергия вещества в точности уравнивается отрицательной гравитационной энергией, так что полный энергетический баланс равен нулю. Когда Вселенная удваивает свой размер, энергии вещества и гравитации тоже становится вдвое больше — но дважды ноль по-прежнему ноль. Если бы только банковский мир был таким простым (рис. 3.14)!

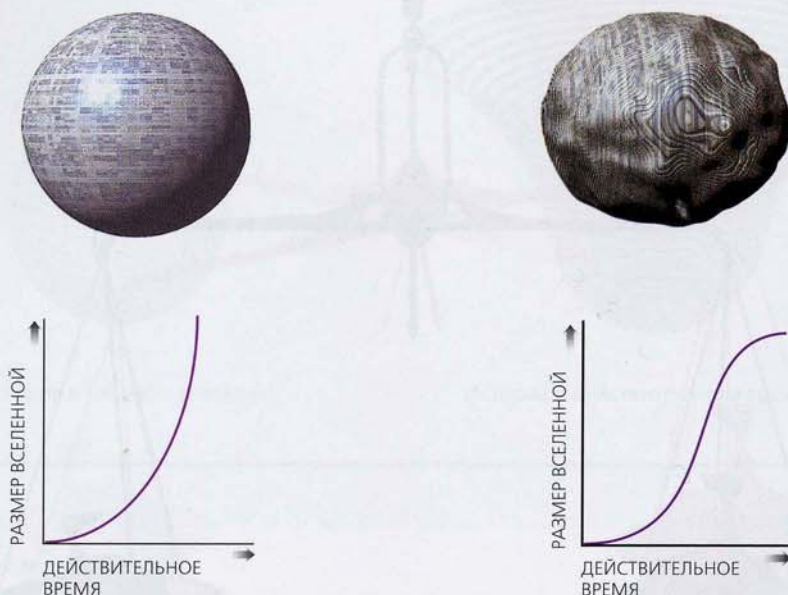


Рис. 3.15. ИНФЛЯЦИОННАЯ ВСЕЛЕННАЯ

В модели горячего Большого взрыва на ранних стадиях развития Вселенной времени было недостаточно для того, чтобы тепловая энергия перетекла из одного региона Вселенной в другой. Тем не менее мы наблюдаем, что во всех направлениях температура микроволнового фонового излучения одинакова. Это означает, что в начальном состоянии Вселенная должна была повсеместно иметь в точности одинаковую температуру.

В попытках найти модель, где множество различных начальных конфигураций могли бы эволюционировать в нечто похожее на современную Вселенную, было выдвинуто предположение, что ранняя Вселенная прошла через эпоху очень быстрого расширения. Это расширение называют инфляционным, подразу-

мевая, что оно происходит во все возрастающем темпе, а не с замедлением, как расширение, наблюдаемое сегодня. Существование такой фазы инфляции способно объяснить, почему Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях, поскольку в ранней Вселенной свет успевал пройти из одного района Вселенной в другой.

История в мнимом времени для Вселенной, которая вечно продолжает расширяться в инфляционном режиме, представляет собой идеальную сферу. Однако в нашей собственной Вселенной инфляционное расширение спустя долю секунды затормозилось и начали формироваться галактики. В мнимом времени это означает, что история нашей Вселенной представляет собой сферу, слегка сплюснутую у южного полюса.



ИНДЕКС ОПТОВЫХ ЦЕН – ИНФЛЯЦИЯ И ГИПЕРИНФЛЯЦИЯ

Июль 1914 г.	1,0		
Январь 1919 г.	2,6		Одна немецкая марка 1914 г.
Июль 1919 г.	3,4		
Январь 1920 г.	12,6		Сто тысяч марок 1923 г.
Январь 1921 г.	14,4		
Июль 1921 г.	14,3		Два миллиона марок 1923 г.
Январь 1922 г.	36,7		
Июль 1922 г.	100,6		Десять миллионов марок 1923 г.
Январь 1923 г.	2 785,0		
Июль 1923 г.	194 000,0		Сто миллиардов марок 1923 г.
Ноябрь 1923 г.	726 000 000 000,0		

В случае, когда история Вселенной в мнимом времени является идеальной сферой, в действительном времени ей соответствует история Вселенной, которая вечно продолжает раздуваться в инфляционном режиме. Пока она раздувается, вещество не может сгущаться и образовывать галактики, звезды и жизнь, не говоря уже о развитии разумных существ вроде нас. Поэтому хотя идеально сферические истории Вселенной в мнимом времени допускаются представлением о множественности историй, они не представляют большого интереса. Гораздо больше подходят нам истории в мнимом времени, которые слегка сплюснуты у южного полюса сферы (рис. 3.15).

В этом случае соответствующая история в реальном времени будет расширяться в ускоренном инфляционном режиме только вначале. А потом расширение начнет замедляться и смогут образоваться галактики. Чтобы могла появиться разумная жизнь, приплюснутость на южном полюсе должна быть очень слабой. Это будет означать, что первоначально Все-

Рис. 3.16
ИНФЛЯЦИЯ МОЖЕТ БЫТЬ
ЗАКОНОМ ПРИРОДЫ

Инфляция в Германии началась после окончания Первой мировой войны, и к февралю 1920 г. уровень цен поднялся в 5 раз по сравнению с 1918 г. После июля 1922 г. наступила фаза гиперинфляции. Всякое доверие к деньгам исчезло, и в течение 15 месяцев индекс цен рос все быстрее и быстрее, превосходя возможности печатных станков, которые не успевали печатать деньги с той же скоростью, с какой они обесценивались. К концу 1923 г. 300 бумажных фабрик работали на полную мощность, а в 150 типографиях 2 тысячи печатных станков круглосуточно производили банкноты.



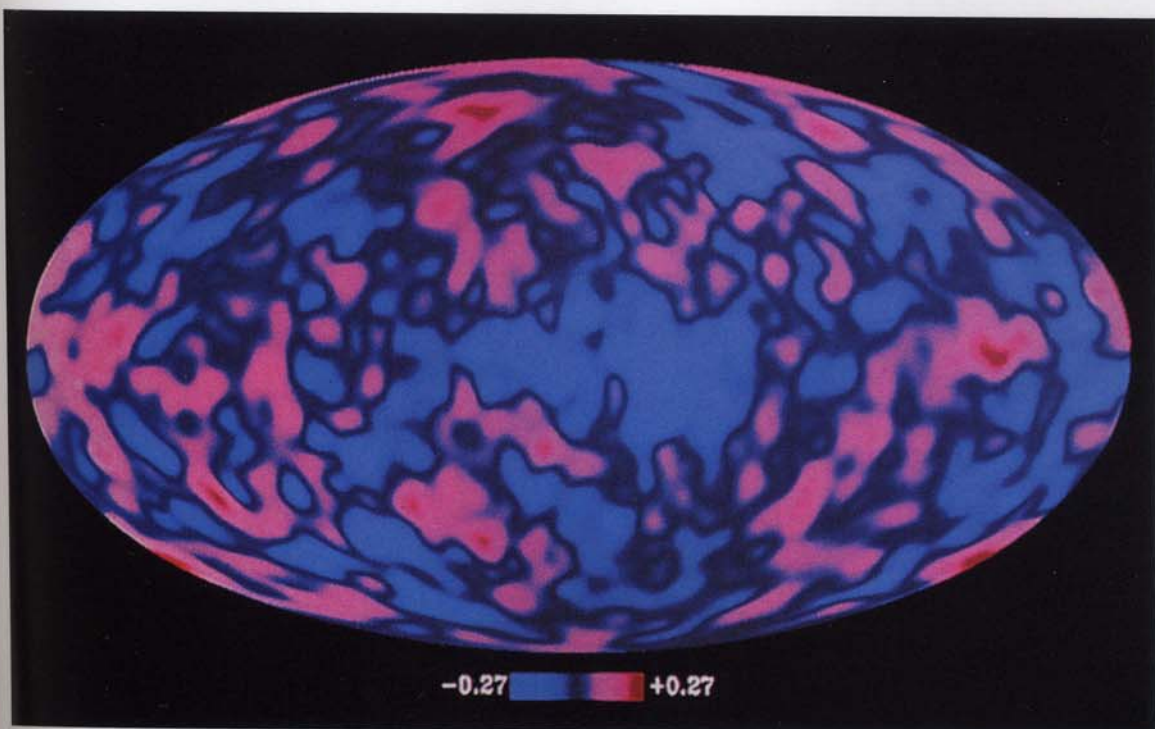
Рис. 3.17
ВЕРОЯТНЫЕ
И НЕВЕРОЯТНЫЕ ИСТОРИИ

Гладкие истории наподобие *a* наиболее вероятны, но их существует лишь небольшое число.

Хотя любая слегка неправильной формы история вроде *b* или *c* сама по себе менее вероятна, число их столь велико, что, скорее всего, история Вселенной обнаружит небольшие отклонения от гладкости.

ленная расширится до чудовищной величины. Рекордный уровень денежной инфляции имел место в Германии между двумя мировыми войнами, когда цены выросли в миллиарды раз, однако масштаб инфляции, которую должна была испытать Вселенная по крайней мере в миллиард миллиардов миллиардов раз больше (рис. 3.16).

Вследствие принципа неопределенности у Вселенной не должно быть только одной истории, содержащей разумную жизнь. Напротив, множество историй в мнимом времени образует целое семейство слегка деформированных сфер, каждой из которых соответствует история в действительном времени, с долгим, но не бесконечным инфляционным раздуванием Вселенной. Можно поинтересоваться: какая из таких допустимых историй наиболее вероятна? Оказывается, она не идеально ровная, а представляет собой поверхность с крошечными поднятиями и впадинами (рис. 3.17). Правда, эта рябь на самой вероятной истории едва заметна. Отклонения от ровной поверхности составляют по порядку величины один к ста тысячам. Тем не менее, хотя они и крайне малы, мы можем наблюдать их как небольшие вариации в микровол-



новом излучении, которое приходит с разных направлений в космосе. Спутник Cosmic Background Explorer (COBE), запущенный в 1989 г., построил карту неба в микроволновом диапазоне.

Цветом обозначены различия в температуре, причем весь диапазон от красного до голубого соответствует разбросу всего в одну десятитысячную долю градуса — этих различий между областями ранней Вселенной достаточно, чтобы избыточное тяготение в более плотных областях остановило их бесконечное расширение и вызвало сжатие под действием самогравитации, ведущее к образованию галактик и звезд. Так что карта COBE, в принципе, является ни больше ни меньше как чертежом всех структур во Вселенной.

Каким окажется будущее для наиболее вероятных историй Вселенной, совместимых с появлением разумных существ? Тут видятся разные варианты в зависимости от количества вещества во Вселенной. Если его больше некоторого критического значения, гравитационное притяжение между галактиками замедлит и в конце концов остановит их разлет. Затем они начнут падать друг к другу и сойдутся в Большом

Карта всего неба, полученная инструментом DMR на спутнике COBE, говорит в пользу существования складок времени



Рис. 3.18 (вверху)

Один из возможных сценариев конца Вселенной — Большое сжатие, гигантский катаклизм, когда вся материя будет всосана в гравитационный колодец.

Рис. 3.19 (справа)

Долгий холодный вой, в котором все замирает и гаснут последние звезды, исчерпывая свои запасы топлива.

сжатии, которое станет концом истории Вселенной в реальном времени (рис. 3.18).

Если плотность Вселенной ниже критического значения, гравитация слишком слаба, чтобы предотвратить вечное разлетание галактик. Все звезды прогорят, и Вселенная будет становиться все более пустой и холодной. Так что и тут все придет к концу, хотя и не столь драматичному. В любом случае Вселенная просуществует еще немало миллиардов лет (рис. 3.19).

Наряду с веществом Вселенная может содержать так называемую энергию вакуума, которая присутствует даже в пустом, казалось бы, пространстве. По знаменитому уравнению Эйнштейна $E = mc^2$ энергия вакуума имеет массу. Это означает, что она оказывает гравитационное влияние на расширение Вселенной. Однако весьма примечательно, что воздействие энергии вакуума противоположно влиянию обычной материи. Вещество замедляет расширение и может в итоге остановить и обратить его вспять. Энергия вакуума, напротив, уско-



ряет расширение, как при инфляции. Фактически она действует в точности как космологическая постоянная, которую, как говорилось в главе 1, Эйнштейн добавил в свои первоначальные уравнения в 1917 г., когда понял, что они не допускают решения, соответствующего стационарной Вселенной. После открытия Хабблом расширения Вселенной основания для добавления в уравнения космологической постоянной исчезли, и Эйнштейн отбросил ее, как ошибку.

Однако она могла вовсе и не быть ошибкой. Как говорилось в главе 2, мы сейчас понимаем: квантовая теория указывает на то, что пространство-время заполнено квантовыми флуктуациями. В суперсимметричной теории бесконечные положительные и отрицательные энергии этих флуктуаций основного состояния взаимно нейтрализуются частицами с разным спином. Но мы не можем ожидать, что положительные и отрицательные энергии компенсируют друг друга столь точно, что не останется даже небольшого конечного количества энергии

НЕ БЫЛА ЛИ
КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ
ПОСТОЯННАЯ
МОЕЙ
ВЕЛИЧАЙШЕЙ
ОШИБКОЙ?

Альберт Эйнштейн

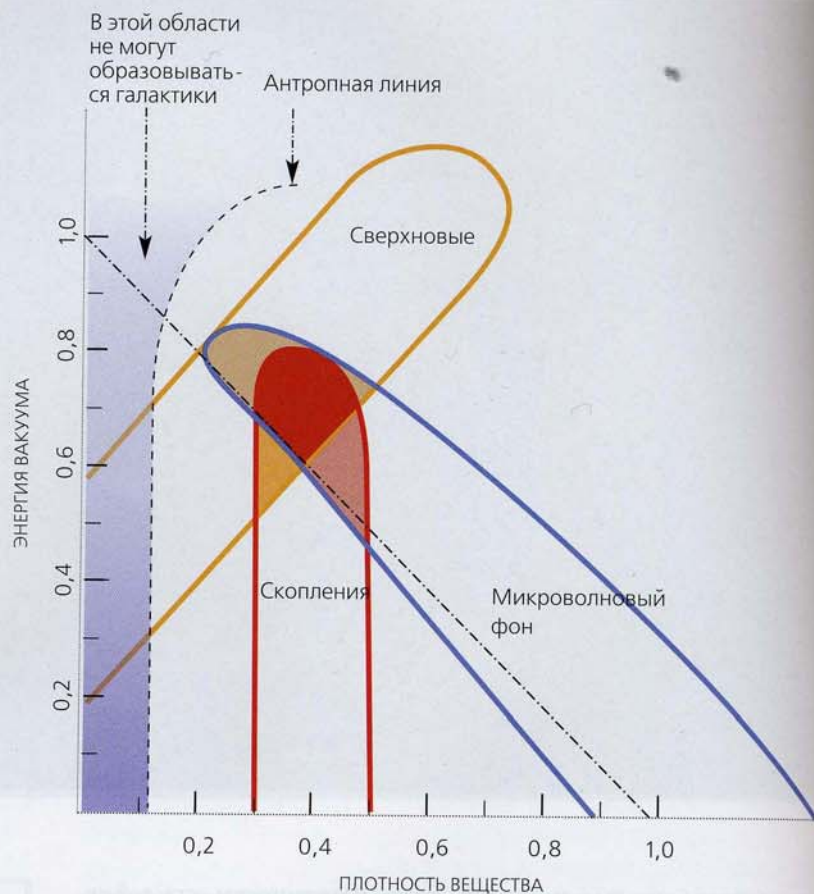


Рис. 3.20

Объединяя наблюдения далеких сверхновых и космического микроволнового излучения с данными о распределении вещества во Вселенной, можно с очень высокой точностью определить энергию вакуума и плотность вещества во Вселенной.

вакуума, поскольку Вселенная не находится в суперсимметричном состоянии. Единственная неожиданность состоит в том, что эта энергия столь близка к нулю, что ее не обнаружили раньше. Возможно, это другое проявление антропного принципа. История с большей энергией вакуума не привела бы к образованию галактик и не содержала бы существ, которые задали вопрос «Почему энергия вакуума имеет то значение, которое мы наблюдаем?».

Количество вещества и энергии вакуума во Вселенной можно пытаться определять различными наблюдательными методами, а результаты представить на диаграмме, где плотность вещества отложена по горизонтальной оси, а энергия вакуума — по вертикальной. Пунктирная линия показывает границы области, в которой способна развиваться разумная жизнь (рис. 3.20).



*Я бы и в ореховой скорлупе
считал себя властелином
необъятного пространства.*

У. Шекспир.
Гамлет. Акт 2, сцена 2



Наблюдения сверхновых, скопления галактик и микроволнового фона также задают свои области на этой диаграмме. К счастью, все три области имеют общее пересечение. Если плотности вещества и энергия вакуума попадают в это пересечение, это означает, что расширение Вселенной вновь начало ускоряться после долгого периода замедления. Похоже, инфляция может оказаться законом природы.

В этой главе мы показали, как поведение пространства Вселенной можно объяснить в терминах ее истории в мнимом времени, которая представляет собой крошечную, слегка сплюснутую сферу. Что-то наподобие Гамлетовой скорлупы, только в этом орехе закодировано все, что случается в действительном времени. Так что Гамлет был совершенно прав. Мы можем быть заключены в ореховую скорлупку и все равно считать себя царями бесконечного космоса.

ГЛАВА 4

ПРЕДСКАЗЫВАЯ БУДУЩЕЕ

*О том, как потеря информации
в черных дырах может ослабить нашу способность
предсказывать будущее*





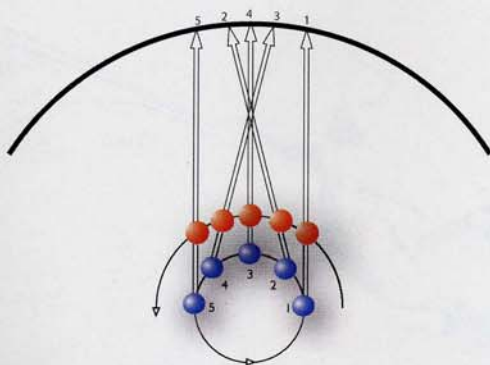


Рис. 4.1

Наблюдатель на Земле (синяя), обращающийся вокруг Солнца, наблюдает Марс (красный) на фоне созвездий.

Сложные видимые движения планет можно объяснить законами Ньютона, и они никак не влияют на личное счастье.

Человеческая раса всегда хотела контролировать будущее или, по крайней мере, предсказывать, что должно случиться. Именно поэтому столь популярна астрология. Она утверждает, что события на Земле связаны с движениями планет по небу. Это научно проверяемая гипотеза или могла бы быть таковой, если бы астрологи рискнули давать ясные предсказания, допускающие проверку. Но они достаточно умны, чтобы делать свои прогнозы столь туманными, что их можно отнести к любому исходу. Утверждения вроде «личные отношения могут стать интенсивнее» или «вам представится благоприятная в финансовом отношении возможность» никогда нельзя надежно опровергнуть.

Однако действительная причина, по которой ученые не верят в астрологию, связана не с научными фактами или их отсутствием, а с тем, что астрология несовместима с другими теориями, которые были проверены в экспериментах. Когда Коперник и Галилей открыли, что планеты обращаются вокруг Солнца, а не вокруг Земли, а Ньютон открыл законы, которые управляют их движением, астрология стала крайне неправдоподобной. С чего бы положение других планет на фоне далеких звезд, каким оно видится с Земли, могло коррелировать с молекулами на небольшой планете, которые называют себя разумной жизнью (рис. 4.1)? А ведь это именно то, в чем астрология хотела бы нас убедить. Некоторые теории, описанные в этой книге, имеют не больше экспериментальных подтверждений, чем ас-



В этом месяце Марс находится в Стрельце, и для вас это будет время самопознания. Марс требует от вас прожить жизнь в согласии с тем, что считаете правильным вы, а не другие, воображающие себя правыми. И это случится.

В 20-х числах Сатурн перемещается в область вашей солнечной карты, связанную с обязательствами и карьерой, и вам предстоит научиться брать на себя ответственность и иметь дело со сложными отношениями.

Однако в период полнолуния вы получите удивительное откровение и сможете охватить взглядом всю вашу жизнь, и это вас преобразит.

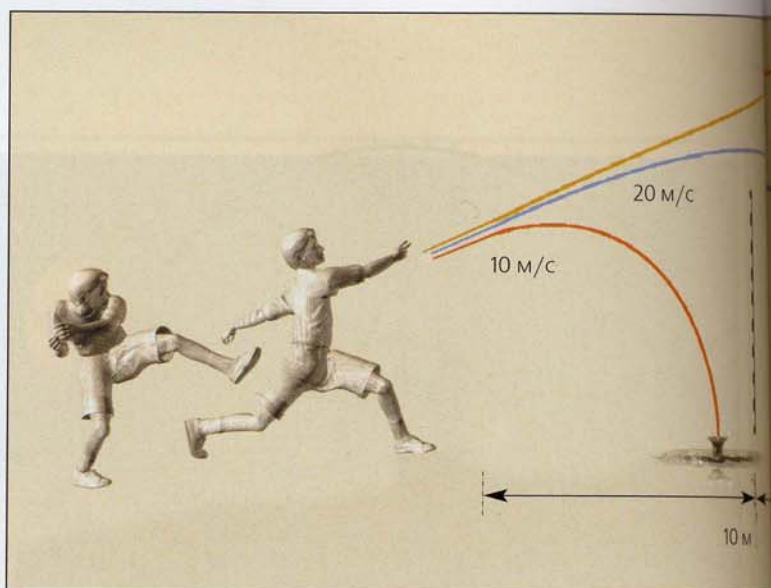


Рис. 4.2

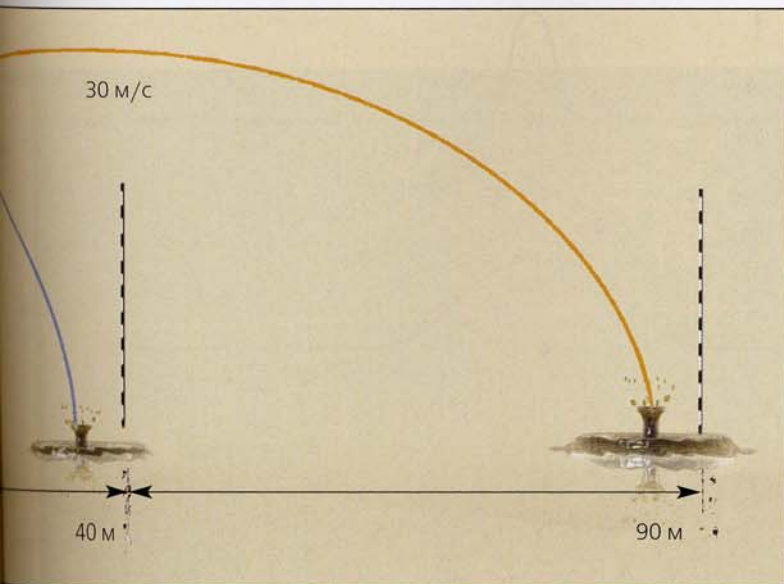
Зная, с какой скоростью брошен бейсбольный мяч, вы можете предсказать, сколько он пролетит.

рология, но мы верим в них, поскольку они совместимы с теориями, которые выдержали проверку. Успех законов Ньютона и других физических теорий привел к идее научного детерминизма, которую впервые высказал в начале XIX века французский ученый маркиз де Лаплас. Он предположил, что если мы узнаем положения и скорости всех частиц во Вселенной в один момент времени, то законы физики должны позволить нам предсказать состояние Вселенной в любой другой момент времени в прошлом и в будущем (рис. 4.2).

Другими словами, если научный детерминизм верен, мы, в принципе, могли бы предсказывать будущее и не нуждались бы в астрологии. Конечно, на практике даже такие простые уравнения, как те, что вытекают из ньютоновской теории тяготения, невозможно решить точно более чем для двух частиц. К тому же уравнения часто обладают свойством, называемым хаотичностью, из-за которого небольшое изменение положения или скорости в один момент времени приводит к совершенно иному поведению системы спустя некоторое время. Как знают те, кто смотрел «Парк юрского периода», крошечное возмущение в одном месте может повлечь за собой большие перемены в другом. Бабочка, взмахнувшая крыльями в Токио, способна вызвать дождь в Центральном парке Нью-Йорка (рис. 4.3). Проблема в том, что последовательность событий невоспроизводима. В следующий раз, когда бабочка взмахнет крыльями, огромное множество других факторов окажутся



Рис. 4.3



инными, и они тоже будут влиять на погоду. Вот почему прогнозы синоптиков столь ненадежны.

По той же причине мы не достигли больших успехов в предсказании человеческого поведения на основе математических уравнений, хотя законы квантовой электродинамики должны, в принципе, позволять нам вычислить всё в химии и биологии. Тем не менее, несмотря на эти практические трудности, большинство ученых успокаивает себя мыслью, что — опять же в принципе — будущее все-таки предсказуемо.

На первый взгляд детерминизм должен был быть подорван принципом неопределенности, который говорит, что мы не можем одновременно точно измерить и положение, и скорость частицы. Чем точнее мы измеряем положение, тем менее точно определяется ее скорость, и наоборот. Лапласовская версия детерминизма утверждает, что если мы знаем положения и скорости частиц в некоторый момент времени, то можем определить их положения и скорости в любой момент в прошлом и в будущем. Но как приступить к этому делу, если принцип неопределенности мешает нам точно узнать положения и скорости в один и тот же момент времени? Как бы ни был хорош наш компьютер, если мы введем в него неточные данные, то получим неточные предсказания.

Однако детерминизм был восстановлен в модифицированной форме новой теорией, называемой квантовой механи-

Ввод



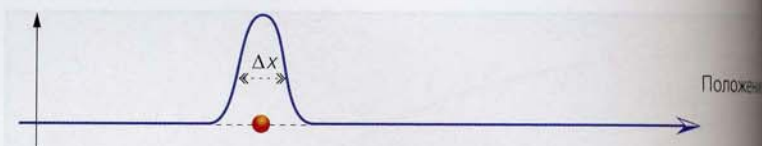
? !



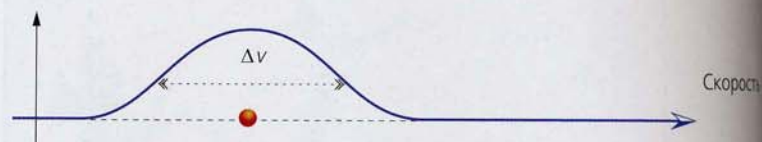
Вывод



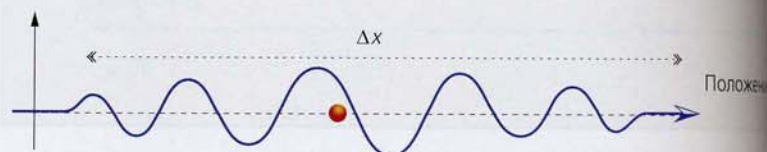
Волновая функция Ψ с узким пиком



Распределение вероятности для скорости частицы



Волновая функция Ψ волнового пакета



Распределение вероятности для скорости частицы

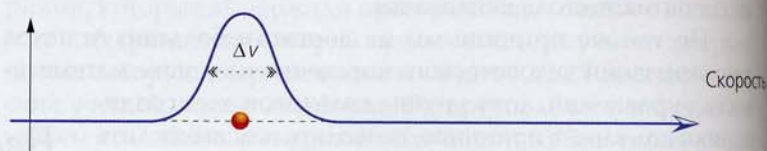


Рис. 4.4

Волновая функция определяет вероятности того, что частица будет иметь разные положения и скорости, таким образом, что Δx и Δv удовлетворяют принципу неопределенности.

кой, которая включает в себя принцип неопределенности. Упрощенно говоря, квантовая механика позволяет точно предсказать половину того, что было возможно согласно классической лапласовской точке зрения. У частицы в квантовой механике нет точно определенных положения и скорости, но ее состояние можно описать так называемой волновой функцией (рис. 4.4).

Волновая функция — это числовое значение в каждой точке пространства, которое дает вероятность того, что частица обнаружится в данном месте. Быстрота, с которой волновая функция изменяется от точки к точке, говорит нам о том, насколько вероятны различные скорости частицы. Некоторые волновые функции имеют четкий пик в определенной точке пространства. В таких случаях существует лишь небольшая неопределенность в положении частицы. Но из диаграммы видно, что в этом случае волновая функция быстро меняется в окрестности данной точки — поднимается с одной стороны и падает с другой. Это означает, что распределение вероятности для скорости является

$$\psi_0 \bar{\psi}_0 = \sqrt{\frac{m}{\pi}} e^{-\frac{1}{2}(V_0 \vec{x}_i^2 + A)}$$

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

очень широким. Иными словами, велика неопределенность скорости. Рассмотрим, с другой стороны, непрерывную череду идущих друг за другом волн. Теперь велика неопределенность положения, но мала неопределенность скорости. Так что описание частицы при помощи волновой функции не имеет хорошо определенного положения или скорости. Оно удовлетворяет принципу неопределенности. Теперь понятно, что волновая функция — это *все*, что поддается точному определению. Мы не можем даже предположить, что частица имеет положение и скорость, которые известны Богу, но скрыты от нас. Подобные теории со «скрытыми переменными» дают предсказания, которые не согласуются с наблюдениями. Даже Бог ограничен принципом неопределенности и не может знать сразу и положения, и скорости — только волновую функцию.

Скорость, с которой волновая функция изменяется во времени, задается так называемым уравнением Шрёдингера (рис 4.5). Зная волновую функцию в один момент времени,

Рис. 4.5
УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА

Эволюция во времени волновой функции Ψ определяется оператором Гамильтона H , который связан с энергией рассматриваемой системы.

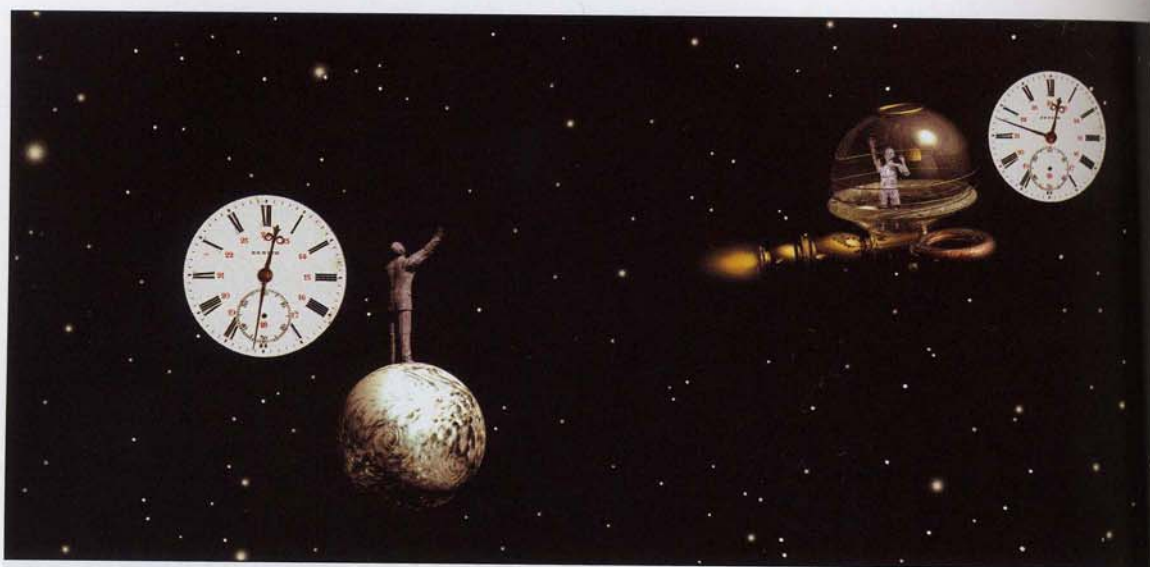
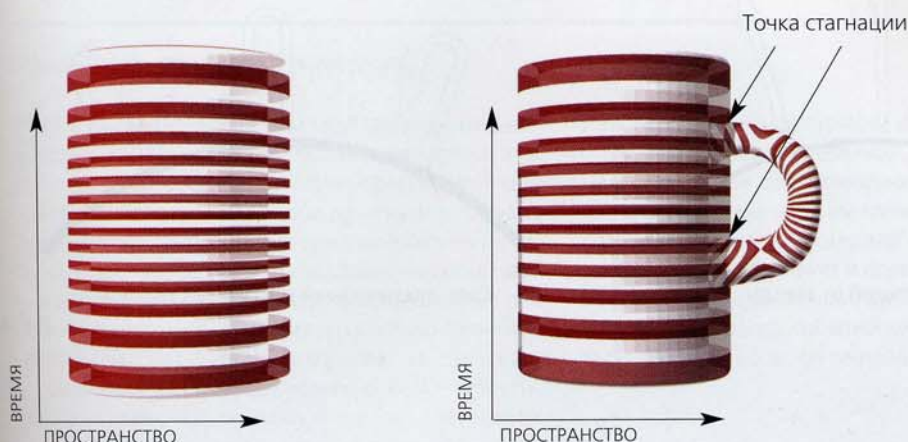


Рис. 4.6

В плоском пространстве-времени специальной теории относительности наблюдатели, движущиеся с разной скоростью, будут по-разному измерять время, но мы можем использовать уравнение Шрёдингера в любом из этих времен для предсказания того, что произойдет с волновой функцией в будущем.

можно использовать уравнение Шрёдингера, чтобы вычислить ее в любой другой момент — прошлый или будущий. Таким образом, детерминизм сохраняется в квантовой теории, но в меньшем объеме. Вместо того чтобы предсказать сразу и положение, и скорость, мы можем предсказать только волновую функцию. Это позволяет нам точно предсказывать либо положение, либо скорости, но не то и другое. Так что в квантовой теории возможность делать точные предсказания ровно вдвое меньше, чем в классической лапласовской картине мира. Тем не менее в этом ограниченном смысле можно по-прежнему утверждать, что детерминизм в ней сохраняется.

Между тем использование уравнения Шрёдингера для отслеживания изменений волновой функции во времени (то есть для предсказания того, какой она станет в будущем) неявно предполагает, что время всегда и везде течет равномерно. Это, конечно, верно для ньютоновской физики. В ней время считалось абсолютным, и это означало, что каждое событие в истории Вселенной помечено числом, называемым моментом времени, и что последовательности временных меток непрерывно тянутся из бесконечного прошлого в бесконечное будущее. Это можно назвать общепринятым представлением о времени, которое лежит в основе всех суждений у большинства людей и даже у большинства физиков. Но в 1905 г., как мы уже знаем, концепция абсолютного времени была ниспровергнута специальной теорией относительности, в которой время не было больше



независимой, самодостаточной величиной, а стало лишь одним из направлений в четырехмерном континууме, называемом пространством-временем. В специальной теории относительности различные наблюдатели движутся сквозь пространство-время с разными скоростями и в разных направлениях. У каждого наблюдателя есть своя собственная мера времени вдоль пути, который он проходит, и разные наблюдатели измеряют разные интервалы времени между одними и теми же событиями (рис. 4.6).

Итак, в специальной теории относительности нет абсолютного времени, которое можно использовать для пометки событий. Но вместе с тем пространство специальной теории относительности плоское. Это означает, что в ней время, измеряемое любым свободно движущимся наблюдателем, равномерно растет от минус бесконечности в прошлом до плюс бесконечности в будущем. Любую из этих временных шкал можно использовать в уравнении Шрёдингера, описывающем эволюцию волновой функции. Так что в специальной теории относительности по-прежнему в силе квантовая версия детерминизма.

Ситуация меняется в общей теории относительности, где пространство-время не плоское, а искривленное и деформируется под воздействием находящихся в нем материи и энергии. В нашей Солнечной системе кривизна пространства-времени столь незначительна, что не создает помех привычному для нас представлению о времени. В этом случае мы можем продолжать

Рис. 4.7
ВРЕМЯ ОСТАНАВЛИВАЕТСЯ

Ход времени неизбежно останавливался бы в точках стагнации, где ручка примыкает к основному цилиндру. В этих точках время не будет увеличиваться ни в каком направлении. Поэтому невозможно использовать уравнение Шрёдингера, чтобы предсказать, какой станет волновая функция в будущем.

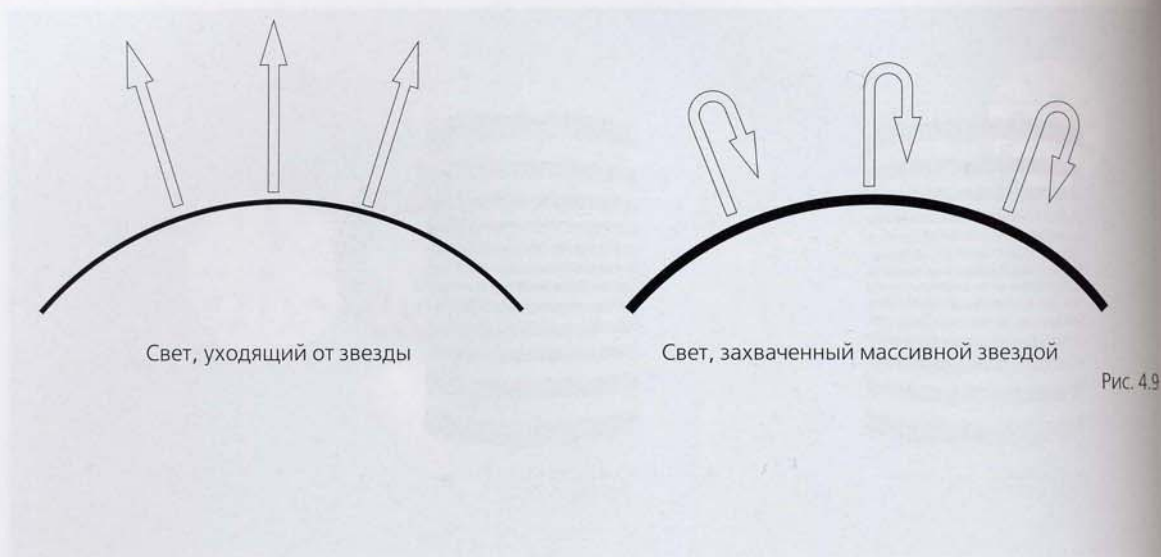


Рис. 4.9

Рис. 4.8



использовать время в уравнении Шрёдингера для определения детерминированной эволюции волновой функции. Однако, позволив пространству-времени искривляться, мы тем самым открываем двери перед возможностью появления такой структуры, в которой не для всякого наблюдателя время будет плавно увеличиваться, что требуется для осмысленного его измерения. Например, представим себе пространство-время как вертикальный цилиндр (рис. 4.7).

По высоте цилиндра будет измеряться время, которое увеличивается для каждого наблюдателя и течет от минус бесконечности к плюс бесконечности. Но вообразите теперь, что пространство-время подобно цилиндру с ручкой (или «кротовой норой»), которая сначала отходит от него, а потом, изогнувшись, присоединяется в другой точке. Теперь любая шкала времени неизбежно будет иметь точки стагнации, в которых ручка примыкает к цилиндру и где время останавливается. В этих точках для любого наблюдателя время не будет расти. В таком пространстве-времени нельзя использовать уравнение Шрёдингера для предсказания детерминированной эволюции волновой функции. Проследите за кротовой норой: вы никогда не знаете, что из нее может появиться.

Именно из-за черных дыр мы считаем, что время увеличивается не для каждого наблюдателя. Первая дискуссия о черных



ШВАРЦШИЛЬДОВСКАЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА

В 1916 г. немецкий астроном Карл Шварцшильд нашел решение уравнений теории относительности Эйнштейна, которое соответствует сферической черной дыре. Работа Шварцшильда открыла поразительное следствие общей теории относительности. Он показал, что, если масса звезды сконцентрирована в достаточно малой области, гравитационное поле на ее поверхности становится настолько сильным, что даже свет не может из него вырваться. Это и есть то, что мы теперь называем черной дырой, — область пространства-времени, окруженная так называемым горизонтом, из которой ничто, в том числе свет, не может ускользнуть, чтобы достичь удаленного наблюдателя.

Долгое время большинство физиков, включая Эйнштейна, скептически относились к возможности

того, что такие конфигурации материи могут существовать в реальной Вселенной. Но теперь мы понимаем, что любая достаточно тяжелая невращающаяся звезда, как бы ни были сложны ее форма и внутреннее строение, исчерпав ядерное топливо, неизбежно коллапсирует и превращается в идеально сферическую шварцшильдовскую черную дыру. Радиус R горизонта событий черной дыры зависит только от ее массы; он определяется по формуле

$$R = \frac{2GM}{c^2},$$

где G — гравитационная постоянная Ньютона; M — масса черной дыры; c — скорость света. Черная дыра с такой же массой, как у Солнца, будет иметь радиус всего 3 км.

дырах возникла в 1783 г. Бывший кембриджский профессор Джон Мичелл представил следующее рассуждение. Если некто выстрелит пробной частицей, например пушечным ядром, вертикально вверх, подъем будет замедляться тяготением и в конце концов частица прекратит двигаться вверх и станет падать (рис. 4.8). Однако если начальная, направленная вверх скорость превышает критическое значение, называемое скоростью убегания, гравитации никогда не удастся остановить частицу и вернуть ее обратно. Для Земли скорость убегания составляет около 11,2 км/с, для Солнца — около 618 км/с.

Обе эти скорости убегания много больше скорости реального пушечного ядра, но они малы по сравнению со скоростью света, которая составляет 300 000 км/с. Так что свет уходит с Земли и с Солнца без особых трудностей. Однако Мичелл рассудил, что должны быть звезды, которые намного массивнее Солнца и у которых скорости убегания больше скорости света (рис. 4.9). Мы не сможем увидеть эти звезды, поскольку любой испущенный ими луч света будет притянут назад гравитацией звезды. Так что это будут темные звезды, как их назвал Мичелл, или черные дыры, как зовем их теперь мы.

Идея Мичелла о темных звездах основывалась на ньютоновской физике, в которой время было абсолютным и шло независимо от происходящих событий. Поэтому они не влияли на



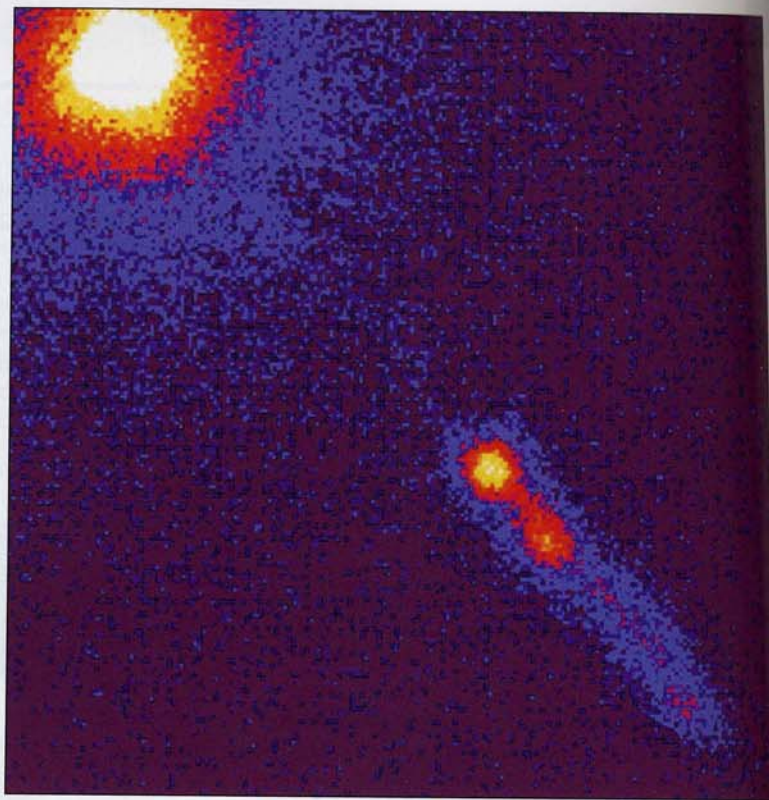


Рис. 4.10

Квazar 3C273, первый из открытых квазизвездных радиоисточников, вырабатывает огромное количество энергии в очень небольшой области. Падение вещества в черную дыру, по-видимому, единственное, что может объяснить столь высокую светимость.

ДЖОН УИЛЕР

Джон Арчибальд Уилер родился в 1911 г. в Джексонвилле, Флорида. Он получил степень доктора в 1933 г. за работу по рассеянию света на атомах гелия. В 1938 г. Уилер работал с датским физиком Нильсом Бором над теорией ядерного распада. Позднее вместе со своим аспирантом Ричардом Фейнманом вплотную занялся электродинамикой, но вскоре после этого США вступили во Вторую мировую войну, и обоих ученых привлекли к участию в Манхэттенском проекте.

В начале 1950-х гг. под впечатлением от статьи Роберта Оппенгеймера о гравитационном коллапсе, опубликованной в 1939 г., Уилер заинтересовался общей теорией относительности Эйнштейна. В то время большинство специалистов были увлечены ядерной

физикой, полагая, что общая теория относительности не имеет практически никакого отношения к реальному физическому миру. Работая почти в одиночку, Уилер изменил этот взгляд как своими исследованиями, так и тем, что читал в Принстоне первый курс лекций по теории относительности.

Значительно позднее, в 1969 г., он придумал термин «черная дыра» для сколлапсированного состояния материи, в существование которого мало кто верил. Вдохновленный работами Вернера Израэля, он выдвинул предположение о том, что «черные дыры не имеют волос». Иначе говоря, сколлапсированное состояние любой невращающейся массивной звезды действительно может быть описано решением Шварцшильда.



нашу способность предсказывать будущее в рамках классической ньютоновской картины мира. Но ситуация стала иной в общей теории относительности, где массивные тела искривляют пространство-время.

В 1916 г., вскоре после того, как теория была впервые сформулирована, Карл Шварцшильд (умерший немного времени спустя от болезни, подхваченной на русском фронте в Первую мировую) нашел решение уравнений поля общей теории относительности, которое соответствовало черной дыре. Смысл и значение того, что обнаружил Шварцшильд, оставались неопцененными на протяжении многих лет. Сам Эйнштейн никогда не верил в черные дыры, и его отношение разделялось большинством релятивистов старой гвардии. Я помню, как приехал в Париж, чтобы рассказать на семинаре о моем открытии того, что в квантовой теории черные дыры не совсем черные. Мой семинар оказался весьма скучным, поскольку в то время почти никто в Париже не верил в черные дыры. К тому же французам казалось, что это название, которое они перевели как *trou noir*, имеет двусмысленные сексуальные коннотации и должно быть заменено на *aster occlu*, то есть «скрытая звезда». Однако ни это, ни другие предложенные названия не привлекли такого внимания публики, как термин «черная дыра», который впервые ввел Джон Арчибальд Уилер, американский физик, вдохновивший многие современные работы в этой области.

Открытие квазаров в 1963 г. вызвало всплеск теоретических работ о черных дырах и попыток их обнаружить путем наблюдения (рис. 4.10). И вот такая картина в итоге предстала перед нами. Рассмотрим судьбу звезды с массой в 20 раз больше солнечной. Такие звезды образуются из облаков газа, подобных Туманности Ориона (рис. 4.11). Когда газ сжимается под действием собственного тяготения, он нагревается и в конце концов становится достаточно горячим, чтобы в нем начались ядерные реакции, превращающие водород в гелий. Выделяемое в этом процессе тепло создает давление, которое поддерживает звезду, позволяя ей противостоять собственной гравитации, и останавливает дальнейшее сжатие. Звезда будет пребывать в этом состоянии длительное время, сжигая водород и излучая свет в космос.

Гравитационное поле звезды будет влиять на траектории исходящих от нее световых лучей. Можно нарисовать диаграмму, на которой время направлено вверх, а расстояние от центра звезды — горизонтально (рис. 4.12). На этой диаграмме поверхность звезды представлена двумя вертикальными линиями — по одной с каждой стороны от центра. Будем считать, что время измеряется в секундах, а расстояние — в световых секундах (так называют расстояние, которое свет проходит за секунду). При использова-



Рис. 4.11

Звезды образуются в облаках газа и пыли, подобных Туманности Ориона.

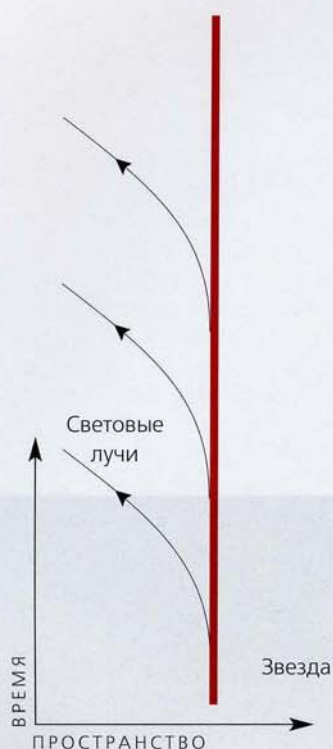
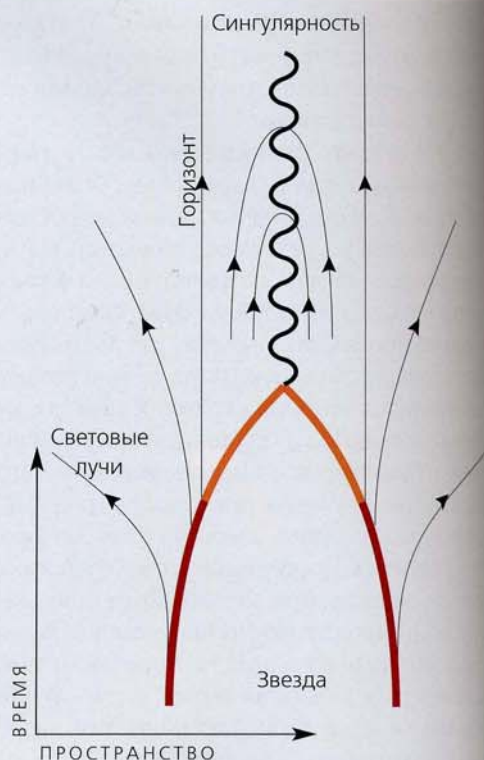


Рис. 4.12 (слева)
ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ ВОКРУГ
НЕКОЛЛАпсирующей ЗВЕЗДЫ

Световые лучи могут уходить с поверхности звезды (красные вертикальные линии). Вдали от звезды лучи идут под углом 45° к вертикали, но рядом со звездой искривление пространства-времени массой звезды заставляет лучи света идти под меньшим углом к вертикали.

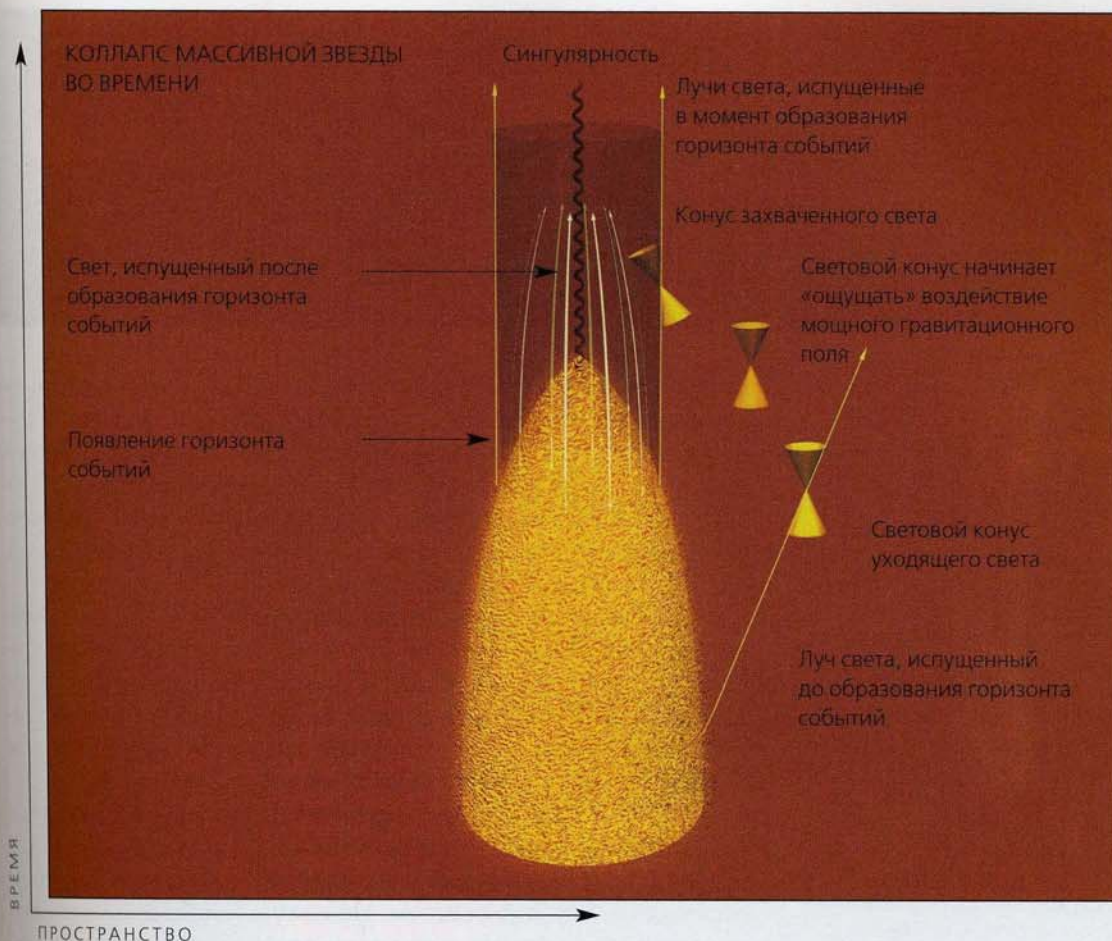
Рис. 4.13 (справа). Если звезда коллапсирует (красные линии сходятся в точку), искривление становится столь сильным, что лучи света вблизи поверхности идут внутрь. Это и есть образование черной дыры — области пространства-времени, из которой не может выйти свет.



нии этих единиц скорость света равна 1, то есть 1 световой секунде в секунду. Это означает, что вдали от звезды и ее гравитационного поля путь светового луча на диаграмме составляет угол 45° с вертикальной осью. Однако ближе к звезде искривление пространства-времени, вызванное ее массой, изменит путь светового луча, заставив его идти под меньшим углом к вертикали.

Массивные звезды перерабатывают свой водород в гелий намного быстрее, чем Солнце. Это значит, что они исчерпывают свои запасы водорода всего за несколько сотен миллионов лет*. После этого звезды оказываются перед лицом кризиса. Они могут сжигать гелий, превращая его в более тяжелые элементы, та-

* Даже быстрее: звезда с массой в 20 раз больше солнечной прогорает за 7–8 млн лет.



кие как углерод и кислород, но эти ядерные реакции высвобождают немного энергии, так что звезды теряют тепло и тепловое давление, которое позволяет им противостоять гравитации. Поэтому они начинают уменьшаться. Если они более чем вдвое превышают по массе Солнце, давление никогда не поднимется настолько, чтобы остановить сжатие. Такие звезды коллапсируют до нулевых размеров и бесконечной плотности, образуя то, что называется сингулярностью (рис. 4.13). На диаграмме «время — расстояние от центра» при сжатии звезды пути световых лучей с ее поверхности будут идти под все меньшим и меньшим углом к вертикали. Когда звезда достигнет некоторого критического радиуса, их путь на диаграмме станет вертикальным, а это означает, что свет будет висеть на постоянном расстоянии от центра звезды, никогда не покидая ее. Этот критический

Горизонт, внешняя граница черной дыры, образован световыми лучами, которые были на грани ухода от черной дыры, но уже не смогли вырваться и «зависли» на постоянном расстоянии от центра.

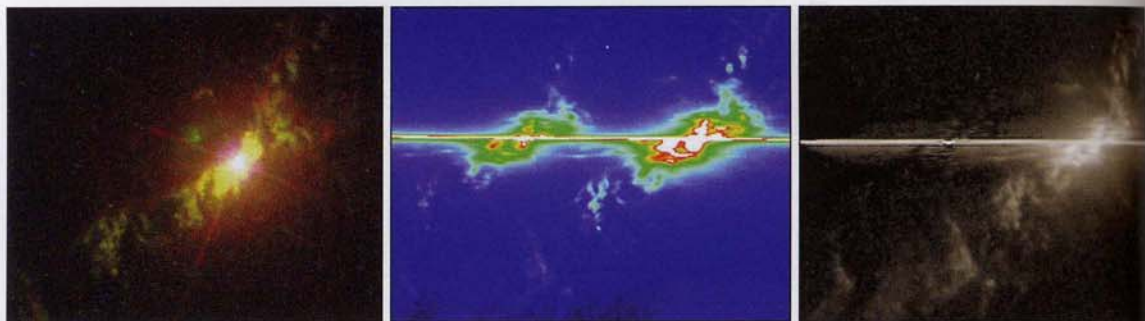


Рис. 4.14
ЧЕРНАЯ ДЫРА
В ЦЕНТРЕ ГАЛАКТИКИ

Слева: Галактика NGC 4151, снятая широкоугольной планетной камерой.

В центре: Горизонтальная линия, пересекающая изображение, порождена светом, который испущен черной дырой в центре NGC 4151.

Справа: Изображение, показывающее скорости излучающего кислорода. Все факты говорят о том, что NGC 4151 содержит черную дыру массой в 100 млн раз больше Солнца.

[Верхняя половина изображения смещена относительно нижней за счет доплеровского сдвига спектральных линий: в верхней части газ удаляется от нас, а в нижней — приближается к нам. — Перев.]

путь света очерчивает поверхность, называемую горизонтом событий, которая отделяет область пространства-времени, откуда свет может выйти, от той, откуда он выйти не может. Любой свет, испускаемый звездой после пересечения ею горизонта событий, будет завернут обратно за счет искривления пространства-времени. Она станет одной из темных звезд Мичелла или, как мы теперь говорим, черной дырой.

Как обнаружить черную дыру, если из нее не может выйти свет? Ответ состоит в том, что черная дыра продолжает притягивать окружающие объекты с той же силой, с какой это делало сколлапсировавшее тело. Если бы Солнце без потери массы превратилось в черную дыру, планеты продолжали бы обращаться по орбитам так же, как ныне.

Поэтому один способ поиска черных дыр состоит в наблюдении вещества, которое обращается вокруг того, что представляется невидимым компактным объектом. Наблюдается целый ряд таких систем. Пожалуй, наиболее впечатляющие гигантские черные дыры, встречающиеся в центрах галактик и квазаров (рис. 4.14).

Обсуждавшиеся до сих пор свойства черных дыр не создают никаких серьезных проблем для детерминизма. Для астронома, который падает в черную дыру и попадает в сингулярность, время заканчивается. Однако в общей теории относительности каждый волен отсчитывать время с разной скоростью в разных местах. Можно поэтому ускорять часы астронома по мере его приближения к сингулярности, так что они по-прежнему регистрируют бесконечный интервал времени*. На той же

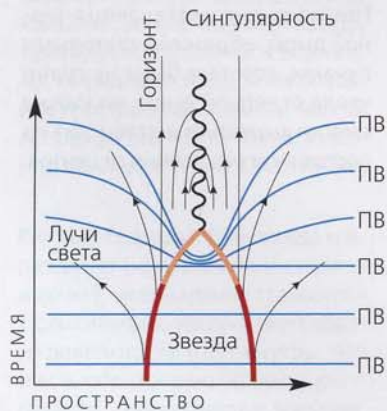
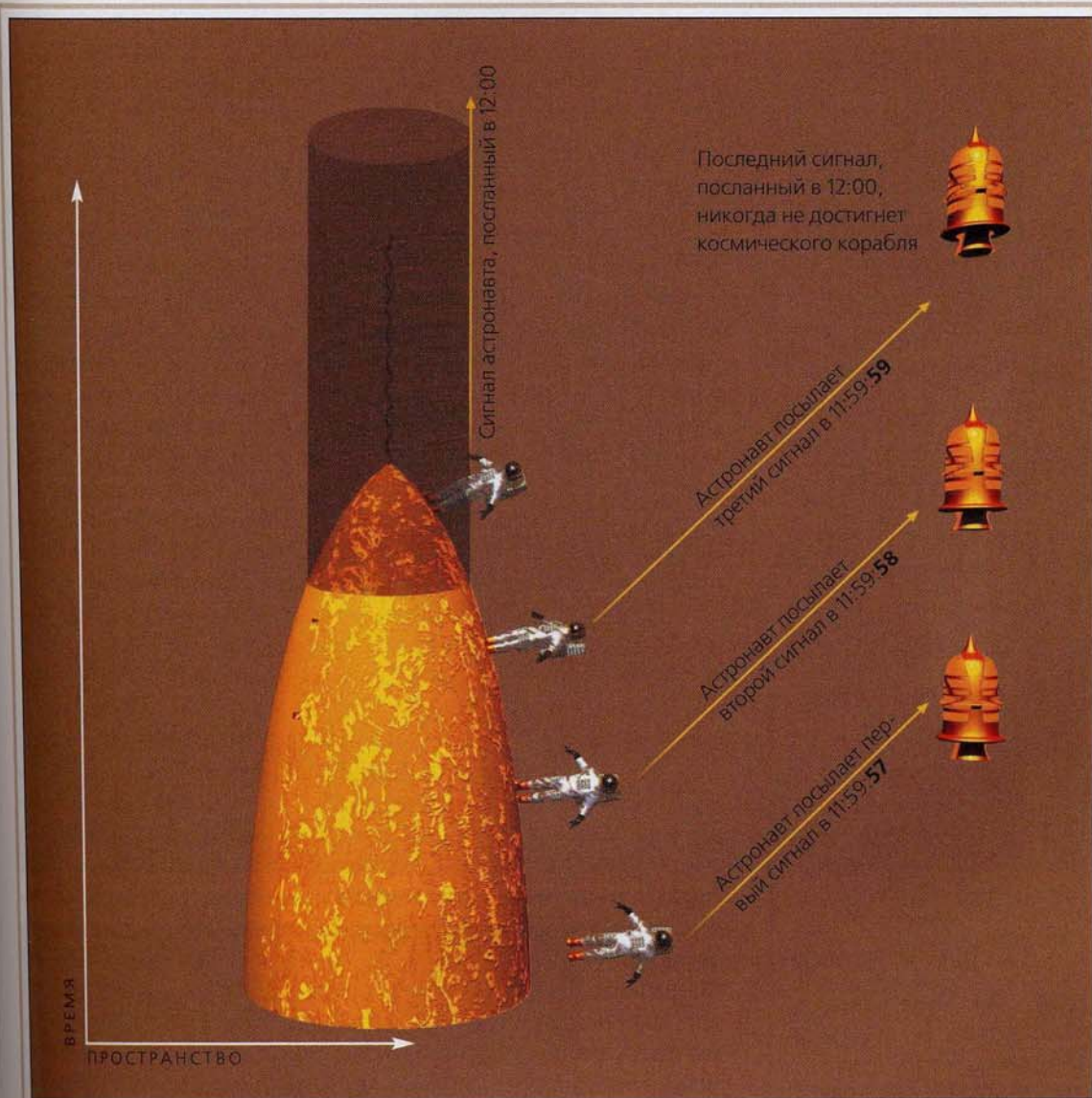


Рис. 4.15

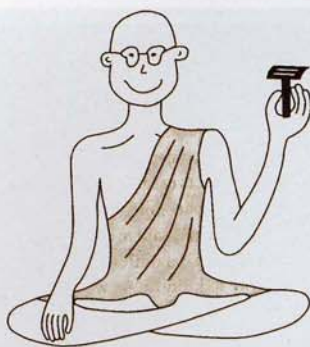
ПВ — линии постоянного времени

* По собственным часам падающий астроном достигает сингулярности за конечное время. Однако по отношению к внешнему миру его часы идут все медленнее и медленнее, и соответственно астронавту кажется, что события во внешнем мире протекают все быстрее и быстрее. В итоге за время падения он успевает увидеть в ускоренном режиме все будущее Вселенной, даже если оно бесконечно.



Астронавт опустился на поверхность коллапсирующей звезды в 11:59:57 и вместе со звездой сжимается ниже критического радиуса, за которым гравитация столь сильна, что никакой сигнал не может отсюда выйти. На корабль, который обращается вокруг звезды, он посылает сигналы с регулярными интервалами по своим часам.

Наблюдающий за звездой с расстояния никогда не увидит, что она пересекла свой гравитационный радиус и вошла в черную дыру. Для него все будет выглядеть так, будто звезда зависла над самым критическим радиусом, а часы на ее поверхности замедлили свой ход и остановились.



Результат — нет волос

ТЕМПЕРАТУРА ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Черная дыра испускает излучение, как если бы она была телом, нагретым до температуры T , зависящей только от ее массы. Более точно температура выражается формулой

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

где $\hbar$ — постоянная Планка; c — скорость света; k — постоянная Больцмана; G — гравитационная постоянная Ньютона; M — масса черной дыры.

Таким образом, чем меньше черная дыра, тем выше ее температура. Согласно этой формуле температура черной дыры в несколько солнечных масс составляет около миллионной доли градуса выше абсолютно нуля.

диаграмме «время — расстояние» (рис. 4.15) поверхности постоянных значений этого нового времени все плотнее располагались бы у центра под той точкой, где появляется сингулярность. Но они согласовывались бы с обычными отсчетами времени в почти плоском пространстве вдали от черной дыры.

Можно использовать это время в уравнении Шрёдингера и вычислить волновую функцию в более позднее время, зная ее исходное состояние. Так что у нас все еще остается детерминизм. Это лучше, чем ничего, однако позднее часть волновой функции оказывается внутри черной дыры, где ее никто не может наблюдать снаружи. Поэтому наблюдатель, который достаточно разумен, чтобы не упасть в черную дыру, не сможет прогнать уравнение Шрёдингера назад и вычислить волновую функцию в более ранние времена. Для этого ему надо было бы знать часть волновой функции, которая находится внутри черной дыры. Она содержит информацию о том, что упало в черную дыру. Потенциально это может быть огромный объем информации, поскольку черная дыра с заданной массой и скоростью вращения может быть образована очень большим числом сочетаний частиц; черная дыра не зависит от природы тела, коллапс которого привел к ее образованию. Джон Уилер сформулировал это так: «Черная дыра не имеет волос», чем укрепил французов в их подозрениях.

Трудности для детерминизма возникли, когда я открыл, что черные дыры не вполне черные. Как было показано в главе 2, квантовая теория говорит, что поля не могут быть в точности нулевыми, даже в вакууме. Если бы они оказались нулевыми, то обладали бы точной величиной или положением, равным нулю, и точно известным темпом изменения или скоростью, тоже равной нулю. Это было бы нарушением принципа неопределенности, который утверждает, что нельзя одновременно точно определить и положение, и скорость. Все поля должны испытывать так называемые вакуумные флуктуации некоторой величины (аналогично маятнику с нулевыми колебаниями из главы 2). Флуктуации вакуума можно интерпретировать несколькими способами, которые кажутся различными, но в действительности математически эквивалентны. С позитивистской точки зрения мы свободны использовать тот взгляд, который наиболее эффективен для решения конкретной задачи. В данном случае полезно рассматривать флуктуации вакуума как появление пар виртуальных частиц, которые возникают вместе в некоторой точке пространства-времени, разлетаются, а затем сходятся и аннигилируют друг с другом. «Виртуальные» означает, что эти частицы недоступны для непосредственного наблюдения, но их



Рис. 4.17
ВИРТУАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ,
ВОЗНИКАЮЩИЕ И АННИГИЛИРУЮЩИЕ ДРУГ
С ДРУГОМ ВБЛИЗИ ГОРИЗОНТА
СОБЫТИЙ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Одна из пары частиц падает в черную дыру, тогда как другой удастся ускользнуть на свободу. Снаружи горизонта событий это выглядит так, будто черная дыра испускает те частицы, которым удалось ускользнуть.

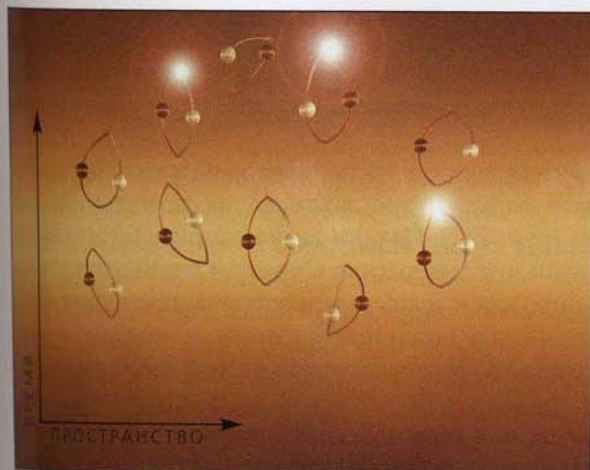
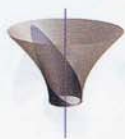


Рис. 4.16

В пустом пространстве пары частиц появляются, ведут недолгое существование, а затем аннигилируют друг с другом.



События, которые никогда не сможет увидеть наблюдатель

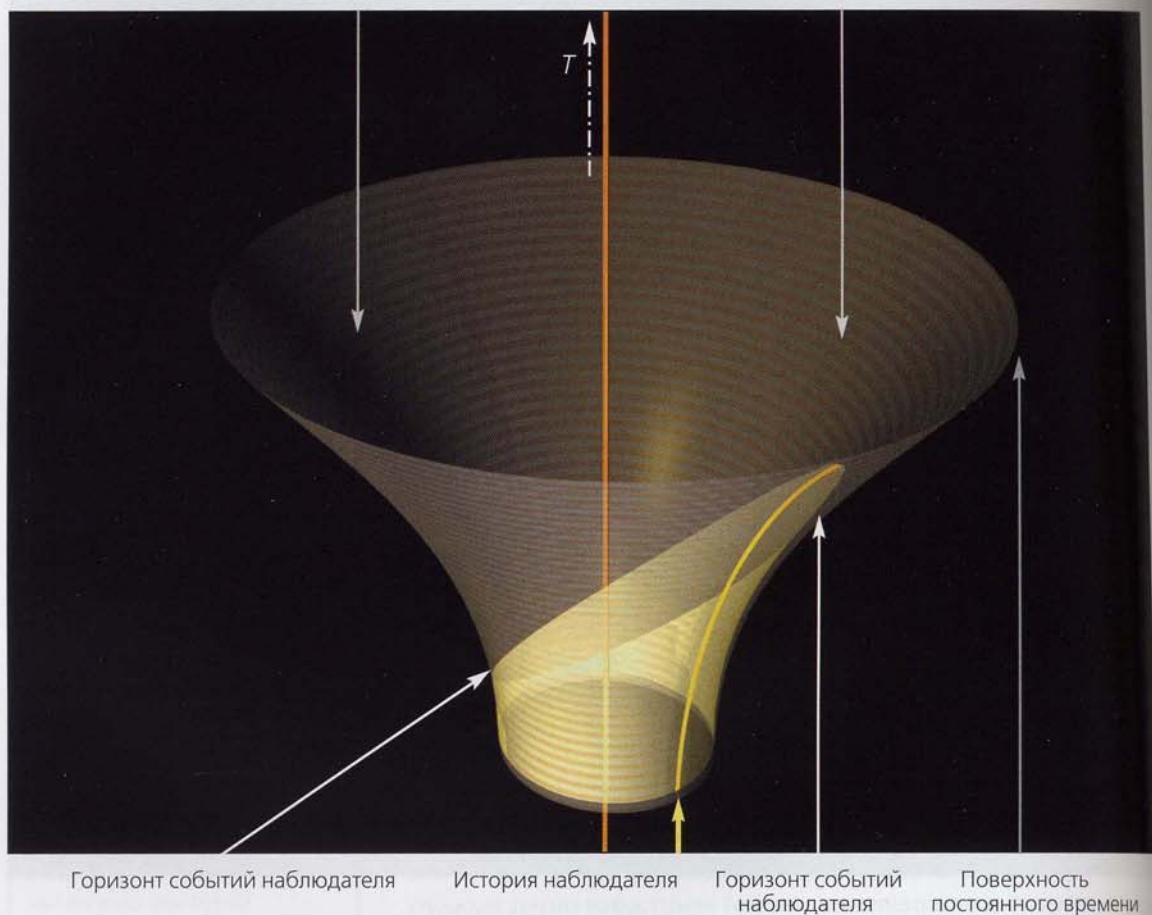


Рис. 4.18

Решение де Ситтера для уравнений поля в общей теории относительности дает вселенную, расширяющуюся в инфляционном режиме. На диаграмме время идет снизу вверх, а размеры вселенной показаны в горизонтальном направлении. Пространственные расстояния увеличиваются столь быстро, что свет отдаленных галактик никогда не достигнет нас. Как и в черной дыре, здесь существует горизонт — граница области, которую мы не можем наблюдать.

побочные эффекты *могут* быть измерены и согласуются с теоретическими предсказаниями с поразительной степенью точности (рис. 4.16).

В присутствии черной дыры одна из частиц пары может упасть в черную дыру, в то время как другая свободно уйдет на бесконечность (рис. 4.17). Издали такие частицы будут казаться испущенными черной дырой. Спектр черной дыры будет в точности таким, как у тела с температурой, пропорциональной гравитационному полю на горизонте — границе черной дыры. Другими словами, температура черной дыры зависит от ее размера.

У черной дыры в несколько солнечных масс температура составляет около миллионной доли градуса над абсолютным ну-



лем, а у более массивных — еще ниже. Так что квантовое излучение от таких черных дыр будет с большим запасом перекрыто 2,7-градусным излучением, оставшимся от Большого взрыва, — космическим микроволновым фоном, обсуждавшимся в главе 2. Зарегистрировать можно было бы только излучение гораздо менее крупных и более горячих черных дыр, однако не похоже, чтобы вокруг нас было много таких. А жаль. Если бы нашли хоть одну, я получил бы Нобелевскую премию. Тем не менее у нас есть косвенное свидетельство существования этого излучения, пришедшее из ранней Вселенной. Как описано в главе 3, в самые ранние моменты истории наша Вселенная прошла период инфляции, в течение которого она расширялась с постоянно растущей скоростью. Расширение в тот период должно было быть чрезвычайно быстрым, и некоторые объекты оказались столь далеко, что их свет никогда до нас не дойдет. Для идущего к нам света Вселенная расширялась слишком сильно и слишком быстро. Так что во Вселенной должен быть горизонт, подобный горизонту черной дыры, отделяющий область, из которой свет может дойти до нас, от области, откуда он не дойдет (рис. 4.18).

Очень похожие аргументы показывают, что от этого горизонта должно исходить тепловое излучение, как от горизонта черной дыры. В тепловом излучении, как мы знаем, следует ожидать характерного спектра флуктуаций плотности. В данном случае эти флуктуации будут расширяться вместе с самой Вселенной. Когда их линейный масштаб становится больше размеров горизонта событий, они замирают, так что мы можем наблюдать их сегодня как небольшие вариации температуры космического микроволнового излучения, оставшиеся с эпохи ранней Вселенной. Наблюдаемые вариации с поразительной точностью согласуются с предсказаниями тепловых флуктуаций.

И хотя наблюдения лишь косвенным образом подтверждают существование излучения черных дыр, каждый, кто изучил проблему, согласится, что оно должно иметь место, чтобы не возникало противоречий с другими, проверенными путем наблюдений теориями. Это имеет важные следствия для детерминизма. Излучение черной дыры уносит энергию, а следовательно, она теряет массу и становится меньше. Значит, ее температура будет возрастать, а интенсивность излучения — увеличиваться. В конце концов черная дыра уменьшится до нулевой массы. Мы не знаем, как рассчитать, что случится в тот момент, но, по-видимому, имеется только одна естественная и разумная возможность, состоящая в том, что черная дыра полностью исчезнет. Так что же случится тогда с той частью волновой функ-

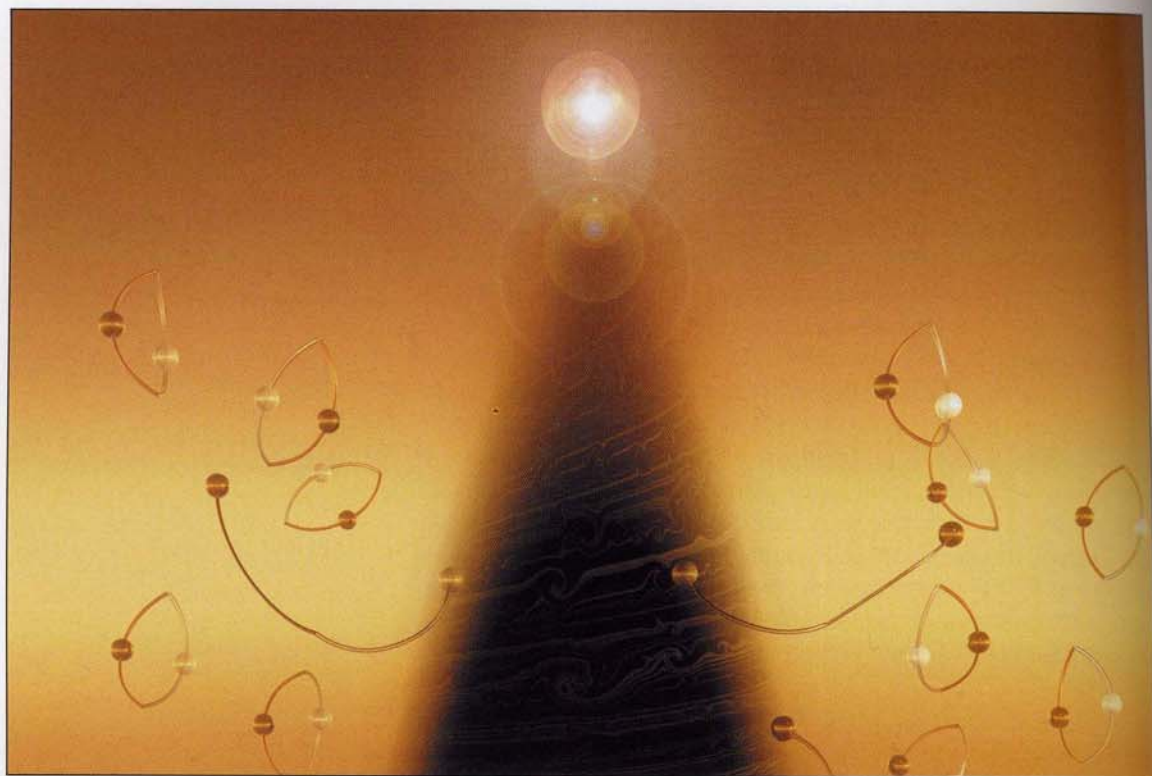


Рис. 4.19

Положительная энергия, уносимая тепловым излучением из-под горизонта, уменьшает массу черной дыры. По мере сокращения массы температура черной дыры возрастает, а вместе с ней и интенсивность излучения. Поэтому масса теряется все быстрее и быстрее. Мы не знаем, что случится, если масса станет очень маленькой, но, вероятнее всего, черная дыра полностью исчезнет.

ции, которая находится в черной дыре, и с той информацией, которую она несет о том, что упало в черную дыру? На первый взгляд эта волновая функция и содержащаяся в ней информация должны выйти наружу после окончательного исчезновения черной дыры. Однако информация не передается даром, в чем вы могли убедиться, получая телефонные счета.

Для переноса информации требуется энергия, а на последних стадиях существования черной дыры энергии очень мало. Единственный правдоподобный способ, которым информация могла бы выбраться из черной дыры наружу — это, не дожидаясь финальной стадии, постепенно выходить вместе с излучением. Однако в рамках картины, где один член пары виртуальных частиц падает, а другой улетает, нельзя ожидать, что улетевшая частица будет связана с той, что упала, или вынесет какую-то информацию о ней. Так что единственным ответом будет, по-видимому, утверждение, что инфор-





Рис. 4.20

В мысленном эксперименте Эйнштейна – Подольского – Розена наблюдатель, измеривший спин одной частицы, будет знать направление спина другой частицы.

мация, содержащаяся в части волновой функции внутри черной дыры, пропадет (рис. 4.19).

Такая потеря информации должна иметь принципиальное значение для детерминизма. Для начала заметим, что, даже если знать волновую функцию после исчезновения черной дыры, невозможно прогнать уравнение Шрёдингера назад и вычислить, какой она была до того, как черная дыра образовалась. То, какой она была, отчасти зависит от того фрагмента волновой функции, который пропал в черной дыре. Мы привыкли считать, что прошлое можно знать точно. Однако, если информация теряется в черных дырах, то это не так. Могло происходить что угодно.

В целом, однако, люди — как астрологи, так и те, кого они консультируют, — больше интересуются предвидением будущего, чем ретроспекцией прошлого. На первый взгляд может показаться, что потеря части волновой функции в черной дыре не препятствует предсказанию волновой функции вовне. Но, как мы увидим из рассмотрения мысленного эксперимента, предложенного Эйнштейном, Борисом Подольским и Натаном Розеном в 1930-х гг., эта потеря, оказывается, мешает таким предсказаниям.

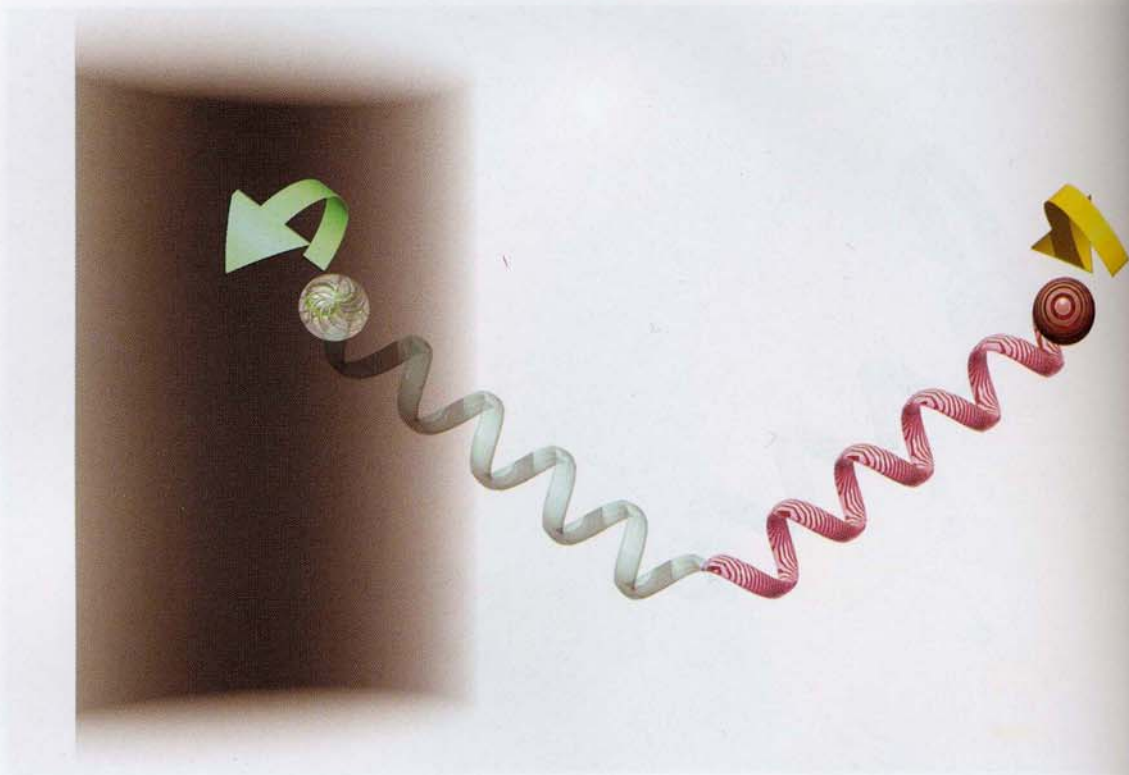


Рис. 4.21

Виртуальная пара имеет волновую функцию, которая предсказывает, что частицы будут обладать противоположными спинами. Но если одна из частиц упадет в черную дыру, спин оставшейся невозможно надежно предсказать.

Представьте, что радиоактивный атом распадается и испускает в противоположных направлениях две частицы с противоположными спинами. Наблюдатель, который видит только одну частицу, не может предсказать, будет она вращаться вправо или влево. Но если наблюдатель определит, что она вращается вправо, то он сможет с уверенностью предсказать, что другая частица вращается влево, и наоборот (рис. 4.20). Эйнштейн думал, что это доказывает нелепость квантовой механики: ведь вторая частица может к этому моменту оказаться на другом краю галактики. Однако большинство ученых считают, что запутался Эйнштейн, а не квантовая теория. Мысленный эксперимент Эйнштейна – Подольского – Розена не говорит о возможности передавать информацию быстрее света. Это было бы противоречием. Нельзя до измерения выбрать свою частицу пары, таким образом чтобы после измерения оказалось, что она вращается вправо, а значит, невозможно и заставить частицу у далекого наблюдателя вращаться влево.

Фактически этот мысленный эксперимент в точности соответствует тому, что происходит с излучением черной дыры. Вол-

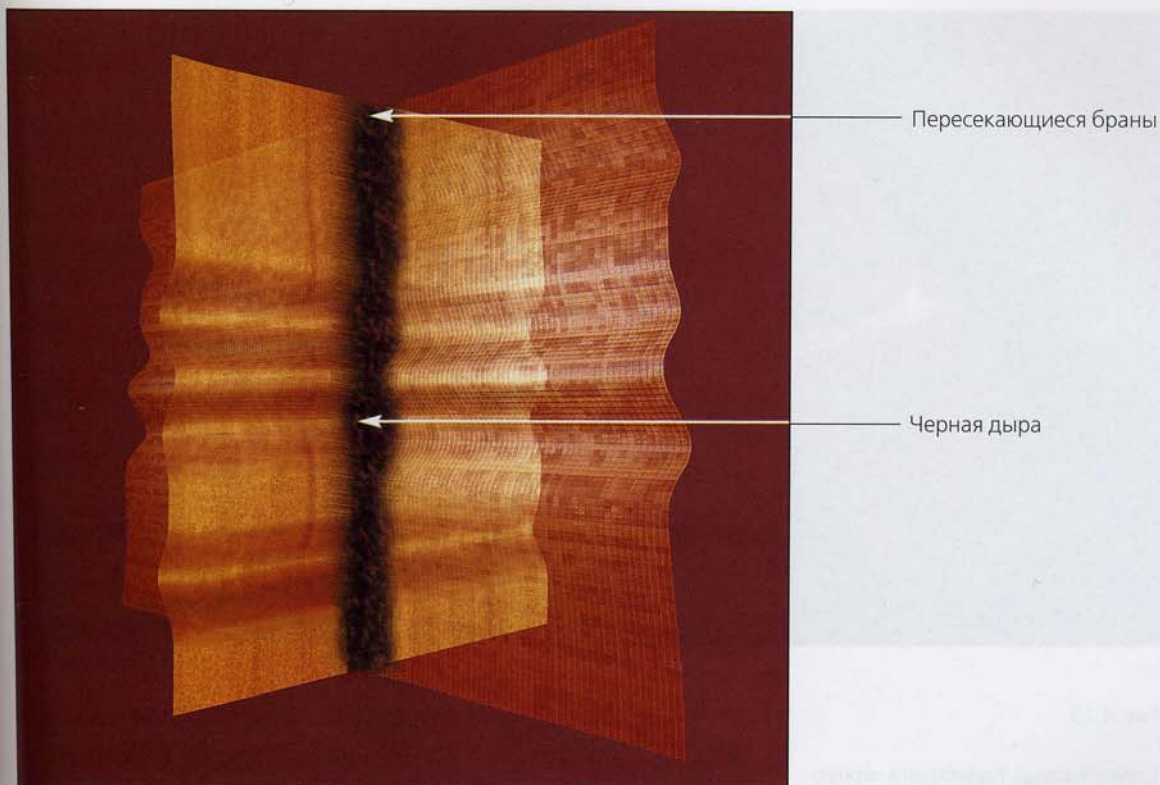


Рис. 4.22

Черные дыры можно представлять себе как пересечения p -бран в пространстве-времени с дополнительными измерениями. Информация о внутреннем состоянии черных дыр будет сохраняться в форме волн на p -бранах.

новая функция пары виртуальных частиц как раз такова, что оба ее члена будут обязательно иметь противоположные спины (рис. 4.21). Нам хотелось бы предсказать спин и волновую функцию улетающей частицы, что можно сделать, если мы пронаблюдаем частицу, падающую в черную дыру. Но эта частица теперь находится внутри черной дыры, где ее спин и волновую функцию нельзя измерить. По этой причине нельзя предсказать спин и волновую функцию улетающей частицы. Она может с той или иной вероятностью иметь разные спины и разные волновые функции, но у нее не будет строго определенного спина или волновой функции. Это, по всей видимости, ограничивает нашу способность предсказывать будущее. Классическая идея Лапласа о возможности предсказать положения и скорости частиц была модифицирована, когда появился принцип неопределенности, не позволяющий одновременно точно определять и положения, и скорости. Однако по-прежнему можно было определять волновую функцию и использовать для предсказания будущего уравнение Шрёдингера. Оно дает возможность с уверенностью предсказывать некую комбинацию положения

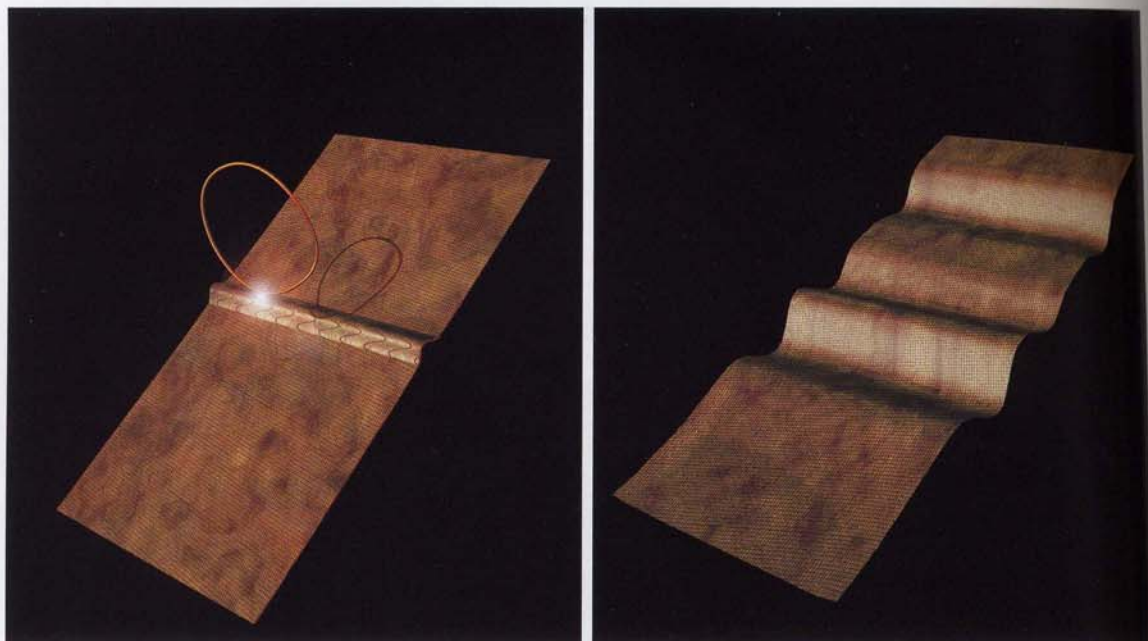


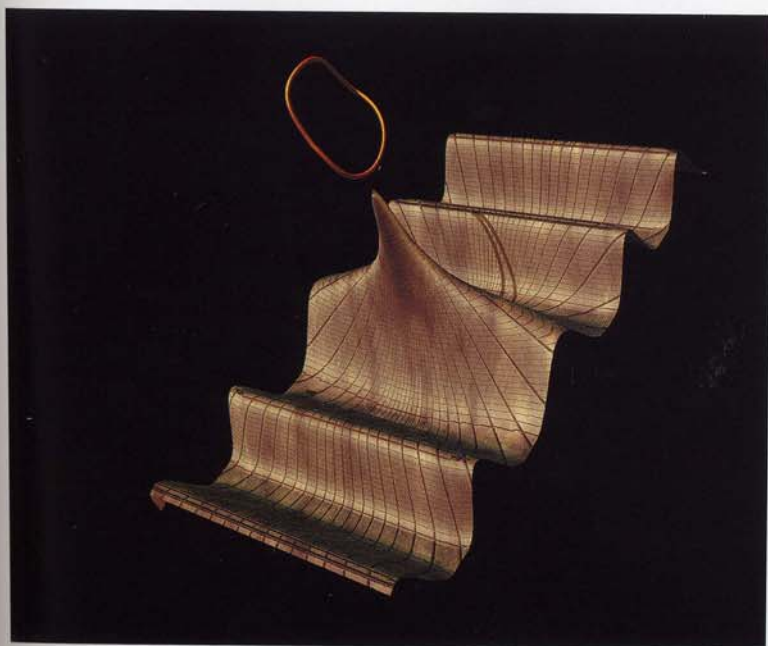
Рис. 4.23

Слева: Частица, падающая в черную дыру, может рассматриваться как замкнутая в петлю струна, ударяющаяся в p -брану. *В центре:* Это возбуждает волны на p -бране. *Справа:* Волны могут, наложившись друг на друга, заставить часть p -браны оторваться в форме замкнутой струны. Это будет частица, испущенная черной дырой.

и скорости, то есть половину того, что позволялось согласно идее Лапласа. Мы можем надежно предсказать, что частицы имеют противоположные спины, но если одна частица падает в черную дыру, то об остающейся частице мы ничего не можем сказать с уверенностью. Это означает, что *никакие* результаты измерений вне черной дыры не могут быть предсказаны совершенно надежно: наша способность делать такие предсказания падает до нуля. Так что, быть может, астрологи предсказывают будущее не хуже, чем законы физики.

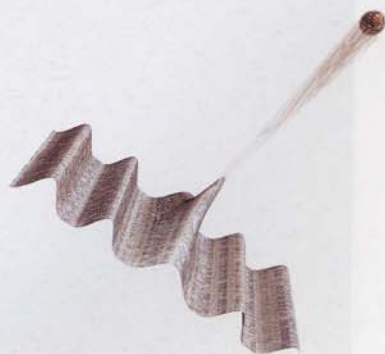
Многим физикам не нравится такое ограничение детерминизма, и они предполагают, будто информация о том, что находится внутри, каким-то образом выходит из черной дыры. Долгие годы это предположение питалось лишь благими надеждами на то, что будет найден какой-то способ спасти информацию. Однако в 1996 г. Эндрю Стромингер и Камран Вафа добились существенного прогресса. Они стали рассматривать черную дыру как объект, составленный из набора строительных блоков, называемых p -бранами (см. с. 62).

Напомним, что p -браны можно представлять себе как листы, движущиеся в трех измерениях нашего пространства и одновременно в семи дополнительных измерениях, которых мы не замечаем (рис. 4.22). В некоторых случаях удастся показать, что число волн на p -бранах совпадает с количеством информа-



пии, которая, как ожидается, содержится в черной дыре. Когда частицы сталкиваются с p -бранами, в них возбуждаются новые колебания. Аналогично, если волны, движущиеся в разных направлениях по p -бране, сходятся в некоторой точке, они могут породить столь большой пик, что кусочек p -браны отделится и улетит в виде частицы. Таким образом, p -браны могут поглощать и испускать частицы, подобно черным дырам (рис. 4.23).

Идею с p -бранами можно считать эффективной теорией. Хотя и не требуется верить в то, что маленькие листочки действительно летают вдоль и поперек плоского пространства-времени, черные дыры могут вести себя так, будто они составлены из таких листов. Здесь уместна аналогия с водой: то обстоятельство, что она состоит из миллиардов и миллиардов сложно взаимодействующих между собой молекул H_2O , несколько не мешает представлению о непрерывной жидкости оставаться для нее очень эффективной моделью. Математическая модель черных дыр, сложенных из p -бран, по результатам похожа на описанную выше модель с парами виртуальных частиц. Поэтому с позитивистской точки зрения это одинаково хорошие модели, по крайней мере для некоторых классов черных дыр. Для этих классов модель p -бран предсказывает в точности такую же интенсивность излучения, как и модель виртуальных пар. Но есть одно важное отличие: в модели p -бран информация о том, что







падает в черную дыру, будет сохраняться в волновой функции колебаний самих p -бран. Эти p -браны рассматриваются как поверхности в *плоском* пространстве-времени, и по этой причине на них время течет равномерно, траектории лучей света не изгибаются, и информация, заключенная в волнах, не будет потеряна. Наоборот, информация в конце концов покинет черную дыру в форме излучения p -бран. Поэтому, следуя модели p -бран, мы можем использовать уравнение Шрёдингера для расчета того, какой станет волновая функция в будущем. Ничто не пропадет, и время будет идти вперед гладко. Полный детерминизм в квантовом смысле сохраняется.

Так какая же из этих картин верна? Теряется ли часть волновой функции в глубинах черных дыр или вся информация выходит наружу, как предполагает модель p -бран? Это один из самых глубоких вопросов современной теоретической физики. По мнению многих, недавние работы показали, что информация не теряется. Мир безопасен и предсказуем, и ничего неожиданного не случится. Но это не очевидно. Если всерьез относиться к общей теории относительности Эйнштейна, то приходится допустить возможность, что пространство стягивается в узел, а информация теряется в его складках. Когда звездолет «Энтерпрайз» проходит через кротовую нору, случается что-то неожиданное. Я это знаю, поскольку был на борту и играл в покер с Ньютоном, Эйнштейном и лейтенантом Дэйтой*. Все это было большой неожиданностью — взгляните, что стало с моими коленями.

* Дэйта — член экипажа «Энтерпрайза», андроид.



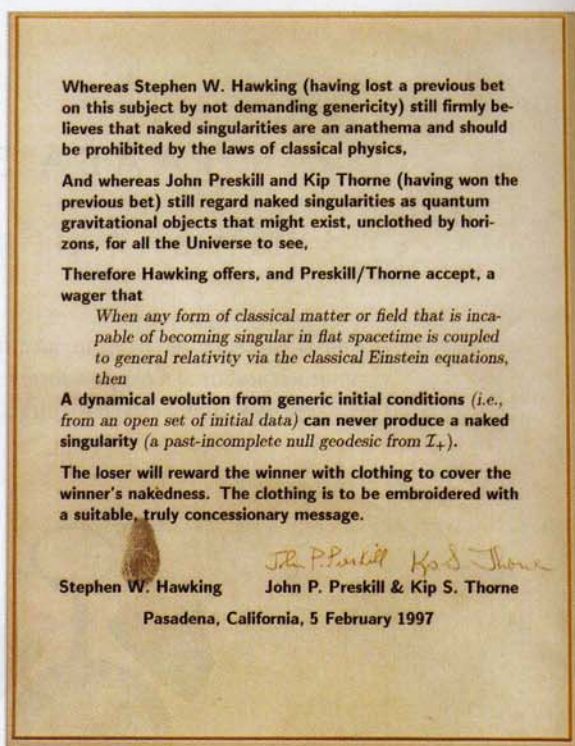
КАДР ИЗ СЕРИАЛА
«ЗВЕЗДНЫЙ ПУТЬ: НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ»
С любезного разрешения
Paramount Pictures
© Paramount Pictures, 2001
Все права защищены

ГЛАВА 5

ЗАЩИЩАЯ ПРОШЛОЕ

*О том, возможны ли путешествия во времени
и способна ли высокоразвитая цивилизация,
вернувшись в прошлое, изменить его*





Поскольку Стивен Хокинг (который проиграл предыдущее пари по данному вопросу, выставив требования в недостаточно общем виде) по-прежнему твердо уверен, что голые сингулярности прокляты и должны быть запрещены законами классической физики,

и поскольку Джон Прескилл и Кип Торн (выигравшие предыдущее пари) по-прежнему считают, что голые сингулярности как квантовые гравитационные объекты могут существовать, не будучи укрыты горизонтом, в наблюдаемой нами Вселенной,

Хокинг предложил, а Прескилл/Торн приняли следующее пари:

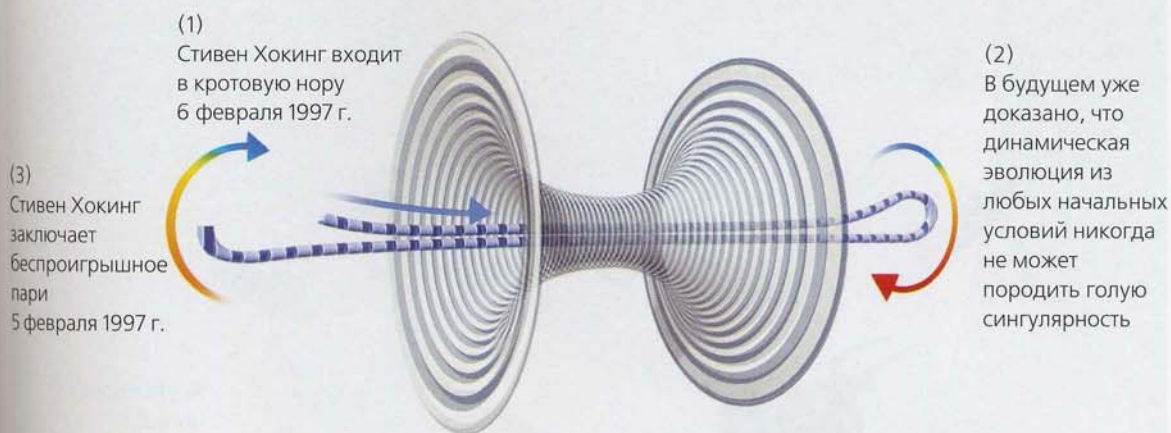
Коль скоро любая форма классического вещества или поля, неспособная стать сингулярной в плоском пространстве-времени, подчиняется классическим уравнениям общей теории относительности Эйнштейна, динамическая эволюция из любых начальных условий (то есть от любого открытого набора начальных данных) никогда не сможет породить голую сингулярность (неполную нулевую геодезическую из I_+ с конечной точкой в прошлом).

Проигравший вознаграждает победителя одеждой, дабы тот мог прикрыть свою наготу. На одежде должно быть вышито соответствующее случаю сообщение.

Стивен У. Хокинг

Джон П. Прескилл и Кип С. Торн

Пасадена, Калифорния, 5 февраля 1997 г.



Мой друг и коллега Кип Торн, с которым у меня было заключено немало пари (еще действующих), не из тех, кто следует общепринятой линии в физике только оттого, что все так поступают. Поэтому он стал первым серьезным ученым, кто осмелился обсуждать путешествия во времени как практическую возможность.

Открыто говорить о путешествиях во времени — весьма щекотливое дело. Вы рискуете сбиться либо на громкие призывы вложить бюджетные деньги в какую-нибудь нелепость, либо на требование засекретить исследования в военных целях. В самом деле, как мы можем защититься от кого-то имеющего в своем распоряжении машину времени? Ведь он способен изменить саму историю и править миром. Лишь немногие из нас достаточно безрассудны, чтобы работать над вопросом, который в среде физиков слывет настолько неполициткорректным. Мы маскируем этот факт при помощи технических терминов, в которых зашифрованы путешествия во времени.

Основа всех современных дискуссий о путешествиях во времени — общая теория относительности Эйнштейна. Как следует из предыдущих глав, уравнения Эйнштейна делают



Кип Торн

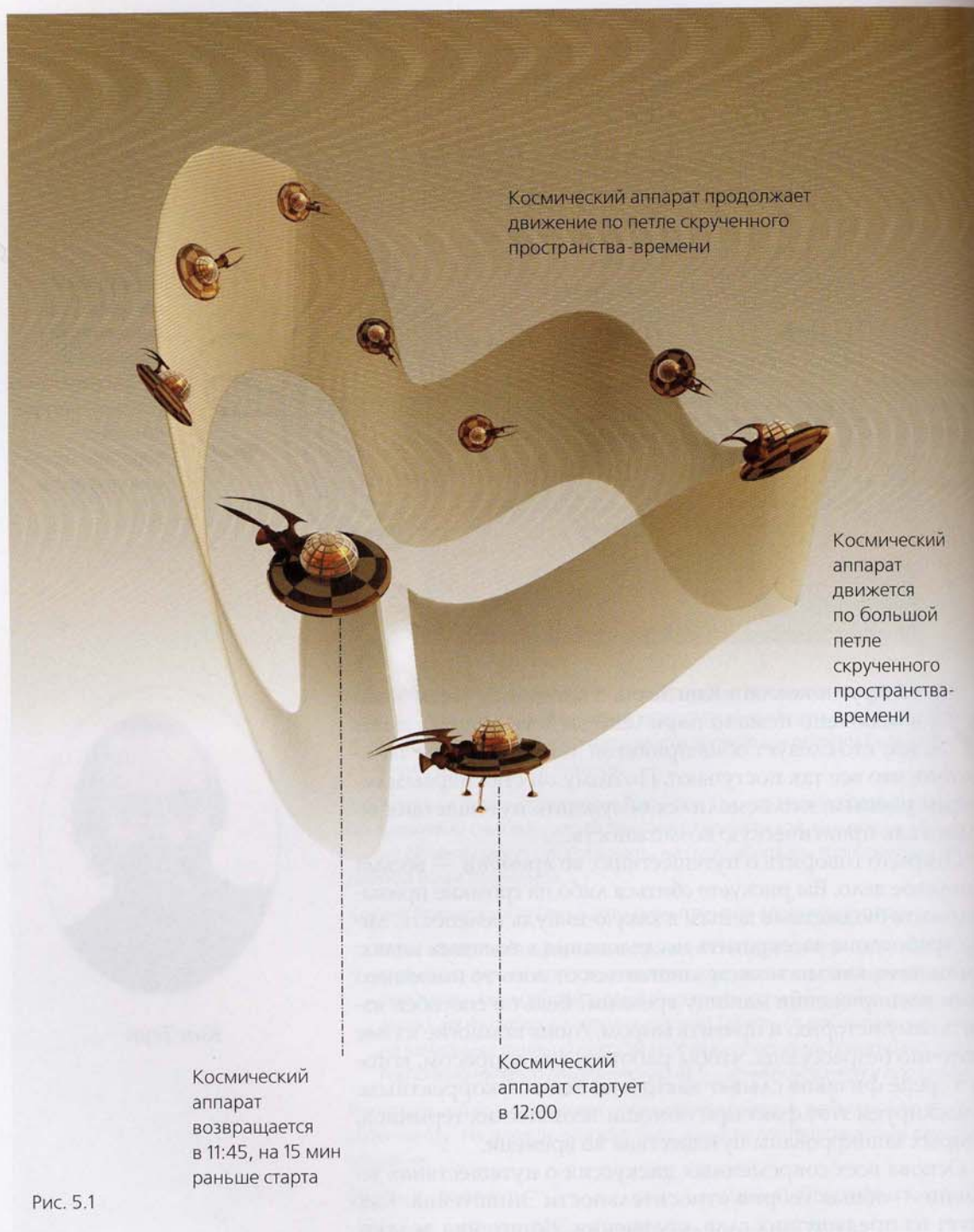
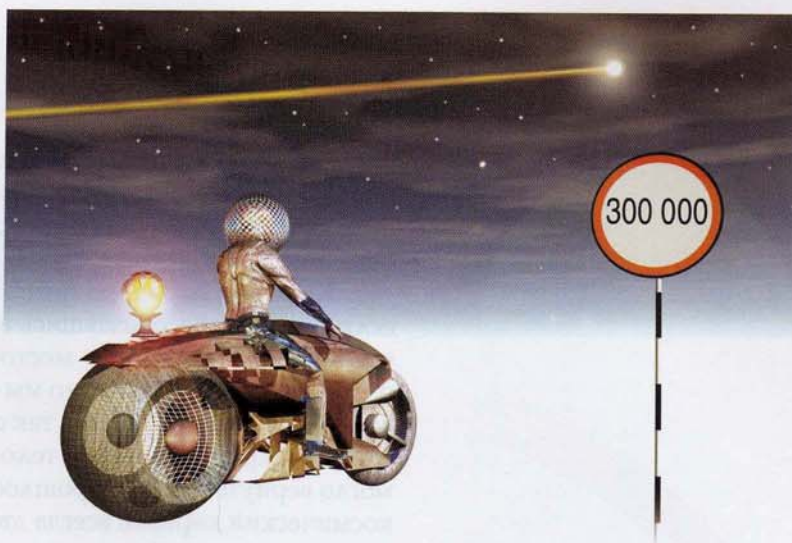


Рис. 5.1



пространство и время динамичными, описывая, как те искривляются и искажаются под действием материи и энергии во Вселенной. В общей теории относительности чье угодно персональное время, измеряемое по наручным часам, всегда будет увеличиваться, так же как и в теории Ньютона или в плоском пространстве-времени специальной теории относительности. Но быть может, пространство-время окажется настолько закрученным, что вам удастся улететь на звездолете и вернуться раньше своего отправления (рис. 5.1).

Например, это может случиться, если существуют кротовые норы — упоминавшиеся в главе 4 трубки пространства-времени, которые соединяют различные его области. Идея состоит в том, чтобы направить звездолет в одно устье кротовой норы и появиться из другого в совершенно иных месте и времени (рис. 5.2).

Кротовые норы, если они существуют, могли бы решить проблему предельной скорости в космосе: согласно теории относительности, чтобы пересечь Галактику, требуются десятки тысяч лет. Но через кротовую нору можно слетать на другой край Галактики и вернуться обратно за время ужина. Между тем легко показать, что, если кротовые норы существуют, ими можно воспользоваться для того, чтобы оказаться в прошлом. Так что стоит подумать, что получится, если вы сумеете, например, взорвать свою ракету на стартовой площадке, чтобы не





допустить собственного же полета. Это вариация известного парадокса: что случится, если вы отправитесь в прошлое и убьете собственного дедушку, прежде чем он успеет зачать вашего отца (рис. 5.3)?

Конечно, парадокс тут получается только в том случае, если считать, что, оказавшись в прошлом, вы сможете делать что хотите. Эта книга не место для философских дискуссий о свободе воли. Вместо этого мы сконцентрируемся на том, позволяют ли законы физики так скрутить пространство-время, чтобы макроскопическое тело вроде космического корабля могло вернуться в свое прошлое. Согласно теории Эйнштейна космический корабль всегда движется со скоростью, которая меньше локальной скорости света в пространстве-времени, и следует вдоль так называемой времениподобной мировой

КОРОТКАЯ КРОВОТАЯ НОРА

Входим в 12:00

Выходим в 12:00

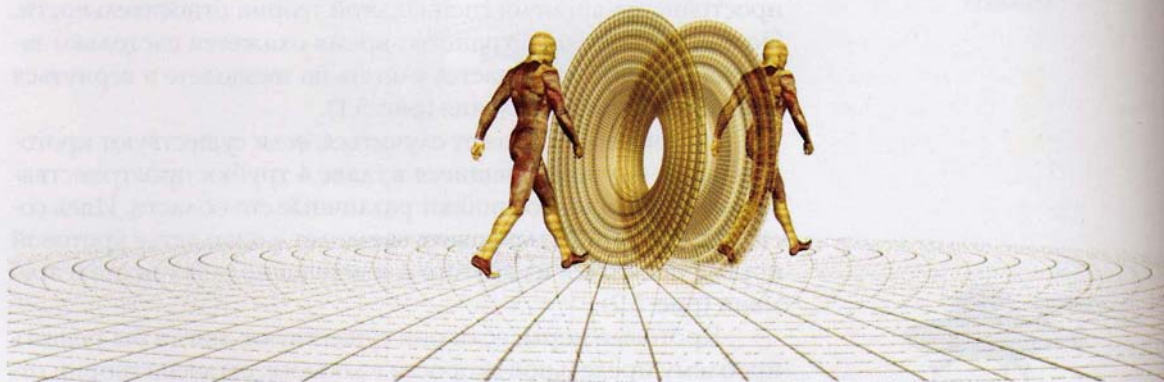


Рис. 5.2. ВТОРАЯ ВАРИАЦИЯ НА ТЕМУ ПАРАДОКСА БЛИЗНЕЦОВ

(1)

Если бы существовала очень короткая кротовая нора, вы могли бы выйти из нее в тот же момент, что и вошли.



(2)

Можно представить себе, что один конец кротовой норы отправляется в дальнейшее путешествие на космическом корабле, а другой конец остается на Земле.

(3)

Из-за парадокса близнецов по возвращении космического корабля у находящегося на нем входа в кротовую нору пройдет меньше времени, чем у того входа, который остался на Земле. Это означает, что если войти в кротовую нору на Земле, то можно оказаться на космическом корабле в более раннее время.



КОСМИЧЕСКИЕ СТРУНЫ

Космические струны — это длинные тяжелые объекты с крошечным поперечным сечением, которые могли возникнуть на ранних этапах эволюции Вселенной. Однажды возникнув, космическая струна все больше растягивалась бы за счет космологического расширения, и к настоящему времени одна такая струна могла бы пересекать всю наблюдаемую Вселенную.

Возможность существования космических струн предполагается современными теориями элементарных частиц, которые предсказывают, что на горячих ранних стадиях развития Вселенной вещество находилось в симметричной фазе, во многом похожей на жидкую воду, которая тоже симметрична — одинакова в каждой точке и во всех направлениях — в отличие от кристаллов льда, имеющих изотропную структуру.

Когда Вселенная остыла, симметрия первоначальной фазы была нарушена разным образом в различных отдаленных областях. Как следствие, в этих областях космическое вещество приобрело разные основные состояния. Космические струны — это материальные структуры на границах между такими областями. Поэтому их образование было неизбежным следствием того факта, что отдаленные области могут различаться по основному состоянию.

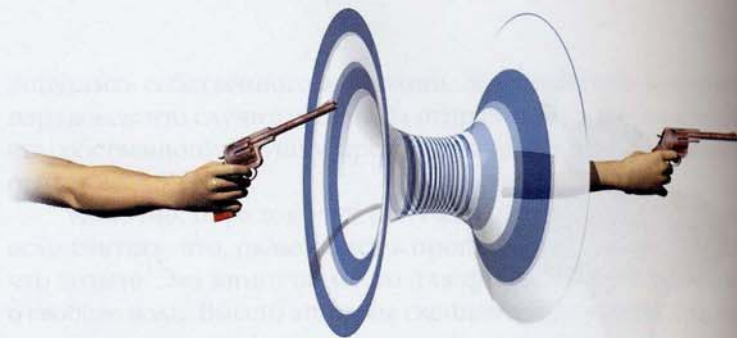


Рис. 5.3

Может ли пуля пролететь через кротовую нору в прошлое и попасть в того, кто ее выпустил?

линии*. Это позволяет переформулировать вопрос в технических терминах: могут ли в пространстве-времени существовать замкнутые времениподобные кривые, то есть такие, которые снова и снова возвращаются к своей начальной точке? Я буду называть подобные траектории «временными петлями».

Искать ответ на поставленный вопрос можно на трех уровнях. Первый — это уровень общей теории относительности Эйнштейна, которая подразумевает, что у Вселенной есть четко заданная история без всякой неопределенности. Для этой классической теории мы имеем законченную картину. Однако, как мы видели, такая теория не может быть абсолютно точной, поскольку согласно наблюдениям материя подвержена влиянию неопределенности и квантовых флуктуаций.

Поэтому можно задать вопрос о путешествиях во времени на втором уровне — для случая полуклассических теорий. Теперь мы рассматриваем поведение материи согласно квантовой теории с неопределенностями и квантовыми флуктуациями, но пространство-время считаем хорошо определенным и классическим. Эта картина не такая целостная, но она, по крайней мере, дает некоторое представление о том, как следует действовать.

* *Мировая линия* — это путь в четырехмерном пространстве-времени. Времениподобные мировые линии совмещают перемещение в пространстве с естественным движением вперед во времени. Только по таким линиям могут следовать материальные объекты.



Рис. 5.4

Допускает ли пространство-время существование замкнутых времениподобных кривых, вновь и вновь возвращающихся к своей исходной точке?

Наконец, есть подход с позиций полной квантовой теории гравитации, чем бы она в итоге ни оказалась. В этой теории, где не только материя, но также сами время и пространство подвержены неопределенности и флуктуируют, не вполне ясно даже, как поставить вопрос о возможности путешествий во времени. Пожалуй, лучшее, что можно сделать, — это попросить людей в областях, где пространство-время почти классическое и свободно от неопределенностей, интерпретировать свои измерения. Будет ли им казаться, что в областях с сильной гравитацией и большими квантовыми флуктуациями случаются путешествия во времени?

Начнем с классической теории: плоское пространство-время специальной теории относительности (без гравитации) не позволяет путешествовать во времени, невозможно это и в тех искривленных вариантах пространства-времени, которые изучались на первых порах. Эйнштейн был буквально шокирован, когда в 1949 г. Курт Гёдель, тот самый, что доказал знаменитую теорему Гёделя, открыл, что пространство-время во вселенной, целиком заполненной вращающейся материей, имеет временную петлю в каждой точке (рис. 5.4).

Решение Гёделя требовало введения космологической постоянной, которой может в реальности и не быть, но позднее были найдены подобные решения без космологической посто-

ТЕОРЕМА ГЁДЕЛЯ О НЕПОЛНОТЕ

В 1931 г. Курт Гёдель доказал знаменитую теорему о природе математики. Эта теорема утверждает, что в любой формальной системе аксиом вроде тех, что используются в современной математике, всегда существуют положения, которые не могут быть ни доказаны, ни опровергнуты на основе аксиом, определяющих систему.

Теорема Гёделя наложила фундаментальное ограничение на математику. Она стала настоящим шоком для научного сообщества, поскольку заставила отбросить широко распространенное убеждение, будто математика является согласованной и полной системой, основанной исключительно на логическом фундаменте. Теорема Гёделя, принцип неопределенности Гейзенберга и практическая невозможность проследить эволюцию даже детерминированных систем, когда они становятся хаотическими, составляют ядро набора ограничений, наложенных на научное знание, смысл которых в полной мере был осознан только в XX веке.

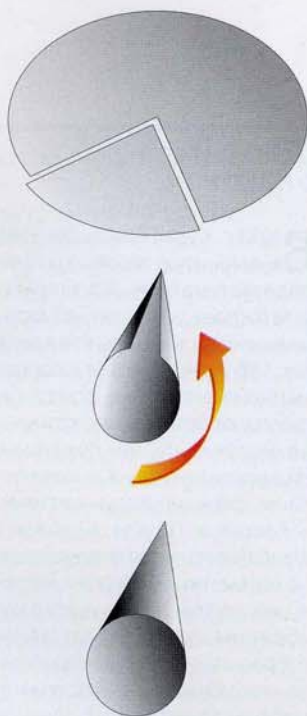


Рис. 5.5

янной. Особенно интересен случай, когда две космические струны движутся друг мимо друга на высокой скорости.

Космические струны не следует путать с элементарными объектами теории струн, с которыми они совершенно не связаны. Подобные объекты имеют протяженность, но при этом обладают крохотным поперечным сечением. Их существование предсказывается в некоторых теориях элементарных частиц. Пространство-время за пределами одиночной космической струны плоское. Однако это плоское пространство-время имеет клинообразный вырез, вершина которого лежит как раз на струне. Оно похоже на конус: возьмите большой круг из бумаги и вырежьте из него сектор, подобный куску пирога, вершина которого расположена в центре круга. Удалив вырезанный кусок, склейте края разреза у оставшейся части — получится конус. Он изображает пространство-время, в котором существует космическая струна (рис. 5.5).

Заметьте, поскольку поверхность конуса — это все тот же плоский лист бумаги, с которого мы начали (за вычетом удаленного сектора), его можно по-прежнему считать плоским, за исключением вершины. Наличие кривизны в вершине можно выявить по тому факту, что описанные вокруг нее окружности имеют меньшую длину, чем окружности, удаленные на такое же расстояние от центра на исходном круглом листе бумаги. Иными словами, окружность вокруг вершины короче, чем должна быть окружность того же радиуса в плоском пространстве из-за отсутствующего сектора (рис. 5.6).

Подобным же образом удаленный из плоского пространства-времени сектор укорачивает окружности вокруг космической струны, но не влияет на время или расстояние вдоль нее. Это означает, что пространство-время вокруг отдельной космической струны не содержит временных петель, и, следовательно, путешествия в прошлое невозможны. Однако если есть вторая космическая струна, которая движется относительно первой, ее направление времени будет комбинацией времени и пространственных изменений первой. Это значит, что сектор, который вырезается второй струной, будет сокращать как расстояния в пространстве, так и интервалы времени для наблюдателя, который движется вместе с первой струной (рис. 5.7). Если струны движутся друг относительно друга с околосветовой скоростью, сокращение времени при обходе обеих струн может быть столь значительным, что вы вернетесь обратно раньше, чем стартуете. Другими словами, здесь имеются временные петли, по которым можно путешествовать в прошлое.



Рис. 5.6
КОСМИЧЕСКАЯ СТРУНА ВЫРЕЗАЕТ СЕКТОР
ИЗ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

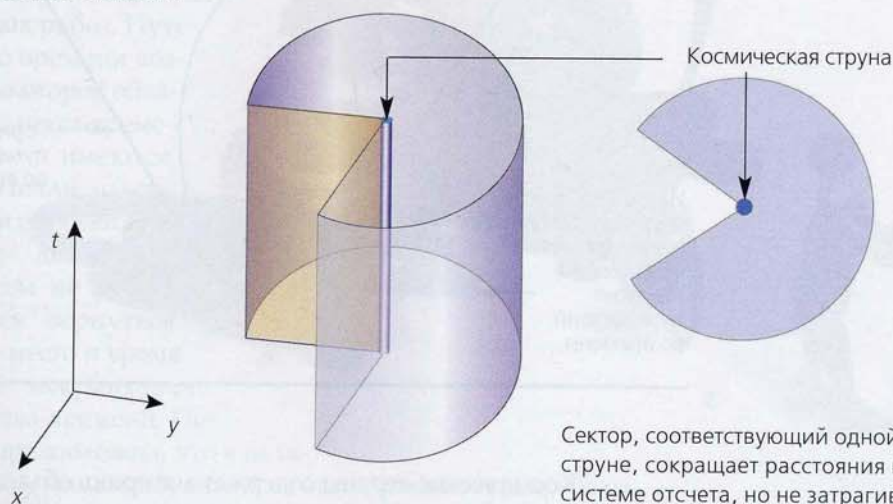


Рис. 5.7
СЕКТОРЫ С НЕПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ КРАЯМИ,
УДАЛЕННЫЕ ИЗ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ





Рис. 5.8

Даже самая могущественная цивилизация может искривить пространство-время только в конечной (финитной) области. Горизонт путешествий во времени — граница той части пространства-времени, в которой можно путешествовать в чье-то прошлое, — должен быть образован лучами света, исходящими из этой финитной области.

Космические струны содержат материю, обладающую положительной плотностью энергии, что совместимо с известной на сегодня физикой. Однако скручивание пространства, которое порождает временные петли, тянется до самой бесконечности в пространстве и до бесконечного прошлого во времени. Так что подобные структуры пространства-времени изначально, по построению допускают возможность путешествий во времени. Нет оснований считать, что наша собственная Вселенная скроена по такому извращенному фасону, у нас нет надежных свидетельств появления гостей из будущего. (Я не принимаю в расчет конспирологические теории о том, что НЛО прилетают из будущего, а правительство знает об этом, но скрывает правду. Обычно оно скрывает не столь замечательные вещи.) Поэтому я буду предполагать, что временных петель не было в далеком прошлом, а если точнее, то в прошлом относительно некоторой поверхности в пространстве-времени, которую я обозначу S . Вопрос: может ли высокоразвитая цивилизация построить машину времени? То есть может ли она изменить пространство-время в будущем относительно S (выше поверхности S на диаграмме) таким образом, чтобы петли появились только в области конечного размера? Я говорю о конечной области потому, что как бы ни была развита цивилизация, она, по-видимому, способна контролировать только ограниченную часть Вселенной. В науке правильно сформулировать задачу часто значит найти ключ к ее решению, и рассматриваемый нами случай — хорошая тому



иллюстрация. За определением финитной* машины времени я обращаюсь к одной из моих старых работ. Путешествие во времени возможно в некоторой области пространства-времени, где имеются временные петли, то есть траектории с досветовой скоростью движения, которые тем не менее умудряются вернуться в исходное место и время вследствие искривления пространства-времени. Поскольку я предположил, что в далеком прошлом временных петель не было, должен существовать, как я его называю, «горизонт путешествий во времени» — граница, которая отделяет область, содержащую временные петли, от области, где их нет (рис. 5.8).

Горизонт путешествий во времени весьма похож на горизонт черной дыры. В то время как последний образуется световыми лучами, которым не хватает самой малости, чтобы покинуть черную дыру, горизонт путешествий во времени задается лучами, находящимися на грани встречи с самими собой. Далее я буду считать критерием машины времени наличие так называемого финитно порожденного горизонта, то есть сформированного световыми лучами, которые испущены из области ограниченного размера. Иными словами, они не должны приходить из бесконечности или сингулярности, а только из конечной области, содержащей временную петлю, такой области, которую, как мы предполагаем, будет способна создать наша высокоразвитая цивилизация.

С принятием такого критерия машины времени появляется замечательная возможность использовать для изучения сингулярностей и черных дыр методы, которые разработали мы с Роджером Пенроузом. Даже не используя уравнения Эйнштейна, я могу показать, что в общем случае финитно порожденный горизонт будет содержать световые лучи, которые



Может ли некая высокоразвитая цивилизация построить машину времени?

* Финитный — имеющий конечные размеры.



Рис. 5.9
ОПАСНОСТЬ ПУТЕШЕСТВИЯ
ВО ВРЕМЕНИ

встречаются сами с собой, продолжая снова и снова возвращаться в одну и ту же точку. Делая круг, свет каждый раз будет испытывать все более и более сильное голубое смещение, а изображения будут становиться все синее и синее. Горбы волн в пучке начнут все больше сближаться друг с другом, а интервалы, через которые возвращается свет, сделаются все короче и короче. Фактически у частицы света будет конечная история, если рассматривать ее в собственном времени, даже несмотря на то, что она нарезает круги в конечной области и не попадает в сингулярную точку кривизны.

То, что частица света исчерпает свою историю за конечное время, может показаться несущественным. Но я могу также доказать возможность существования мировых линий, скорость движения по которым меньше световой, а продолжительность — конечна. Это могут быть истории наблюдателей, которые пойманы в конечную область перед горизонтом и двигаются круг за кругом все быстрее и быстрее, пока не достигнут за конечное время скорости света. Так что, если красивая пришельца из летающей тарелки приглашает вас в свою машину времени, будьте осторожны. Вы можете попасть в ловушку повторяющихся историй с конечной общей продолжительностью (рис. 5.9).

Эти результаты не зависят от уравнения Эйнштейна, а только от того, каким образом пространство-время скручено для получения временной петли в конечной области. Но все-таки что за материал могла бы использовать высокоразвитая цивилизация, чтобы построить машину времени конечных размеров? Может ли он везде иметь положительную плотность энергии, как в случае с описанным выше пространством-временем космической струны? Космическая струна не удовлетворяет моему требованию, чтобы временные петли появлялись только в конечной области. Но можно было бы подумать, будто это обусловлено лишь тем, что струны имеют бесконечную длину. Кто-то, возможно, надеется построить конечную машину времени, используя конечные петли из космических струн, имеющих всюду положительную плотность энергии. Жаль разочаровывать людей, которые, подобно Кипу, хотят вернуться в прошлое, но это невозможно сделать, сохраняя везде положительную плотность энергии. Я могу доказать, что для постройки конечной машины времени вам понадобится отрицательная энергия.

В классической теории плотность энергии всегда положительна, так что существование конечной машины времени на этом уровне исключается. Но ситуация меняется в полуклассической теории, где поведение материи рассматривается в соответствии с квантовой теорией, а пространство-время считается

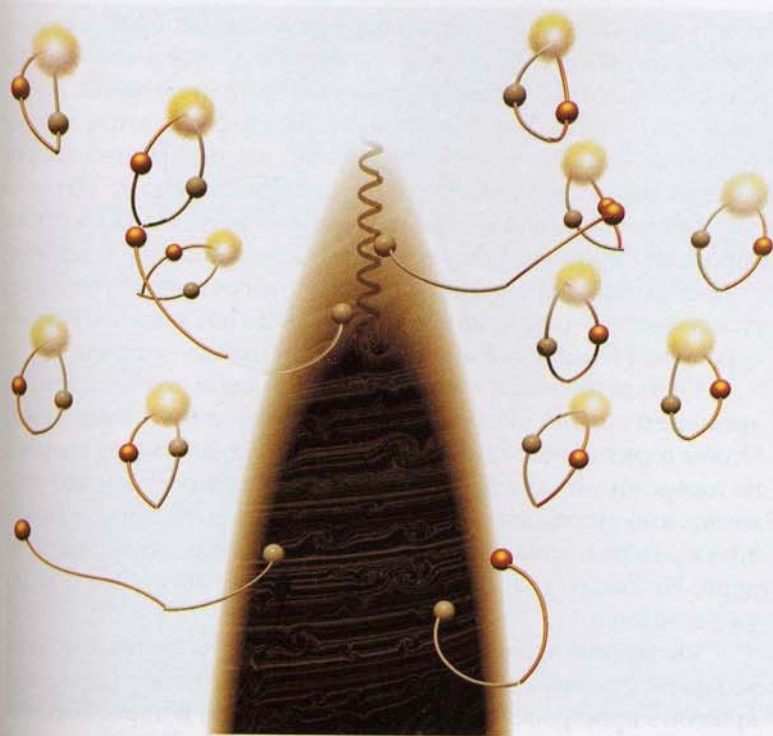


Рис. 5.11
КВАНТОВОЕ ИСПАРЕНИЕ
ЧЕРНОЙ ДЫРЫ



Рис. 5.10

Предсказание о том, что черные дыры испускают излучение и теряют массу, подразумевает, что квантовая теория заставляет отрицательную энергию течь в черную дыру через горизонт. Чтобы черная дыра уменьшилась в размерах, плотность энергии на горизонте событий должна быть отрицательной, то есть иметь как раз тот знак, который требуется для построения машины времени.

хорошо определенным, классическим. Как мы видели, принцип неопределенности в квантовой теории означает, что поля всегда флуктуируют вверх и вниз, даже в пустом, казалось бы, пространстве, и обладают бесконечной плотностью энергии. Ведь только вычтя бесконечную величину, мы получаем конечную плотность энергии, которую наблюдаем во Вселенной. Это вычитание может дать и отрицательную плотность энергии, по крайней мере локально. Даже в плоском пространстве можно найти квантовые состояния, в которых плотность энергии локально отрицательна, хотя общая энергия положительна. Интересно, действительно ли эти отрицательные значения заставляют пространство-время искривляться так, чтобы возникла финитная машина времени? Похоже, что они должны к этому приводить. Как явствует из главы 4, квантовые флуктуации означают, что даже пустое на первый взгляд пространство заполнено парами виртуальных частиц, которые вместе появляются, разлетаются, а затем сходятся снова и аннигилируют друг с другом (рис. 5.10). Один из элементов виртуальной пары будет иметь положительную энергию, а другой — отрицательную. При наличии черной дыры частица с отрицательной энергией



Мой внук
Уильям Макензи-Смит

может упасть на нее, а частица с положительной энергией — улететь на бесконечность, где она будет выглядеть как излучение, уносящее положительную энергию из черной дыры. А частицы с отрицательной энергией, падая в черную дыру, приведут к уменьшению ее массы и медленному испарению, сопровождаемому уменьшением размеров горизонта (рис. 5.11).

Обычная материя с положительной плотностью энергии порождает притягивающую гравитационную силу и искривляет пространство-время так, что лучи поворачивают друг к другу, в точности как шар на резиновом листе из главы 2 всегда заворачивает маленький шарик к себе и никогда — прочь.

Отсюда вытекает, что площадь горизонта черной дыры со временем только увеличивается и никогда не сокращается. Чтобы горизонт черной дыры уменьшился, плотность энергии на горизонте должна быть отрицательной, а пространство-время должно заставлять лучи света расходиться. Я впервые понял это как-то раз, ложась спать, вскоре после рождения моей дочери. Не скажу точно, как давно это было, но сейчас у меня уже есть внук.

Испарение черных дыр показывает, что на квантовом уровне плотность энергии может иногда быть отрицательной и искривлять пространство-время в направлении, которое было бы нужно для построения машины времени. Так что можно представить цивилизацию, стоящую на такой высокой ступени развития, что она способна добиться достаточно большой отрицательной плотности энергии, чтобы получить машину времени, которая годилась бы для макроскопических объектов вроде космических кораблей. Однако есть существенное различие между горизонтом черной дыры, формируемым лучами света, которые просто продолжают двигаться, и горизонтом в машине времени, который содержит замкнутые лучи света, продолжающие наворачивать круги. Виртуальная частица, раз за разом движущаяся по такому замкнутому пути, приносила бы в одну и ту же точку свою энергию основного состояния. Поэтому следует ожидать, что на горизонте, то есть на границе машины времени — области, в которой можно путешествовать в прошлое, — плотность энергии окажется бесконечной. Это подтверждается точными вычислениями в ряде частных случаев, которые достаточно просты, чтобы можно было получить точное решение. Выходит, что человек или космический зонд, который попытается пересечь горизонт и попасть в машину времени, будет полностью уничтожен завесой излучения (рис. 5.12). Так что будущее путешествий во времени выглядит довольно мрачным (или следует сказать «ослепительно ярким»?).



Рис. 5.12

Тот, кто попытается пересечь горизонт путешествий во времени, может быть уничтожен завесой излучения.

Плотность энергии вещества зависит от состояния, в котором оно находится, так что, возможно, высокоразвитая цивилизация сумеет сделать плотность энергии на границе машины времени конечной, «замораживая» или удаляя виртуальные частицы, которые круг за кругом движутся по замкнутой петле. Нет, однако, уверенности, что такая машина времени будет устойчивой: малейшее возмущение, например кто-то пересекающий горизонт, чтобы войти в машину времени, может запустить циркуляцию виртуальных частиц и вызвать испепеляющую молнию. Этот вопрос физикам следует свободно обсуждать, не боясь презрительных насмешек. Даже если окажется, что путешествия во времени невозможны, мы поймем, почему они невозможны, а это важно.

Чтобы со всей определенностью ответить на обсуждаемый вопрос мы должны рассмотреть квантовые флуктуации не только материальных полей, но и самого пространства-времени. Можно ожидать, что это вызовет некоторую размытость в путях световых лучей и в целом в принципе хронологического упорядочивания. В действительности можно рассматривать излучение черной дыры как утечку, вызванную квантовыми флуктуациями пространства-времени, которые свидетельствуют, что гори-

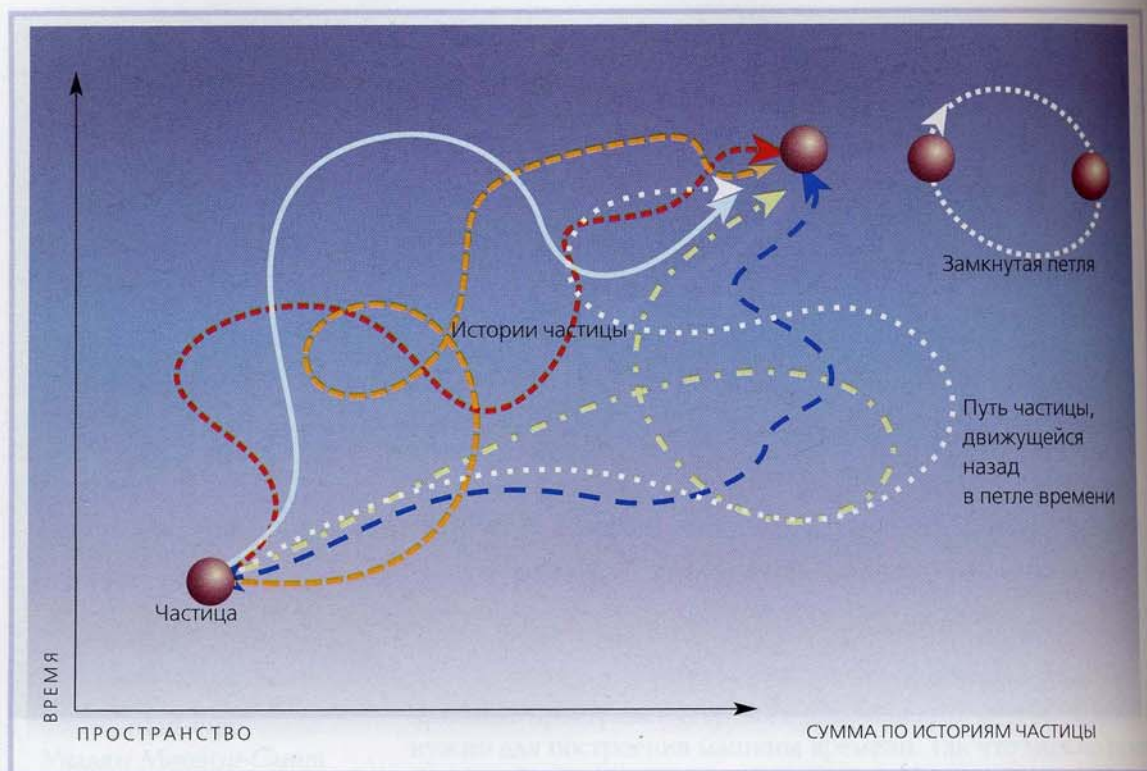


Рис. 5.13

Фейнмановская сумма по историям включает истории, в которых частица движется назад во времени, и даже истории, представляющие собой замкнутые петли в пространстве и времени.

зонт определен не вполне точно. Поскольку у нас пока нет готовой теории квантовой гравитации, трудно сказать, каков должен быть эффект флуктуаций пространства-времени. Но несмотря на это, мы можем надеяться получить некоторые подсказки из фейнмановского суммирования историй, описанного в главе 3.

Каждая история будет искривленным пространством-временем с материальными полями в нем. Поскольку мы собираемся суммировать по всем возможным историям, а не только по тем, которые удовлетворяют некоторым уравнениям, сумма должна включать и такие пространства-времена, которые достаточно закручены для путешествий в прошлое (рис. 5.13). Тогда возникает вопрос: почему такие путешествия не происходят повсеместно? Ответ состоит в том, что перемещения во времени на самом деле имеют место в микроскопическом масштабе, но мы их не замечаем. Если применить фейнмановскую идею суммирования по историям к одной частице, то надо включить истории, в которых она движется быстрее света и даже назад во времени. В частности, будут и такие истории, в которых частица движется круг за кругом по замкнутой петле во времени и про-

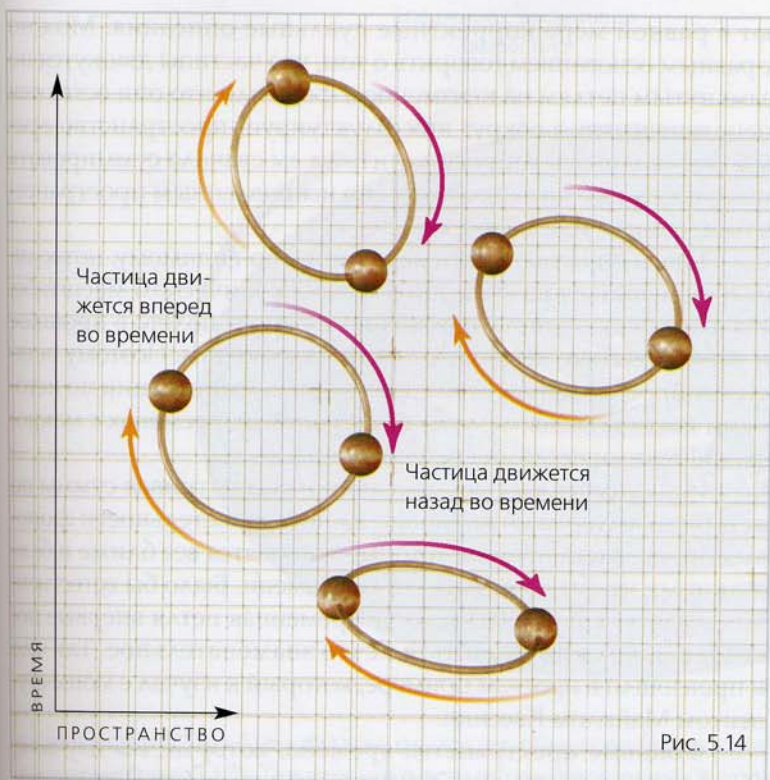


Рис. 5.14

странстве. Как в фильме «День сурка», где репортер проживает одни и те же сутки снова и снова (рис. 5.14).

Частицы с такими замкнутыми в петлю историями нельзя наблюдать на ускорителях. Однако их побочные проявления можно измерить, наблюдая ряд экспериментальных эффектов. Один из них — это незначительный сдвиг в излучении, испускаемом атомами водорода, который вызван электронами, движущимися по замкнутым петлям. Другой — небольшая сила, действующая между параллельными металлическими пластинами и вызванная тем, что между ними помещается чуть меньше замкнутых петель, чем во внешних областях, — это другая эквивалентная трактовка эффекта Казимира. Таким образом, существование замкнутых в петлю историй подтверждается экспериментом (рис. 5.15).

Можно поспорить о том, имеют ли подобные закольцованные истории частиц какое-то отношение к искривлению пространства-времени, поскольку они возникают даже на таком неизменном фоне, как плоское пространство. Но в последние годы мы обнаружили, что физические явления часто име-



Рис. 5.15

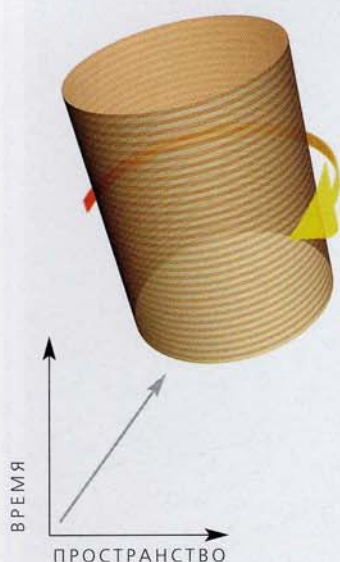


Рис. 5.16

Вселенная Эйнштейна подобна цилиндру: конечна в пространстве и неизменна во времени. Благодаря своему конечному размеру она может вращаться, ни в какой точке не превосходя скорости света.

ют в равной мере корректные дуальные описания. Можно с равным основанием говорить о том, что частицы движутся по замкнутым петлям на неизменном фоне или что они остаются неподвижными, а вокруг них флуктуирует пространство-время. Это сводится к вопросу: хотите ли вы сначала суммировать по траекториям частиц, а потом по искривленным пространствам-временам или наоборот?

Таким образом, квантовая теория, по-видимому, позволяет перемещаться во времени в микроскопическом масштабе. Но для научно-фантастических целей вроде полета в прошлое и убийства своего дедушки от этого мало пользы. Поэтому остается вопрос: может ли вероятность при суммировании по историям достичь максимума на пространствах-временах с макроскопическими петлями времени?

Исследовать этот вопрос можно, рассматривая суммы по историям материальных полей на последовательности фоновых пространств-времен, которые становятся все ближе и ближе к тому, чтобы допускать петли времени. Было бы естественно ожидать, что в момент, когда временная петля впервые появляется, должно случиться нечто знаменательное. Так оно и произошло в простом примере, который я изучал с моим студентом Майклом Кассиди.

Фоновые пространства-времена, которые мы изучали, были тесно связаны с так называемой вселенной Эйнштейна, пространством-временем, которое Эйнштейн предложил, когда еще верил, что Вселенная является статической и неизменной во времени, не расширяющейся и не сжимающейся (см. главу 1). Во вселенной Эйнштейна время идет от бесконечного прошлого к бесконечному будущему. А вот пространственные измерения конечны и замкнуты сами на себя, подобно поверхности Земли, но только с числом измерений на одно больше. Такое пространство-время можно изобразить как цилиндр, продольная ось которого будет временем, а сечение — пространством с тремя измерениями (рис. 5.16).

Так как вселенная Эйнштейна не расширяется, она не соответствует той Вселенной, в которой мы живем. Тем не менее это удобная основа для обсуждения путешествий во времени, поскольку она достаточно проста, чтобы можно было выполнить суммирование по историям. Забудем ненадолго о путешествиях во времени и рассмотрим вещество во вселенной Эйнштейна, которая вращается вокруг некоторой оси. Если вы окажетесь на этой оси, то будете оставаться в одной и той же точке пространства, как будто стоите в центре детской карусели. Но, расположившись в стороне от оси, вы будете двигаться в прост-



Рис. 5.17
ВРАЩЕНИЕ
В ПЛОСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

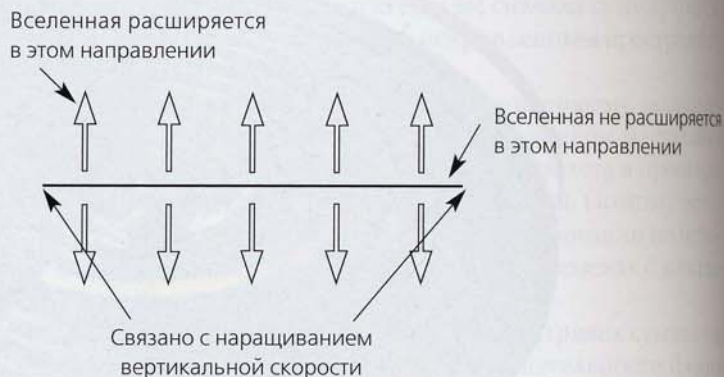
В плоском пространстве скорость твердотельного вращения вдали от оси превосходит скорость света.

ранстве вокруг нее. Чем дальше от оси, тем быстрее будет ваше движение (рис. 5.17). Так что, если вселенная бесконечна в пространстве, достаточно далекие от оси точки будут вращаться со сверхсветовой скоростью. Но, поскольку вселенная Эйнштейна конечна в пространственных измерениях, существует критическая скорость вращения, при которой ни одна ее часть еще не будет вращаться быстрее света.

Теперь рассмотрим сумму по историям частицы во вращающейся вселенной Эйнштейна. Когда вращение медленное, имеется много путей, по которым может двигаться частица при данном количестве энергии. Поэтому суммирование по всем историям частицы на таком фоне дает большую амплитуду. Это означает, что вероятность такого фона при суммировании по всем историям искривленного пространства-времени будет высока, то есть он относится к числу более вероятных историй. Однако по мере того как скорость вращения вселенной Эйнштейна приближается к критической отметке, а скорость движения ее внешних областей стремится к скорости света, остается единственный путь, который допустим для классических частиц на краю вселенной, а именно движение со скоростью света. Это означает, что сумма по историям частицы будет мала, а значит, вероятности таких пространственно-временных фонов в сумме



Рис. 5.18. ФОН С ЗАМКНУТЫМИ ВРЕМЕНИПОДОБНЫМИ КРИВЫМИ



по всем историям искривленного пространства-времени окажутся низкими. То есть они будут наименее вероятными.

Но какое отношение к путешествиям во времени и временным петлям имеют вращающиеся вселенные Эйнштейна? Ответ состоит в том, что они математически эквивалентны другим фонам, в которых возможны петли времени.

Эти другие фоны — вселенные, которые расширяются в двух пространственных направлениях. Такие вселенные не расширяются в третьем пространственном направлении, которое является периодическим. То есть если вы пройдете определенное расстояние в этом направлении, то окажетесь там, откуда стартовали. Однако с каждым кругом в этом направлении ваша скорость в первом и втором направлениях будет возрастать (рис. 5.18).

Если разгон невелик, то временных петель не существует. Рассмотрим, однако, последовательность фонов с все большим приращением скорости.

Петли времени появляются при некоторой критической величине разгона. Неудивительно, что этот критический разгон соответствует критической скорости вращения вселенных Эйнштейна. Поскольку вычисление





суммы по историям на обоих этих фонах математически эквивалентно, можно заключить, что вероятность таких фонов стремится к нулю по мере приближения к искривлению, необходимому для получения петель времени. Другими словами, вероятность искривления, достаточного для машины времени, равна нулю. Это подтверждает то, что я называю гипотезой защиты хронологии: законы физики устроены так, что не допускают перемещения во времени макроскопических объектов.

Хотя временные петли разрешены при суммировании по историям, их вероятности получаются чрезвычайно низкими. Основываясь на упоминавшихся выше соотношениях дуальности, я оценил вероятность того, что Кип Торн сможет отправиться в прошлое и убить своего дедушку: она оказалась меньше чем единица к десяти в степени триллион триллионов триллионов триллионов триллионов.

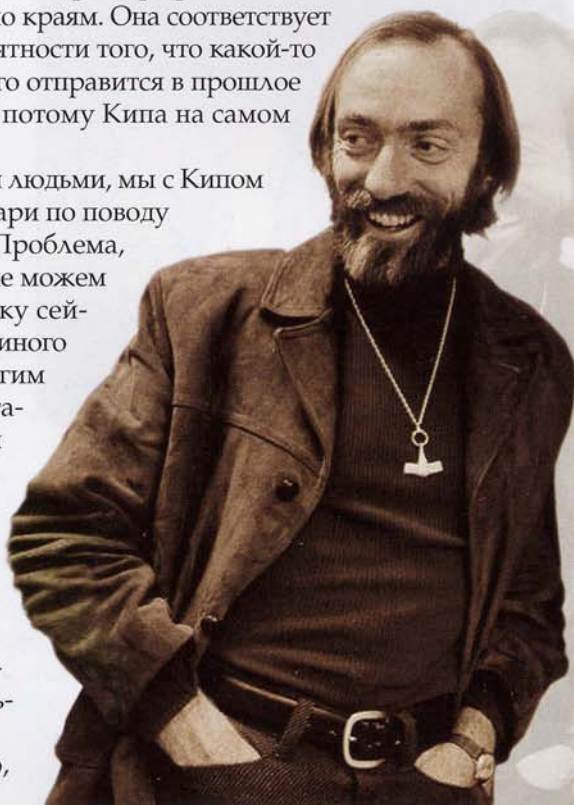
Это просто удивительно низкая вероятность, но если вы внимательно посмотрите на фотографию Кипа, то заметите легкую дымку по краям. Она соответствует исчезающе малой вероятности того, что какой-то проходивец из будущего отправится в прошлое и убьет его дедушку, и потому Кипа на самом деле здесь нет.

Будучи азартными людьми, мы с Кипом хотели бы заключить пари по поводу аномалии вроде этой. Проблема, однако, в том, что мы не можем этого сделать, поскольку сейчас придерживаемся единого мнения. А с кем-то другим я пари заключать не стану. Вдруг он окажется пришельцем из будущего, знающим, что путешествия во времени возможны?

Вам показалось, что эта глава написана по указке правительства, чтобы скрыть реальность путешествий во времени? Возможно, вы правы.

Вероятность того, что Кип сможет отправиться в прошлое и убить своего дедушку, составляет $1/10^{10^{60}}$.

Другими словами, меньше чем 1 шанс на единицу с триллионом триллионов триллионов триллионов триллионов нулей после нее.



ГЛАВА 6

НАШЕ БУДУЩЕЕ: ЗВЕЗДНЫЙ ПУТЬ ИЛИ НЕТ?

*О том, как биологическая и электронная жизнь
будут все быстрее и быстрее усложняться*

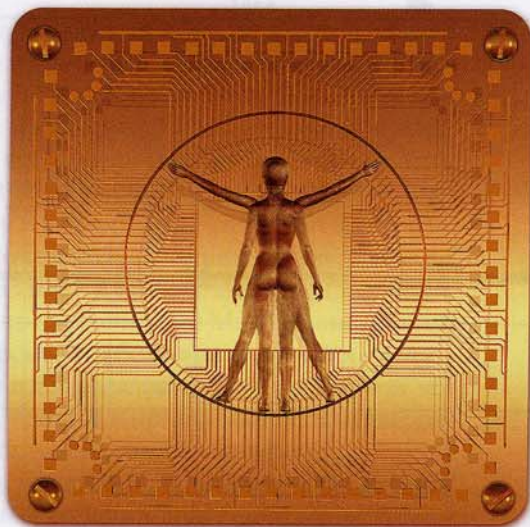
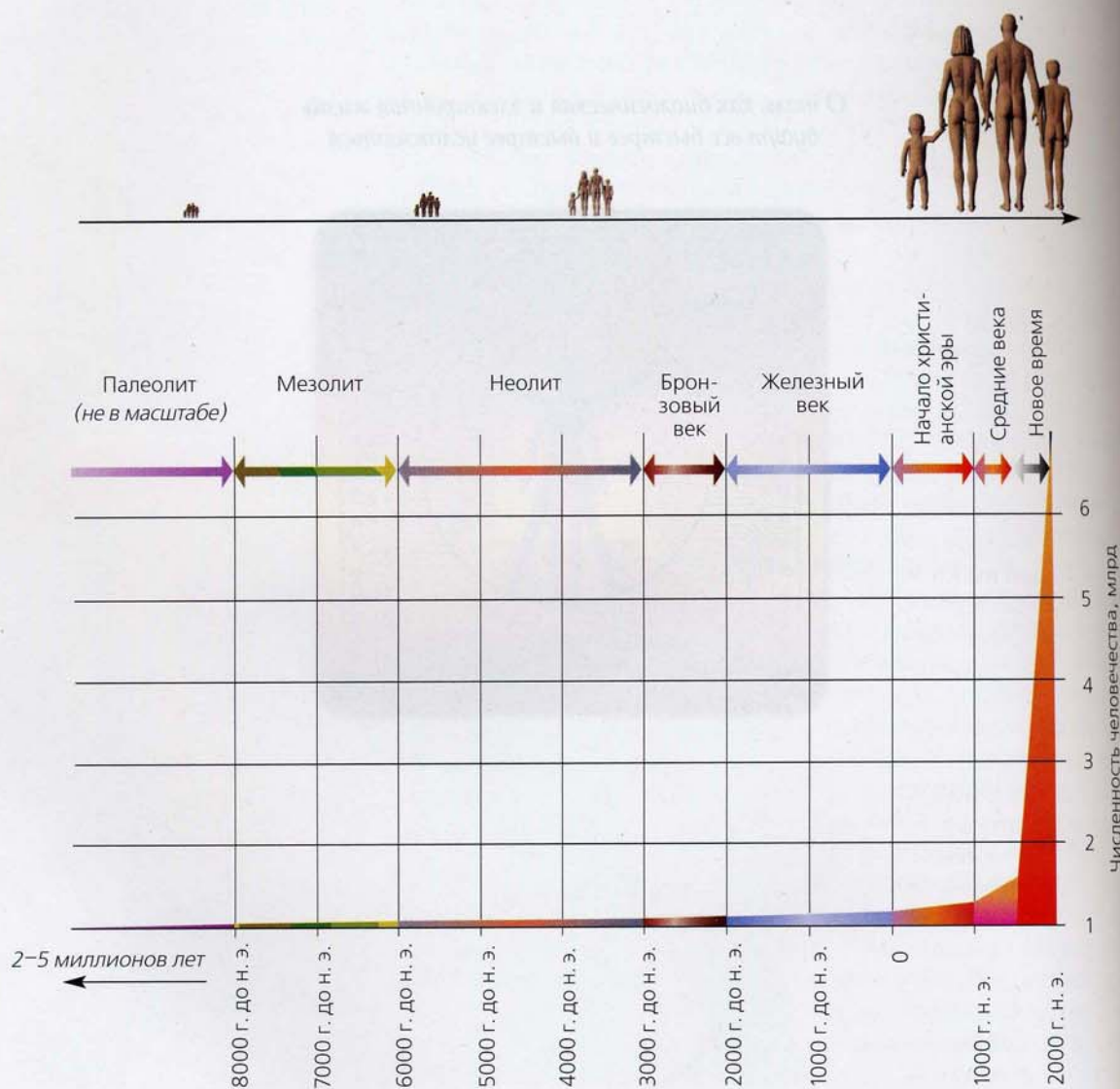




Рис. 6.1
РОСТ НАСЕЛЕНИЯ ЗЕМЛИ





*Я играю в покер с Ньютоном, Эйнштейном и лейтенантом Дэйтой.
Кадр из сериала
«Звездный путь:
Новое поколение»*

С любезного разрешения
Paramount Pictures
© Paramount Pictures, 2001
Все права защищены

Своей огромной популярностью «Звездный путь» обязан тому, что в нем представлена безопасная и успокаивающая версия будущего. Я сам до некоторой степени фанат «Звездного пути», так что легко согласился принять участие в эпизоде, где играл в покер с Ньютоном, Эйнштейном и лейтенантом Дэйтой. Я обыграл их всех, но, к сожалению, объявили красную тревогу и я не успел забрать свой выигрыш.

Общество, которое показано в «Звездном пути», намного превосходит нас в науке, технике и политической организации. (Последнее кажется не слишком сложным.) Между нашим и тем временем должны были произойти большие изменения с сопутствующими им кризисами и потрясениями, но в тот период, который нам показан, наука, техника и организация общества, по видимому, достигли уровня, близкого к совершенству.

Мне хотелось бы поставить под сомнение эту картину и спросить, достигнем ли мы когда-нибудь стабильного конечного состояния в науке и технике. За те десять или около того тысяч лет, что прошли с последнего ледникового периода, человеческая раса никогда не останавливалась на постоянном уровне знаний и неизменных технологиях. Была задержка в Средние века после падения Римской империи. Но численность населения Земли, которая служит мерой технологической способности сохранить жизнь и прокормить себя, устойчиво росла лишь с небольшими откатами, вроде того, что вызвала Черная смерть* (рис. 6.1).

* Черная смерть — эпидемия бубонной чумы, которая в 1347–1351 гг. унесла жизни около 75 млн человек по всему миру, в том числе от 15 до 34 млн человек в Европе (до половины тогдашнего населения).

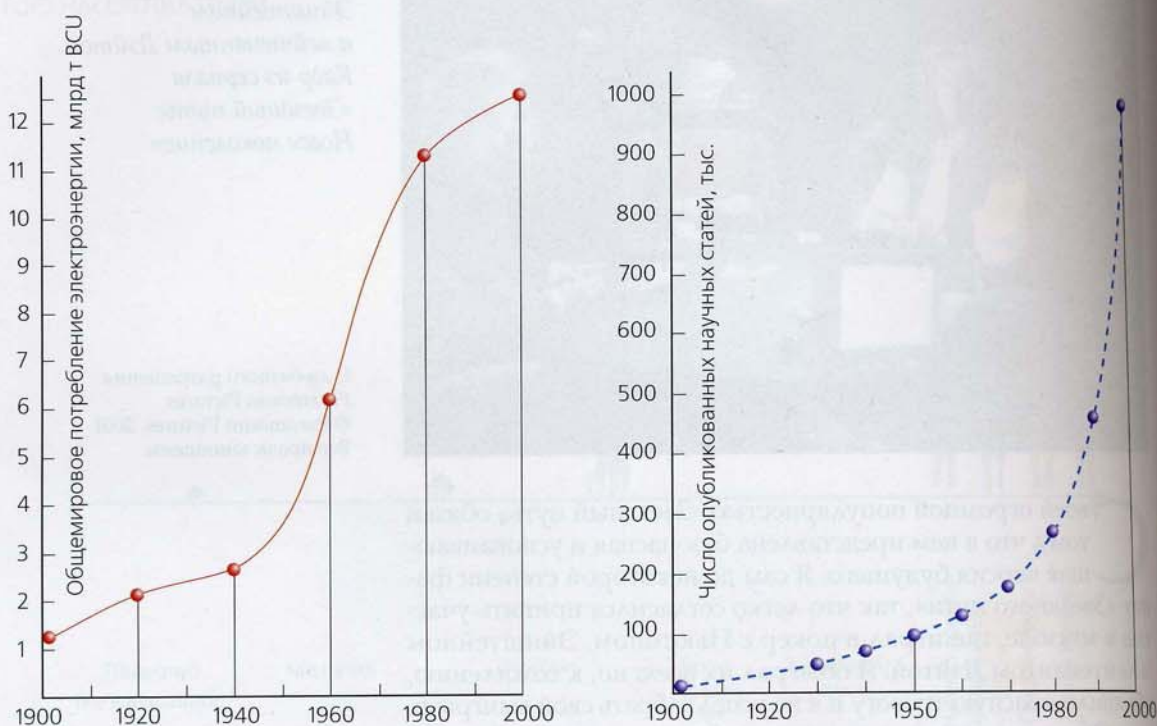


Рис. 6.2

Слева: Общемировое потребление электроэнергии (тонна ВСУ — эквивалентная тонна битуминозного угля, 1 тонна ВСУ = 8,13 МВт·ч).

Справа: Количество (тыс.) ежегодно публикуемых научных статей. В 1900 г. опубликовано около 9 тыс. статей. К 1950 г. их стало появляться около 90 тыс., а к 2000 г. — около 900 тыс.

В последние 200 лет рост населения стал экспоненциальным; это значит, что относительный годовой прирост, выраженный в процентах, остается неизменным. Сейчас он составляет 1,9 % в год. Может показаться, что это немного, однако при таких темпах мировое население удваивается каждые 40 лет (рис. 6.2).

Другими индикаторами технического прогресса в последнее время служат потребление электроэнергии и количество научных публикаций. Они тоже демонстрируют экспоненциальный рост с периодом удвоения меньше 40 лет. Нет никаких признаков того, что научное и техническое развитие замедлится или остановится в скором будущем — и уж, конечно, этого не случится до эпохи «Звездного пути», которая не за горами. Но если население Земли и его потребности в электроэнергии продолжат расти нынешними темпами, к 2600 г. люди заполнят всю планету, так что поместятся на ней только стоя плечом к плечу, а электричество разогреет ее до красного свечения.

Если вы будете ставить друг за другом на одну полку все напечатанные книги, вам придется ехать со скоростью 150 км/ч,



К 2600 г. население Земли, чтобы уместиться на планете, вынуждено будет стоять плечом к плечу, а потребляемая электроэнергия разогреет ее до красного свечения

для того чтобы держаться у конца занятого места. Конечно, к 2600 г. произведения художественной литературы и научные работы будут публиковаться в электронной форме, а не на бумаге, но все же если экспоненциальный рост продолжится, то только в моей области теоретической физики станет появляться по десять статей в секунду и на их чтение просто не будет времени.

Ясно, что современный экспоненциальный рост не может продолжаться бесконечно. Так что же случится? Одна из возможностей состоит в том, что мы полностью уничтожим себя в какой-нибудь катастрофе вроде ядерной войны. Существует мрачная идея, будто мы потому до сих пор не вступили в контакт с инопланетянами, что цивилизации, достигнув нашего уровня развития, становятся неустойчивыми и самоуничтожаются. Однако я оптимист. Я не верю, что человеческая раса зашла так далеко лишь для того, чтобы испустить дух, когда все самое интересное еще только начинается.

Картина будущего, нарисованная в «Звездном пути», — согласно которой мы достигнем высокого, но в целом статичного уровня развития — может оказаться верной в отношении



Рис. 6.3

В сериале «Звездный путь» вся история зависит от звездолета «Энтерпрайз» и космические корабли вроде того, что изображен вверху, способны двигаться на варп-скорости, многократно обгоняя свет. Однако, если верна гипотеза защиты хронологии, мы будем исследовать Галактику с помощью ракетных двигателей на кораблях, движущихся медленнее света.

нашего знания основных законов, управляющих Вселенной. Как я покажу в следующей главе, возможно, существует некая окончательная теория, которую мы откроем в недалеком будущем. Эта окончательная теория, если она существует, определит, может ли быть реализована мечта о варп-двигателе из «Звездного пути». Согласно современным представлениям нам предстоит долго и нудно исследовать Галактику с помощью кораблей, путешествующих с досветовой скоростью, однако пока мы не располагаем полной объединенной теорией, нельзя узнать, сможем ли мы создать варп-двигатель (рис. 6.3).

С другой стороны, мы уже знаем законы, которые соблюдаются во всех ситуациях, кроме самых критических, — законы, которым подчиняется экипаж «Энтерпрайза», если не сам звездо-

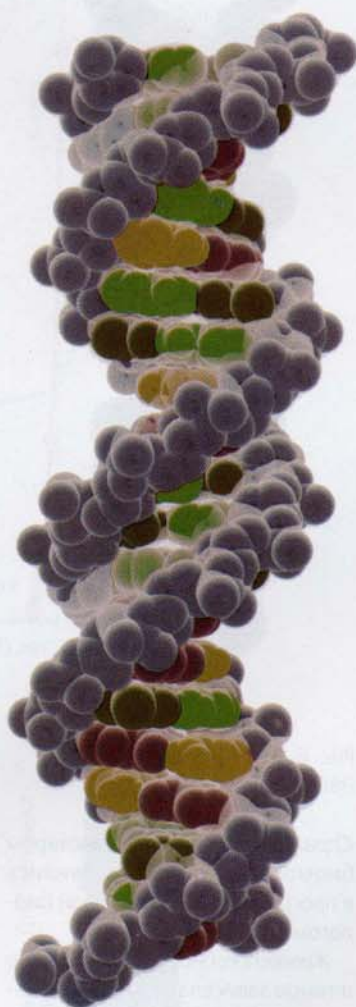


лет. И все-таки непохоже, что мы когда-либо достигнем стабильного состояния в том, как применять эти законы или в сложности систем, которые можно с их помощью создавать. Именно этой сложности и будет посвящен остаток данной главы.

Среди всех систем, которые у нас есть, самые сложные — это наши собственные тела. Жизнь, по-видимому, появилась в первичных океанах, которые покрывали Землю четыре миллиарда лет назад. Как это случилось, нам неизвестно. Возможно, случайные столкновения атомов привели к образованию макромолекул, способных самовоспроизводиться и собираться в более сложные структуры. Но мы точно знаем, что около трех с половиной миллиардов лет назад появилась весьма сложная молекула ДНК.

ДНК — это основа всей жизни на Земле. Она имеет структуру двойной спирали, подобную винтовой лестнице; эту структуру открыли Фрэнсис Крик и Джеймс Уотсон в Кавендишской лаборатории Кембриджа в 1953 г.* Две нити двойной спирали связаны парами оснований, которые играют роль ступенек спиральной лестницы. В ДНК имеется четыре типа оснований: аденин, гуанин, тимин и цитозин. Порядок их расположения вдоль винтовой лестницы, кодирует генетическую информацию, которая позволяет ДНК собирать вокруг себя организм, для того чтобы самовоспроизводиться. Когда она производит свои копии, иногда возникают ошибки в соответствии или порядке следования оснований вдоль спирали. В большинстве случаев это либо лишает ДНК способности к репродукции, либо делает его менее вероятным, а значит, такие генетические ошибки, или мутации, как их называют, будут отсеиваться. Но в редких случаях мутация увеличивает шансы ДНК на выживание и репродукцию. Подобные изменения в генетическом коде закрепляются. Таким способом информация, содержащаяся в последовательности ДНК, постепенно эволюционирует и усложняется (рис. 6.4).

Поскольку в основе биологической эволюции лежит случайное блуждание в пространстве всех генетических возможностей, она протекает очень медленно. Сложность, определяемая количеством бит информации, закодированных в ДНК, примерно равна числу оснований в одной молекуле. Первые миллиарда два лет сложность должна была прирастать со скоростью порядка одного бита информации за 100 лет. Постепенно темп усложнения ДНК нарастал, увеличившись



* За что в 1962 г. были удостоены Нобелевской премии по физиологии и медицине.

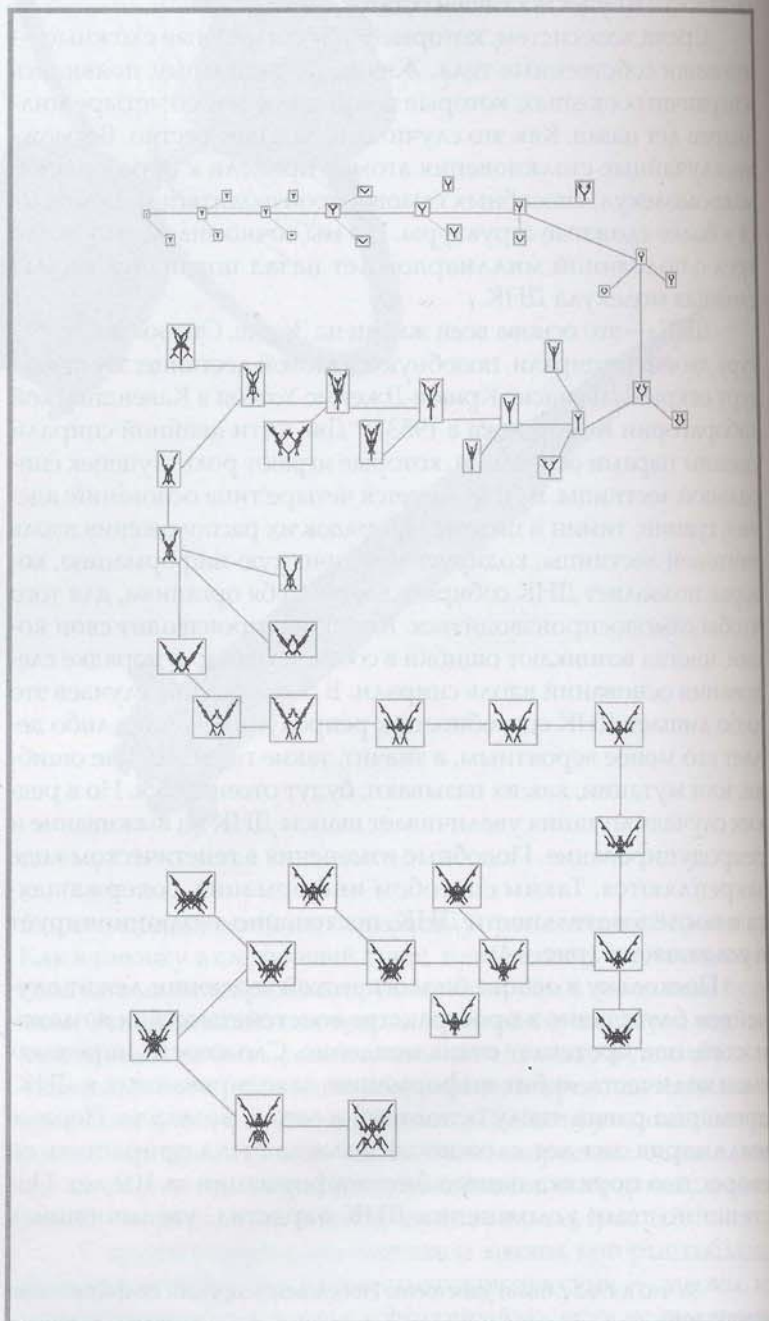


Рис. 6.4
ЭВОЛЮЦИЯ В ДЕЙСТВИИ

Справа: созданные компьютером биоморфы, которые развились в программе, разработанной биологом Ричардом Докинзом.

Жизнеспособность того или иного штамма зависела от того, насколько его особи «интересны», «необычны» или «похожи на насекомое».

Все начиналось с одного пикселя, и первые поколения развивались в условиях, подобных естественному отбору. Докинз вывел насекомоподобные формы удивительно быстро — всего за 29 поколений (получив по пути ряд эволюционных тупиков).



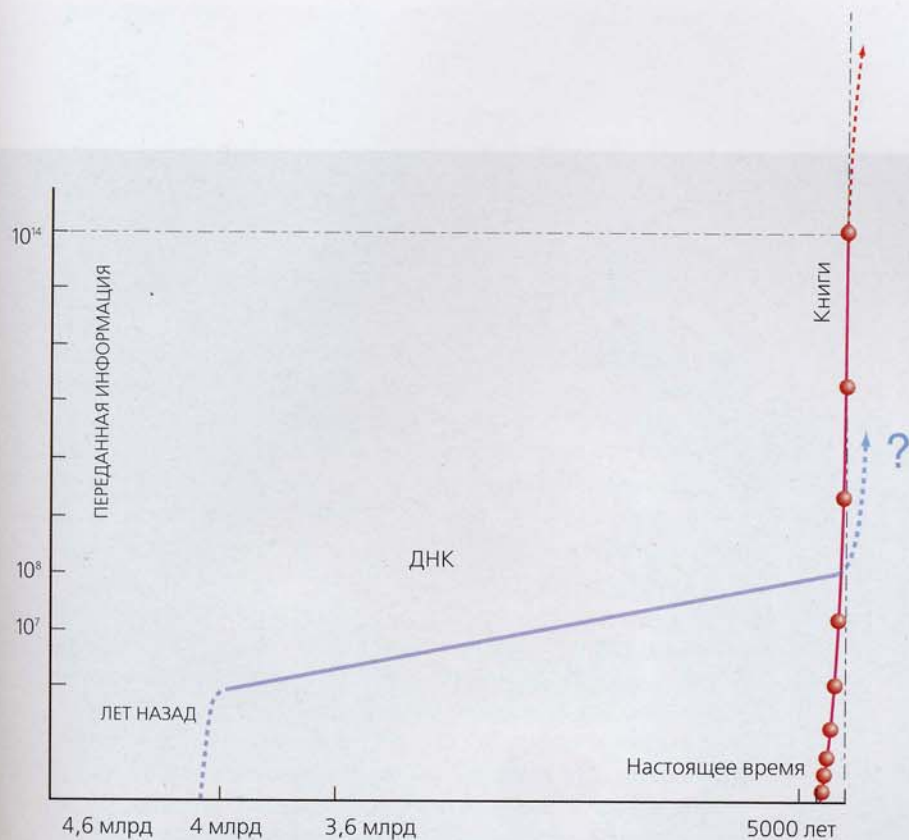


Рис. 6.5
РОСТ СЛОЖНОСТИ
С МОМЕНТА
ОБРАЗОВАНИЯ ЗЕМЛИ
(не в масштабе)

примерно до одного бита в год на протяжении нескольких последних миллионов лет*. А потом, около шести или восьми тысяч лет назад, возникло одно большое усовершенствование. Мы обрели письменность. Теперь информация могла передаваться от одного поколения к другому независимо от чрезвычайно медленного процесса случайных мутаций и естествен-

* Геном человека содержит около 3 млрд пар нуклеотидов. Каждая из них несет 2 бита информации. Это значит, что средняя скорость накопления генетической информации за все время существования жизни на Земле была не ниже 1,5 бит в год. По современным представлениям, механизмы эволюции значительно сложнее и многообразнее сугубо случайного блуждания. Бактерии обмениваются целыми фрагментами генетического кода. Участки генома могут многократно копироваться и перемещаться с места на место. Половое размножение резко повышает изменчивость. Ретровирусы, по-видимому, способны внедрять в геном высших организмов целые куски генетического кода. Все это обеспечивает значительно большую скорость накопления генетической информации, чем та, что достигается за счет одних только случайных точечных мутаций.





Выращивание эмбрионов вне человеческого тела позволит
развиться более крупному мозгу и более сильному интеллекту



ного отбора генетического кода в цепочках ДНК. Сложность колоссально увеличилась. Одна книжка карманного формата содержит такое же количество информации, которое отличает ДНК обезьяны от ДНК человека, тридцатитомная энциклопедия может описать всю последовательность человеческой ДНК (рис. 6.5).

Еще важнее то, что информация в книгах способна быстро обновляться. Современный темп изменения человеческой ДНК под действием биологической эволюции составляет около одного бита в год. Но за год выходит около двухсот тысяч новых книг, а скорость появления новой информации превосходит миллион бит в секунду. Конечно, большая часть этой информации — мусор, но даже если только один бит из миллиона окажется полезным, это будет все равно в сто тысяч раз быстрее биологической эволюции*.

Эта передача данных по внешним, небиологическим каналам привела человеческую расу к доминированию в мире и обеспечила экспоненциальный рост населения. Но сейчас мы находимся в начале новой эры, в которой сможем увеличить сложность наших внутренних записей, наших ДНК, не ожидая медленного течения биологической эволюции. Существенных изменений в человеческой ДНК не происходило по крайней мере последние десять тысяч лет, но весьма вероятно, что мы сможем полностью перепроектировать ее в ближайшие несколько тысячелетий. Конечно, многие люди скажут, что генная инженерия человека должна быть запрещена, но сомнительно, чтобы мы могли ее избежать. Генная инженерия растений и животных будет разрешена по экономическим причинам, и кто-то непременно попробует ее на человеке. Если только у нас не установится тоталитарный мировой порядок, кто-то где-то будет создавать усовершенствованного человека.

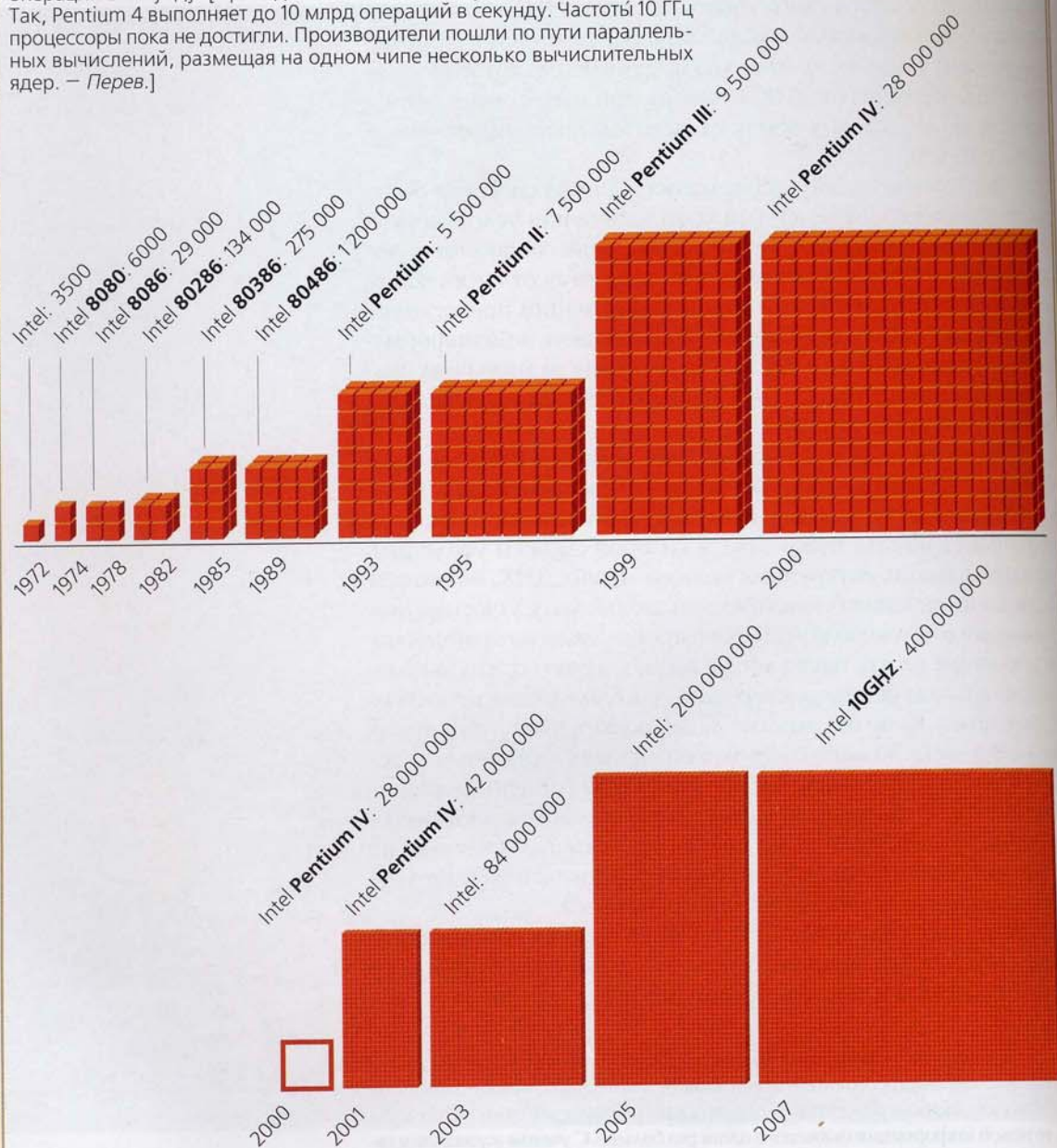
Ясно, что создание такого человека вызовет огромные социальные и политические проблемы, связанные с неусовершенствованными людьми. Мои намерения состоят не в том,

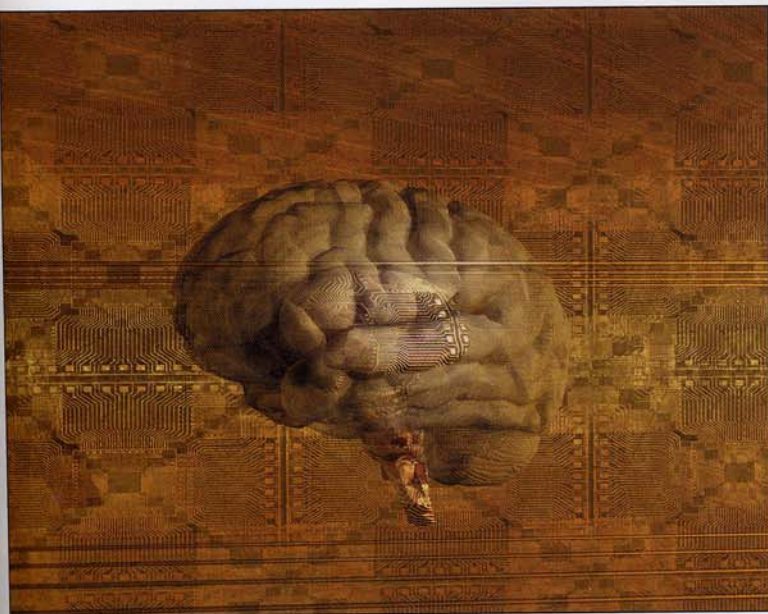
* Конечно, все приведенные цифры крайне приблизительны. Если считать только текстовую информацию в новых книгах, то получится меньше миллиона бит в секунду. Но если те же книги посчитать как графику с высоким разрешением, то новой информации окажется в сотни раз больше. С учетом журналов и газет оценка объема информации вырастет примерно на два порядка. Еще больше получится, если учесть информацию, сохраняемую в памяти компьютеров.



Рис. 6.6. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ РОСТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ КОМПЬЮТЕРОВ С 1972 ПО 2007 г.

По данным и консервативным прогнозам одного из производителей центральных процессоров. Цифры после названия процессора — число операций в секунду. [Приведенные показатели существенно занижены. Так, Pentium 4 выполняет до 10 млрд операций в секунду. Частоты 10 ГГц процессоры пока не достигли. Производители пошли по пути параллельных вычислений, размещая на одном чипе несколько вычислительных ядер. — Перев.]





Нейроимплантаты позволят улучшить память и за считанные минуты усваивать большие объемы информации, например новый язык или содержание этой книги. Усовершенствованные люди будут лишь отдаленно напоминать нас

чтобы отстаивать генную инженерию человека как желательный путь развития, а лишь в том, чтобы сообщить: это весьма вероятно случится, хотим мы того или нет. Вот почему я не верю в научную фантастику вроде «Звездного пути», где люди спустя четыре столетия в основном такие же, как и сегодня. Я думаю, что человеческая раса и ее ДНК будут наращивать сложность очень быстро. Мы должны понять, что это, скорее всего, случится, и обдумать, как нам реагировать.

Можно сказать, что умственные и физические свойства человеческой расы требуют усовершенствования, если она намерена иметь дело с нарастающей сложностью окружающего мира и принять новые вызовы, такие как космические путешествия. Людям также нужно становиться сложнее, если биологические системы намерены сохранить превосходство над электронными. Сейчас компьютеры имеют преимущество в скорости, но они не проявляют никаких признаков разума. Это не удивительно, поскольку современные компьютеры не сложнее мозга дождевого червя, у которого мощного интеллекта не наблюдается.

Но компьютеры подчиняются известному закону Мура: их скорость и сложность удваиваются каждые 18 месяцев (рис. 6.6). Это тоже один из примеров экспоненциального роста, который не может длиться бесконечно. Однако он, вероятно, будет продолжаться, пока компьютеры по сложности устройства не сравняются с человеческим мозгом. Некоторые люди говорят, что



Наши современные компьютеры все еще отстают по вычислительной мощности от мозга простого земляного червя



СОБЫТИЯ (не в масштабе)

0,00003 млрд лет. Большой взрыв и огненная, оптически непрозрачная инфляционно расширяющаяся Вселенная

Разделение вещества и энергии. Прозрачная Вселенная

1 млрд лет. Скопления вещества образуют протогалактики, в которых синтезируются тяжелые элементы

3 млрд лет. Возникают галактики, запечатленные на Глубоких полях телескопа «Хаббл»



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВО ВРЕМЕНИ (в масштабе)



Рис. 6.7
КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Человеческий род существует на протяжении крошечной доли всей истории Вселенной. (Если эту схему изобразить в масштабе, так чтобы времени существования человека соответствовало около 7 см, вся история Вселенной протянется больше чем на километр.) Любая форма жизни, которую мы встретим, скорее всего, будет либо намного более примитивна, либо намного более развита, чем мы.

компьютеры никогда не продемонстрируют настоящего разума, что бы мы под этим ни подразумевали. Но мне кажется, что если очень сложные химические молекулы могут, работая в человеке, сделать его разумным, то и столь же сложные электронные цепи способны заставить компьютеры вести себя разумно. А став разумными, они, вероятно, создадут компьютеры еще более сложные и разумные.

Будет ли это нарастание биологической или электронной сложности продолжаться вечно или имеется какой-то естественный предел? В случае человеческого разума ограничением до сих пор служили размеры головы плода, которая должна проходить через родовые пути. Наблюдая за рождением троих моих детей, я убедился, как трудно голове ребенка выйти наружу. Но, думаю, что в следующие несколько сотен лет мы научимся выращивать детей вне человеческого тела и это ограничение будет снято. В конечном счете, однако, человеческий мозг, выросший в размерах благодаря генной инженерии, столкнется с другой проблемой: биохимические агенты, ответственные за нашу мыслительную деятельность, движутся относительно медленно. Это означает, что дальнейшее нарастание сложности мозга будет происходить за счет скорости. Мы можем быть либо находчивыми, либо муд-



рыми, но не теми и другими вместе. И все же, думаю, мы можем стать намного умнее большинства персонажей «Звездного пути», не в этом будут заключаться трудности.

Для электронных цепей характерна та же проблема «сложность против скорости», что и для человеческого мозга. В этом случае, однако, сигналы — электрические, а не биохимические — распространяются со скоростью света, которая много выше. Тем не менее скорость света уже стала на практике ограничивающим фактором при создании все более быстрых компьютеров. Можно улучшить положение, сделав цепи меньше, но в конечном счете мы столкнемся с пределом, который накладывает атомарная природа вещества. Впрочем, у нас еще остается некоторый простор для развития, пока мы не подойдем к этому барьеру.

Другой путь, на котором электроника может наращивать свою сложность при сохранении скорости, состоит в копировании человеческого мозга. В мозгу нет одного центрального процессорного устройства, которое последовательно обрабатывало бы команду за командой. Вместо этого миллионы процессоров работают вместе в одно и то же время. Такая массовая параллельная обработка также является будущим электронного разума.





БИОЭЛЕКТРОННЫЙ ИНТЕРФЕЙС

Через двадцать лет тысячедолларовый компьютер может сравняться по сложности с человеческим мозгом. Параллельные процессоры будут имитировать работу нашего мозга и позволят компьютерам действовать так, будто те обладают разумом и сознанием.

Нейроимплантаты могут обеспечить значительно более быстрый интерфейс «мозг—компьютер», стирая границу между биологическим и электронным разумом.

Вероятно, в ближайшем будущем большинство деловых соглашений станут заключать между собой киберличности через Всемирную сеть.

Через десять лет многие из нас могут даже отдать предпочтение виртуальной жизни в Сети, создавая киберсодружества и выстраивая виртуальные отношения.

Наше понимание генома человека, несомненно, обеспечит огромный прогресс в медицине, но оно также позволит нам значительно увеличить сложность структуры человеческой ДНК. В течение нескольких сотен лет генная инженерия человека может заменить собой биологическую эволюцию, преобразовав человеческий вид и поставив совершенно новые этические вопросы.

Для космических путешествий за пределы нашей Солнечной системы, по-видимому, потребуются полностью генетически реконструированные люди или беспилотные зонды, управляемые роботами.





Если предположить, что в ближайшее столетие человечество само себя не уничтожит, то, вероятно, мы расселимся сначала по планетам Солнечной системы, а потом и у ближайших звезд. Но это не будет похоже на «Звездный путь» или «Вавилон-5», где едва ли не в каждой звездной системе встречается новая раса, почти неотличимая от людей. Человек пребывает в своей нынешней форме всего пару миллионов лет из примерно 15 миллиардов, прошедших со времен Большого взрыва (рис. 6.7).

Поэтому даже если у других звезд развивается жизнь, шансы застать ее на стадии, внешне похожей на человека, очень малы. Любая внеземная жизнь, которую мы встретим, скорее всего, будет либо намного более примитивной, либо намного более развитой. Если она более развита, то почему не распространилась по Галактике и не добралась до Земли? Если бы пришельцы наведались к нам, это было бы очевидно: скорее как в фильме «День независимости», чем в «Инопланетянин».

Так как же можно объяснить отсутствие космических пришельцев? Возможно, существующая где-то во Вселенной высокоразвитая раса знает о нашем существовании, но оставила нас подрастать, варясь в собственном, примитивном соку. Впрочем, сомнительно, чтобы они проявили такую заботу в отношении низкоразвитой формы жизни: многие ли из нас беспокоятся о том, сколько насекомых или земляных червей мы давим ногами? Более приемлемое объяснение состоит в том, что очень низка вероятность развития жизни на других планетах либо того, что жизнь порождает разум. Поскольку мы считаем себя разумными, пусть и без особых к тому оснований, то склонны считать разум неизбежным следствием эволюции. Однако в этом можно усомниться. Вовсе не очевидно, что разум имеет значительную ценность в плане выживания. Бактерии отлично живут без него и переживут нас, если так называемый разум приведет к самоуничтожению в ядерной войне. Так что, исследуя Галактику, мы можем обнаружить примитивную жизнь, но маловероятно, что мы найдем существ, похожих на нас.

Будущее науки вряд ли окажется похожим на успокоительную картину, нарисованную в фильме «Звездный путь»: Вселенная, населенная множеством гуманоидных рас с высокоразвитыми, но в целом статическими наукой и техникой. Я думаю, мы останемся в одиночестве, но будем быстро развиваться в направлении биологического и электронного усложнения. Немного из этого появится в ближайшую сотню лет, в пределах которой мы еще можем давать надежные прогнозы. Но к концу третьего тысячелетия, если мы до него доживем, отличия от мира «Звездного пути» будут радикальными.



Способен ли разум стать залогом долгосрочного выживания?

ГЛАВА 7

О ДИВНЫЙ БРАНЫ МИР

*О том, живем ли мы на бране
или являем собой всего-навсего голограммы*

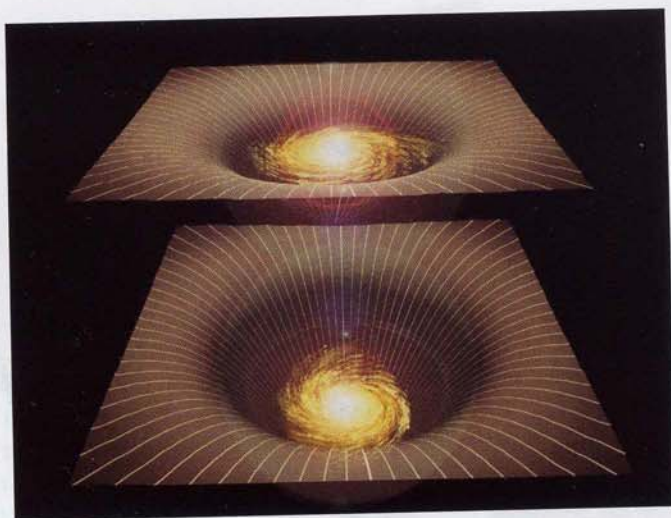




Рис. 7.1

М-теория похожа на пазл. Нетрудно найти и сложить фрагменты, прилегающие к краям, но мы толком не представляем, что происходит в середине, где нельзя пользоваться приближениями, полагая ту или иную величину малой.



Как сложится в будущем наш поход за открытиями? Добьемся ли мы успеха в поисках полной единой теории, которая управляет Вселенной и всем, что в ней содержится? На самом деле, как говорилось в главе 2, мы, возможно, уже нашли Теорию Всего (ТВ) в лице М-теории. Она не имеет единой формулировки, по крайней мере, мы ее не знаем. Вместо нее мы открыли сеть внешне различных математических структур, которые все кажутся приближениями в разных пределах к одной и той же лежащей в основе фундаментальной теории, подобно тому как всемирное тяготение Ньютона является приближением к общей теории относительности Эйнштейна в пределе слабого гравитационного поля. М-теория похожа на пазл: проще всего найти и составить вместе фрагменты, лежащие по краям мозаики. Так и М-теорию легче развивать в пределах, в которых те или иные параметры малы. На сегодня у нас есть замечательные идеи об этих краях, но в центре пазла остается зияющая дыра, происходящее в которой остается для нас неведомым (рис. 7.1). Фактически мы не сможем сказать, что нашли Теорию Всего, пока не заполним эту дыру.

Что же находится в центре М-теории? Обнаружим ли мы там драконов (или что-то не менее странное), как на старых картах неисследованных земель? Прошлый опыт подсказывает, что каждый раз, когда наши наблюдения продвигаются в направлении меньших масштабов, мы обычно находим новые неожиданные явления. К началу XX века мы понимали функционирование природы в масштабах классической

Теория струн
типа IIBТеория
струн
типа IТеория струн
типа IIAТеория
О-гетеро-
тических
струнТеория
Е-гетеротиче-
ских струнОдиннадцатимерная
теория супергравитации



Рис. 7.2

Слева: Классический неделимый атом.

Справа: Атом с электронами, обращающимися вокруг ядра, которое состоит из протонов и нейтронов.

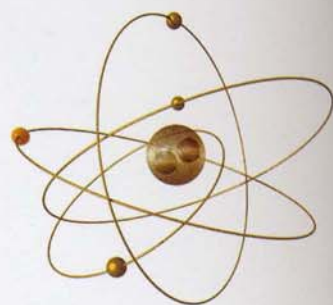


Рис. 7.3
ПРОТОН (вверху)
и НЕЙТРОН (внизу)

Протон состоит из двух u -кварков, каждый из которых несет положительный заряд величиной две трети [от заряда протона. — Перев.] и одного d -кварка с отрицательным зарядом величиной в одну треть. Нейтрон состоит из двух d -кварков, каждый из которых несет отрицательный заряд величиной в одну треть, и одного u -кварка с положительным зарядом в две трети.

физики, которая хорошо работает от межзвездных расстояний до примерно сотой доли миллиметра. Классическая физика считала материю сплошной средой с такими свойствами, как упругость и вязкость, но стали появляться свидетельства того, что вещество не сплошное, а зернистое: оно состоит из строительных блоков, называемых атомами. Слово «атом» пришло из греческого языка и означает «неделимый», но вскоре обнаружилось, что атомы состоят из электронов, которые обращаются вокруг ядер, состоящих из протонов и нейтронов (рис. 7.2).

Исследования в области атомной физики в течение первых трех десятилетий прошлого века позволили нам продвинуться в понимании строения материи до расстояний порядка миллионной доли миллиметра. Затем мы открыли, что протоны и нейтроны состоят из еще меньших частиц, называемых кварками (рис. 7.3).

Наши недавние исследования в области ядерной физики и физики высоких энергий позволили добраться до масштабов, еще в миллиард раз меньших. Может сложиться впечатление, что так будет продолжаться вечно, что мы будем открывать новые структуры все меньшего и меньшего масштаба. Но у этой последовательности есть предел, как и у вложенных друг в друга матрешек (рис. 7.4).

В конце появляется самая маленькая матрешка, которую уже нельзя раззять. В физике ее называют планковской длиной. Чтобы исследовать меньшие размеры, понадобятся частицы со столь высокой энергией, что они будут находиться внутри черных дыр. Точное значение фундаментальной планковской длины в М-теории нам неизвестно, но оно, по видимому, меньше, чем миллиметр, деленный на 100 тысяч



185

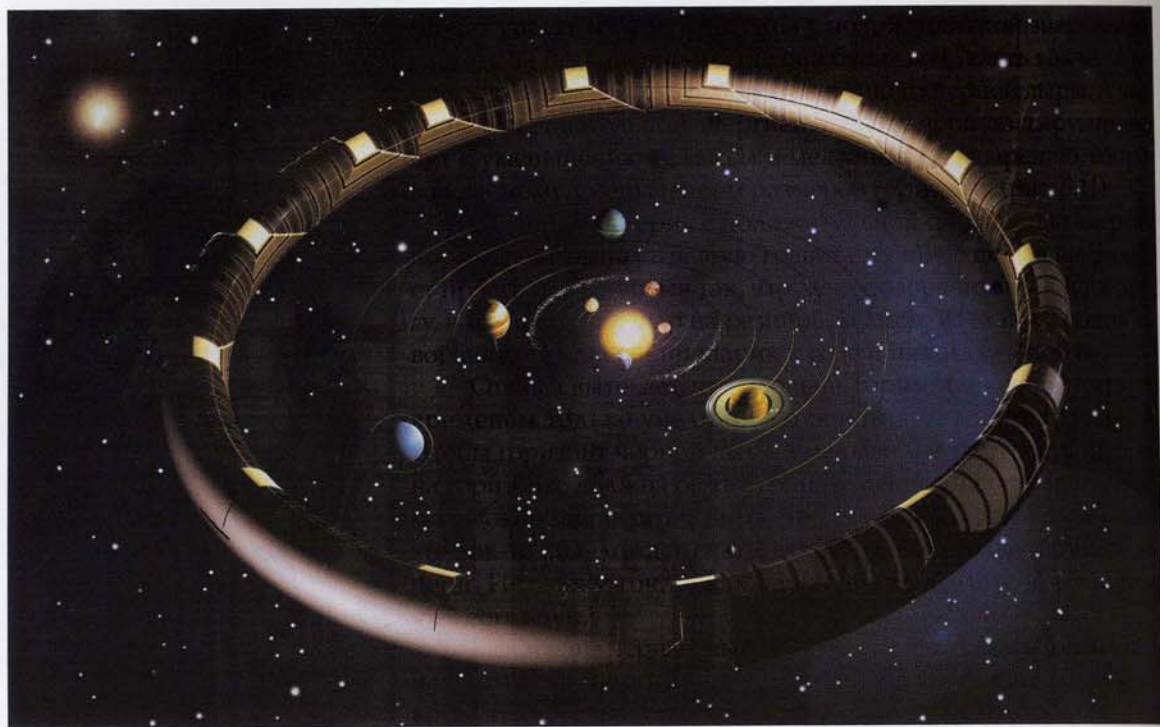


Рис. 7.5

Размер ускорителя для изучения столь малых расстояний, как планковская длина, оказался бы больше диаметра Солнечной системы.

миллиардов миллиардов миллиардов частей. Нам даже близко не подойти к созданию ускорителя, пригодного для изучения столь малых размеров. Его габариты превосходили бы Солнечную систему, и при нынешнем финансовом климате его сооружение вряд ли одобрят (рис. 7.5).

И все же есть одна поразительная новая разработка, с помощью которой открыть по крайней мере некоторых драконов М-теории можно гораздо проще (и дешевле). Как говорилось в главах 2 и 3, в сети математических моделей М-теории пространство-время имеет 10 или 11 измерений. До недавнего времени считалось, что 6 или 7 лишних измерений должны быть свернуты до очень малых размеров. Это можно уподобить человеческому волосу (рис. 7.6).

Разглядывая волос под лупой, вы заметите, что у него есть толщина, однако для невооруженного глаза он выглядит как линия, имеющая длину, но никаких других измерений. Подобным образом может обстоять дело с пространством-временем: в человеческих, атомных и даже ядерных масштабах оно может выглядеть четырехмерным и почти плоским. Но если мы прозондируем его на очень коротких расстояниях с помощью



Если зонды имеют достаточно высокую энергию, они могут выявить, что пространство-время многомерно



Рис. 7.6

Для невооруженного глаза волос выглядит линией. Его единственным измерением кажется длина. Аналогично пространство-время может выглядеть четырехмерным, но при зондировании высокоэнергетическими частицами оказаться 10- или 11-мерным.

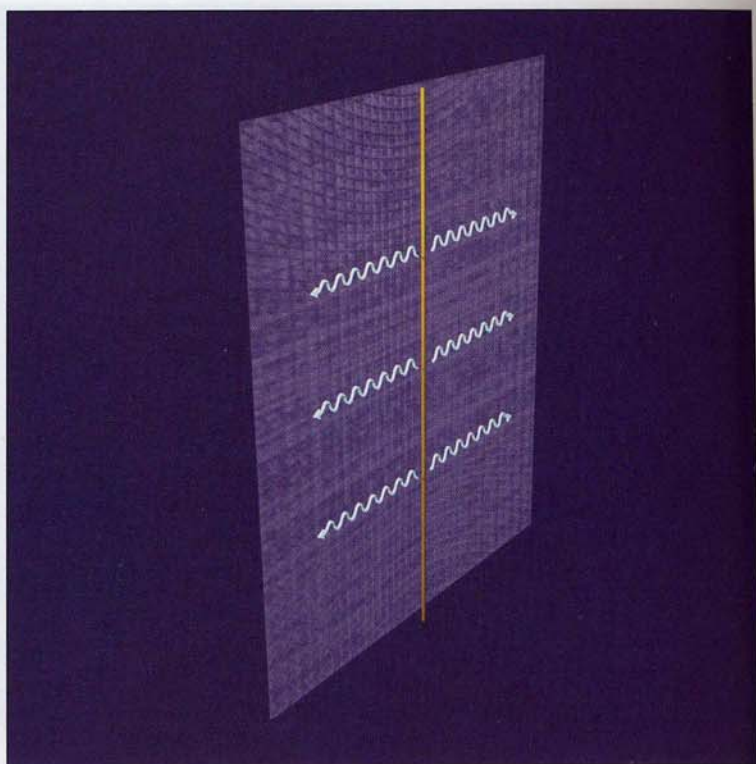
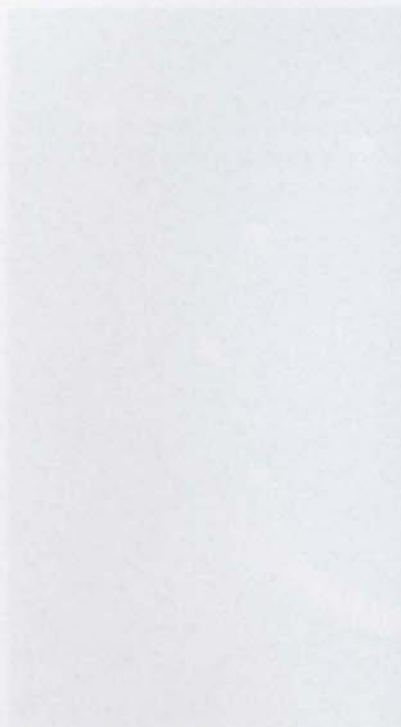


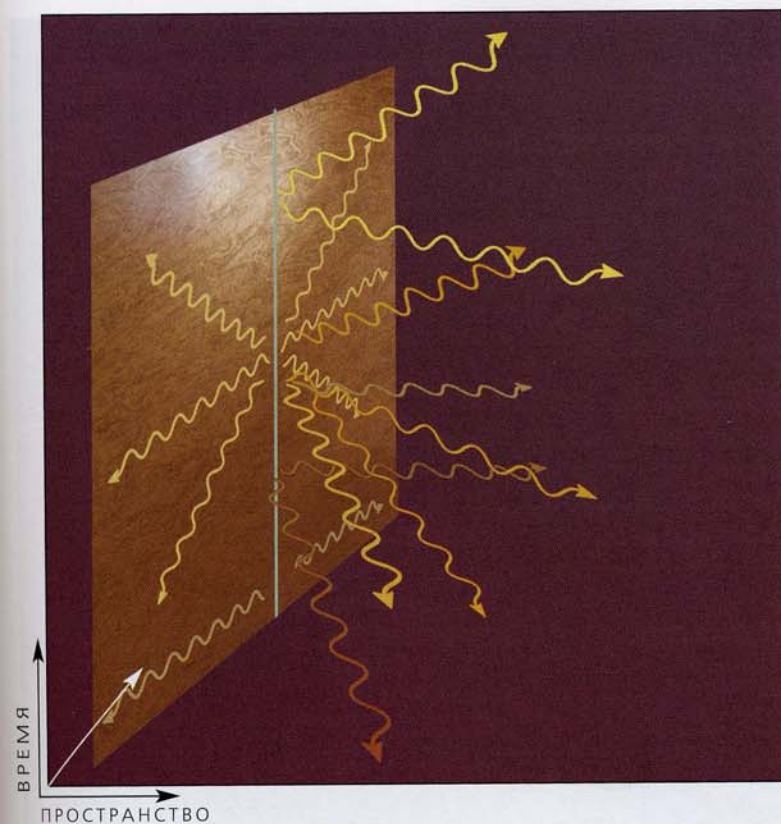
Рис. 7.7
МИРЫ НА БРАНЕ

Электрическое взаимодействие должно быть привязано к бране и ослабевать со скоростью, обеспечивающей устойчивость орбит электронов вокруг атомного ядра.

частиц чрезвычайно высокой энергии, то увидим, что пространство-время 10- или 11-мерно.

Если все дополнительные измерения очень малы, их будет крайне трудно наблюдать. Однако недавно появилось предположение, что одно или несколько дополнительных измерений могут оказаться относительно большими или даже бесконечными. Эта идея имеет важное преимущество (по крайней мере, для таких позитивистов, как я), поскольку она допускает проверку на следующем поколении ускорителей элементарных частиц или путем высокоточных измерений гравитационных сил на коротких расстояниях. Такие наблюдения могут либо фальсифицировать теорию, либо экспериментально подтвердить наличие других измерений.

Большие дополнительные измерения — это захватывающая новая область исследований в наших поисках окончательной модели или теории. Они могли бы указать, что мы живем в 4-бранном мире — на четырехмерной поверхности или бране в пространстве-времени большей размерности.



Материя и негравитационные, например электрические, силы могут быть привязаны к бране. То есть все, что не имеет отношения к гравитации, происходит так же, как в четырех измерениях. В частности, сила электрического взаимодействия между ядром атома и обращающимися вокруг него электронами будет уменьшаться с расстоянием как раз с такой скоростью, чтобы электроны не падали на ядро и атомы были устойчивыми (рис. 7.7).

Не будет противоречий и с антропным принципом, гласящим, что Вселенная должна быть пригодна для разумной жизни: если бы атомы были нестабильны, мы не могли бы наблюдать Вселенную и интересоваться, почему она четырехмерна.

С другой стороны, гравитация в форме искривленного пространства может пронизывать все многомерное пространство-время. Это означало бы, что гравитация ведет себя иначе, чем остальные известные нам силы: распространяясь на дополнительные измерения, она должна ослабевать быстрее, чем мы ожидаем (рис. 7.8).

Рис. 7.8

Гравитация может распространяться в дополнительные измерения, так же как и вдоль браны, и в таком случае должна ослабевать с расстоянием быстрее, чем в четырех измерениях.

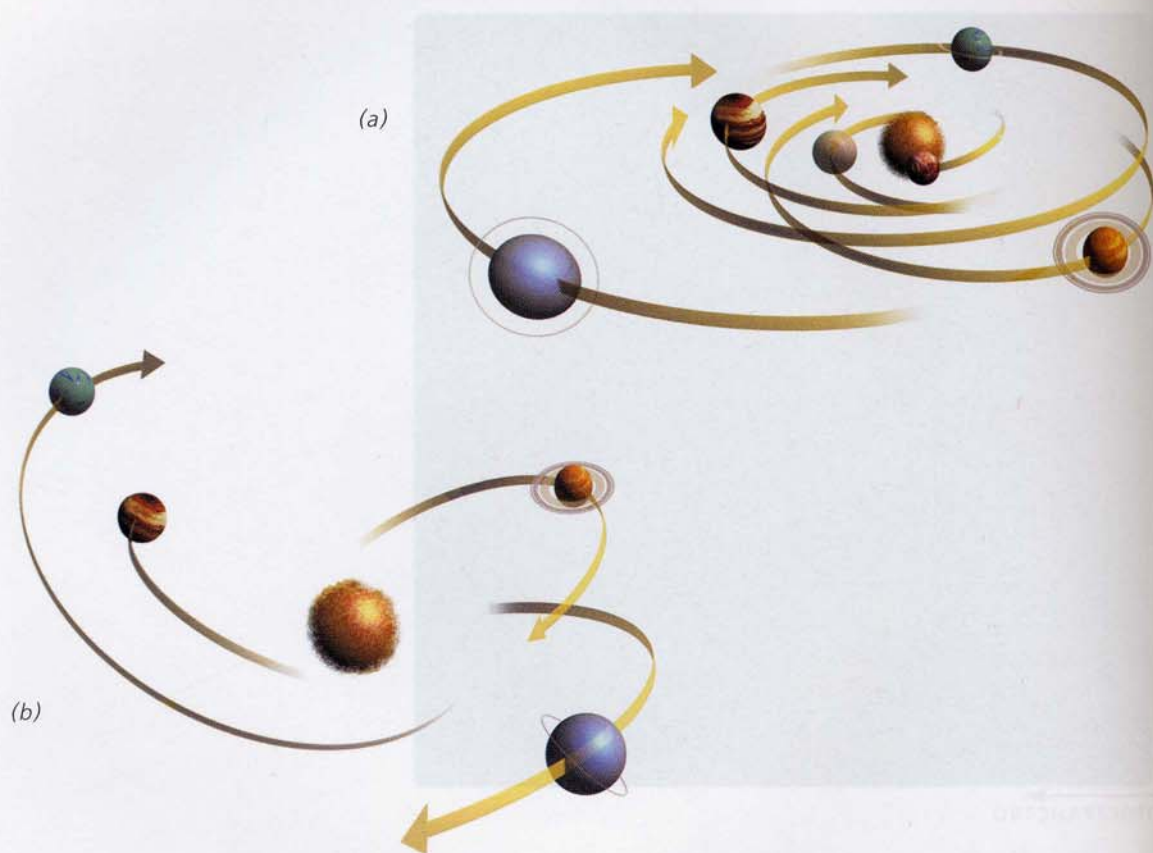


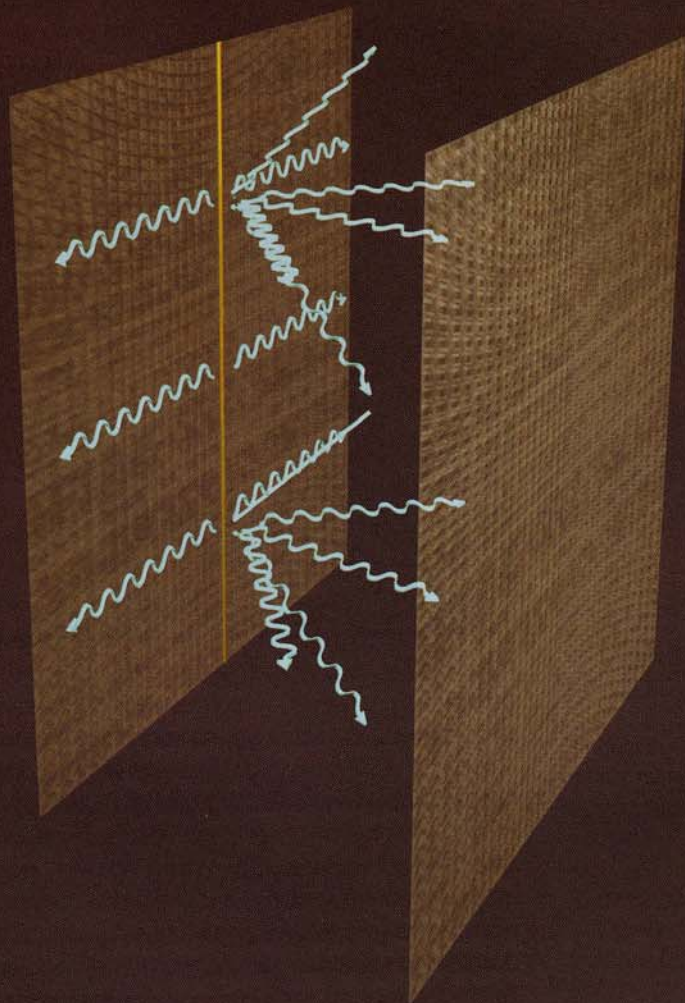
Рис. 7.9

Более быстрое ослабление силы гравитации на больших расстояниях сделало бы орбиты планет нестабильными. Планеты либо упали бы на Солнце (а), либо вырвались из пут его притяжения (б).

Если бы это более быстрое падение силы тяготения продолжалось на астрономических расстояниях, то мы могли бы заметить его проявление на орбитах далеких планет. Фактически, как отмечалось в главе 3, они оказались бы нестабильными: планеты либо падали бы на Солнце, либо улетали в темное и холодное межзвездное пространство (рис. 7.9).

Однако этого не происходит, если дополнительные размерности заканчиваются на другой бране, не слишком далеко от той, на которой живем мы. Тогда на расстояниях, превышающих то, которое разделяет браны, гравитация не сможет свободно распространяться, а окажется фактически привязана к бране, подобно электрическому взаимодействию, и в масштабах планетных орбит будет спадать с правильной скоростью (рис. 7.10).

С другой стороны, на расстояниях, меньших, чем расстояния между бранами, гравитация будет изменяться быстрее. Крайне малые гравитационные силы между тяжелыми пред-



Дополнительные измерения

Рис. 7.10

Вторая брана вблизи нашей могла бы препятствовать распространению гравитации далеко в дополнительные измерения, а значит, на расстояниях, превышающих интервал между бранами, гравитация ослабевала бы с такой же скоростью, как и в четырех измерениях.

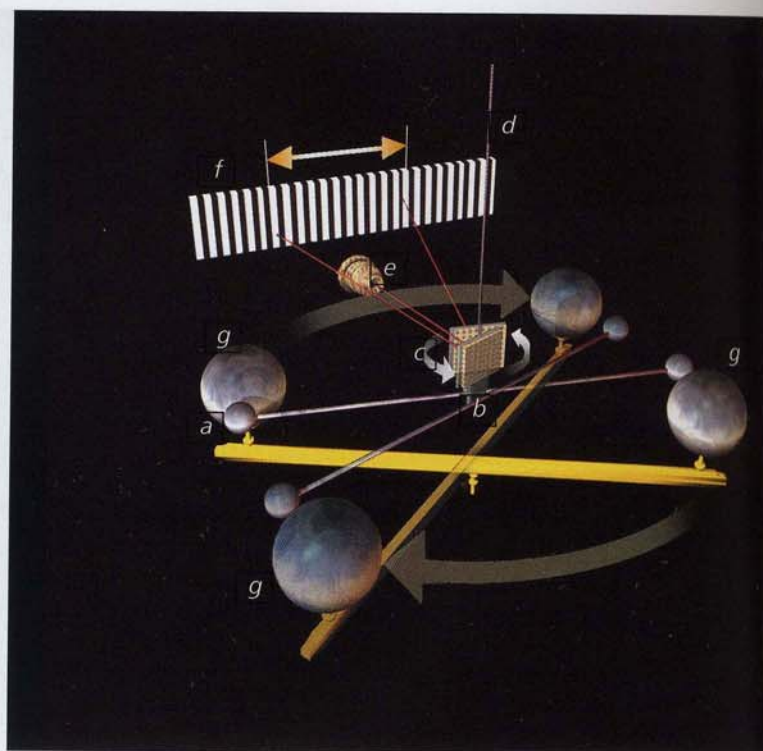


Рис. 7.11
ЭКСПЕРИМЕНТ КАВЕНДИША

Лазерный луч e реагирует на любой поворот коромысла, смещаясь по специально откалиброванному экрану f . Две небольшие свинцовые сферы a , насаженные на коромысло b с маленьким зеркалом c , свободно подвешены на скручиваемом волокне.

Две большие свинцовые сферы g помещены рядом с небольшими (a) на крутящейся перекладине. Когда большие свинцовые сферы поворачивают в новое положение, коромысло начинает колебаться и постепенно занимает новое положение.

ментами тщательно измерялись в лаборатории, но эксперименты пока не обнаруживают проявления бран, разделенных более чем несколькими миллиметрами. Сейчас проводятся новые измерения на еще более коротких расстояниях (рис. 7.11).

Если в таком мире бран мы жили бы на одной бране, то рядом имели бы другую — «теневую». Поскольку свет привязан к бранам и не может распространяться в пространстве между ними, видеть теневой мир мы бы не могли, однако чувствовали бы гравитационное воздействие материи с теневой браны. На нашей бране такие гравитационные силы казались бы вызванными чем-то поистине «темным», чье присутствие можно заметить только по его тяготению (рис. 7.12). На самом деле для того, чтобы объяснить скорость обращения звезд вокруг центра нашей галактики, по-видимому, надо считать, что там находится большая масса, чем та, которую можно связать с наблюдаемым там веществом.

Недостающая масса может быть связана с какими-то экзотическими для нашего мира видами частиц, например это могут быть WIMP (weakly interacting massive particles — слабо

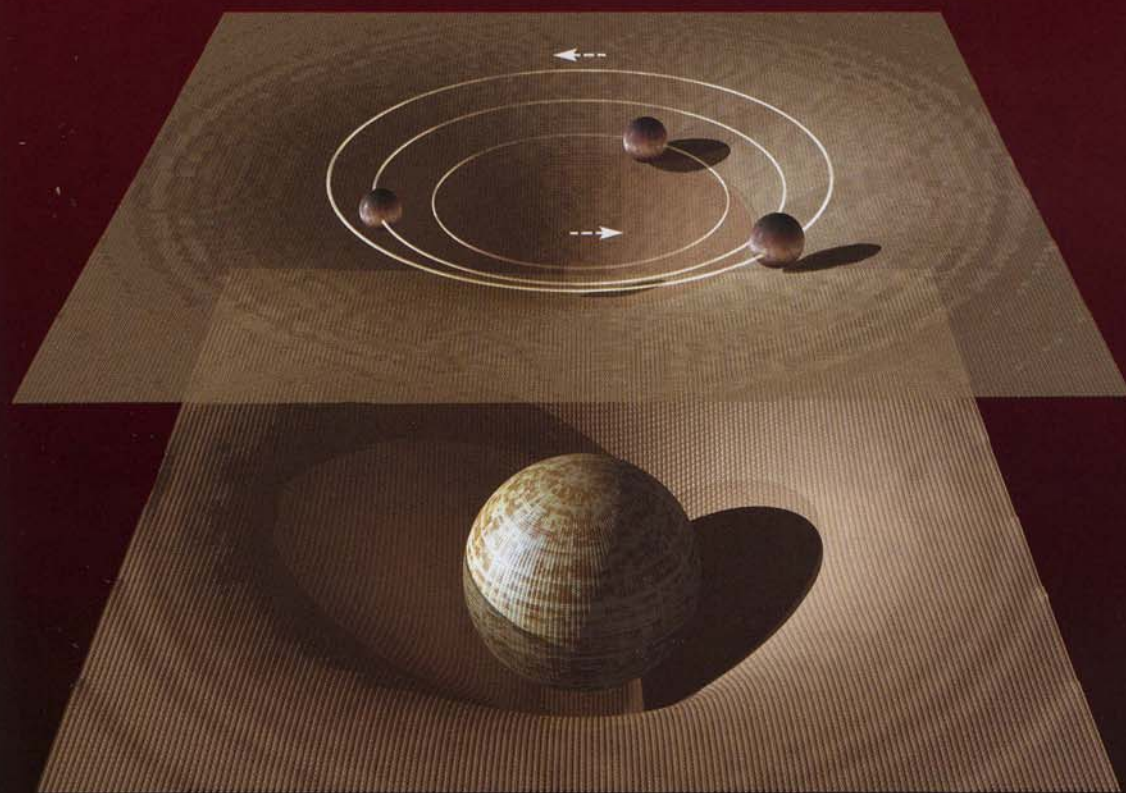
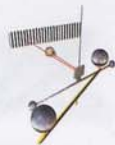
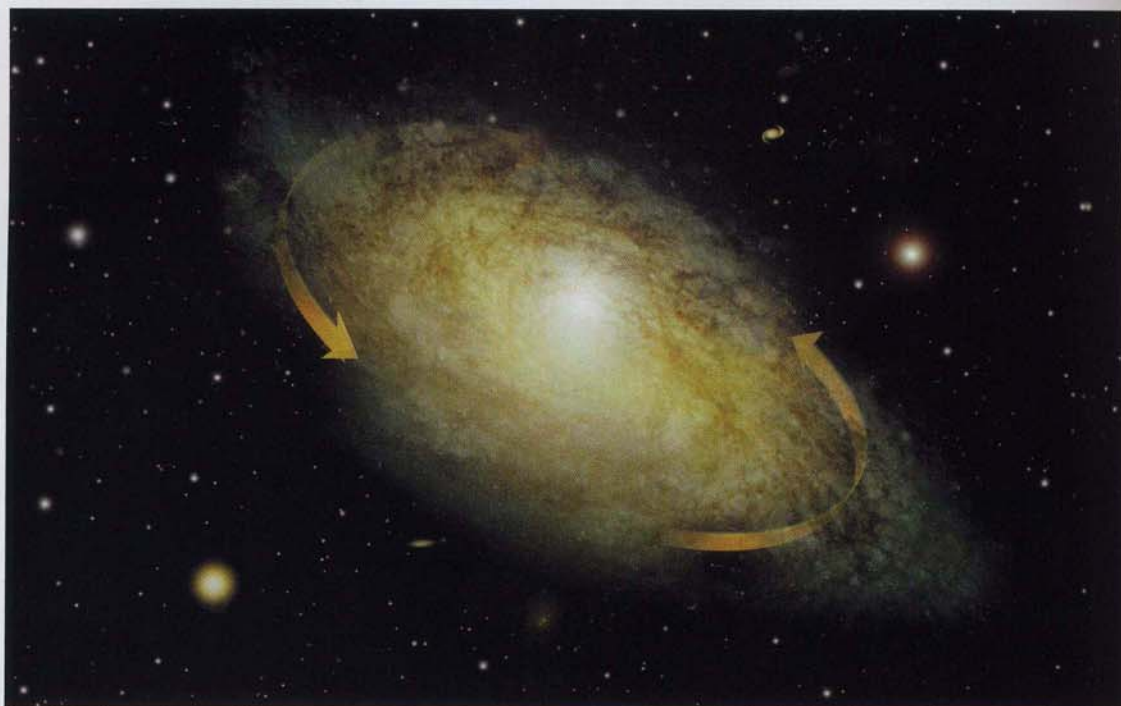


Рис. 7.12

В концепции мира на бране планеты могут обращаться вокруг скрытой массы, расположенной на теневой бране, поскольку гравитационное взаимодействие проникает в дополнительные измерения.



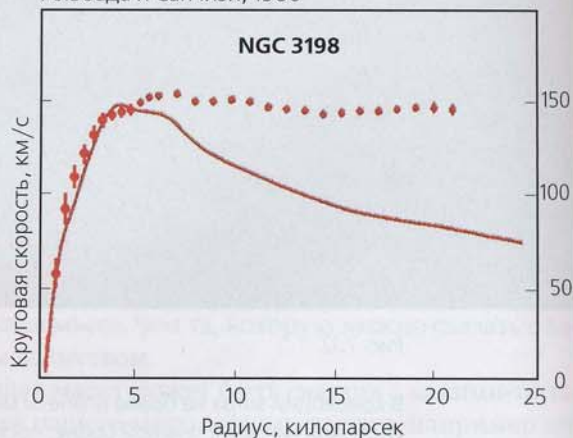
СВИДЕТЕЛЬСТВО В ПОЛЬЗУ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Различные космологические наблюдения дают сильные аргументы в пользу того, что в нашей и других галактиках должно быть намного больше вещества, чем мы видим. Самое убедительное из этих наблюдений — то, что звезды на краях спиральных галактик, подобных нашему Млечному Пути, обращаются намного быстрее, чем если бы они удерживались на своих орбитах только гравитационным притяжением наблюдаемых нами звезд (см. с. 195).

С 1970-х гг. нам известно о существовании различий между наблюдаемыми скоростями обращения звезд во внешних областях спиральных галактик (отмечены точками на графике) и орбитальными скоростями, которые ожидаются в соответствии с законами Ньютона на основании данных о распределении видимых в галактике звезд (сплошная кривая на графике). Это расхождение указывает, что во внешних частях спиральных галактик должно быть намного больше вещества.

КРИВАЯ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНОЙ ГАЛАКТИКИ NGC 3198

Альбада и Санчизи, 1986

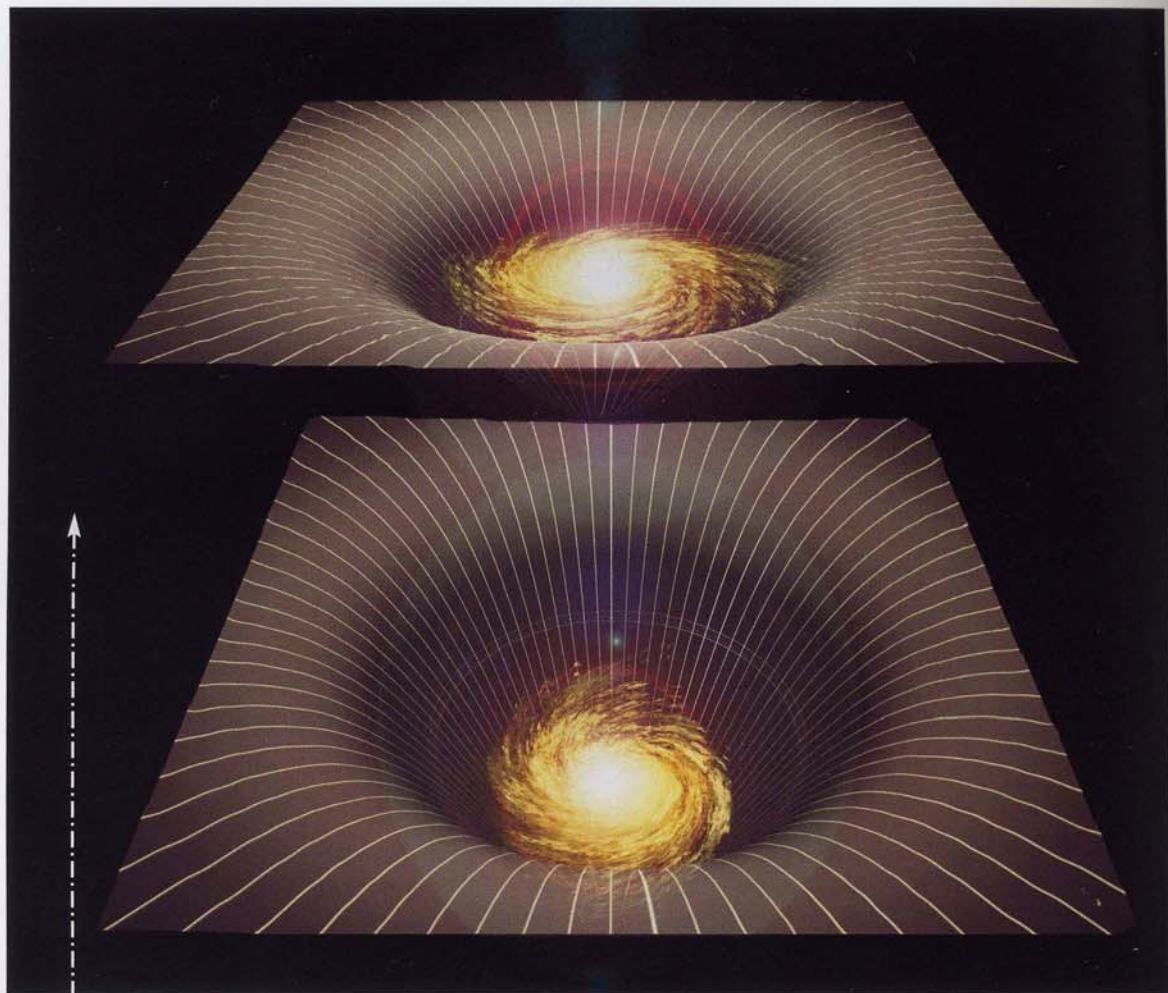




ПРИРОДА ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Современные космологи считают, что хотя центральные части спиральных галактик состоят в основном из обычных звезд, на их окраинах доминирует темная материя, которую невозможно увидеть непосредственно. Одна из фундаментальных задач — открыть природу доминирующей формы темной материи в этих внешних областях галактик. До 1980-х гг. предполагалось, что это обычное вещество, состоящее из протонов, нейтронов и электронов, но находящееся в трудно обнаружимой форме; возможно, это газовые облака или массивные компактные гало-объекты — МАСНО (massive compact halo objects), например белые карлики, нейтронные звезды или даже черные дыры.

Однако недавние исследования образования галактик склонили космологов к убеждению, что значительная часть темной материи должна отличаться от обычного вещества. Возможно, она складывается из огромного числа очень легких частиц, например аксионов или нейтрино. Она может также состоять из более экзотических слабо взаимодействующих массивных частиц WIMP (weakly interacting massive particles), существование которых предсказывают современные теории элементарных частиц, но которые еще никогда не регистрировались экспериментально.



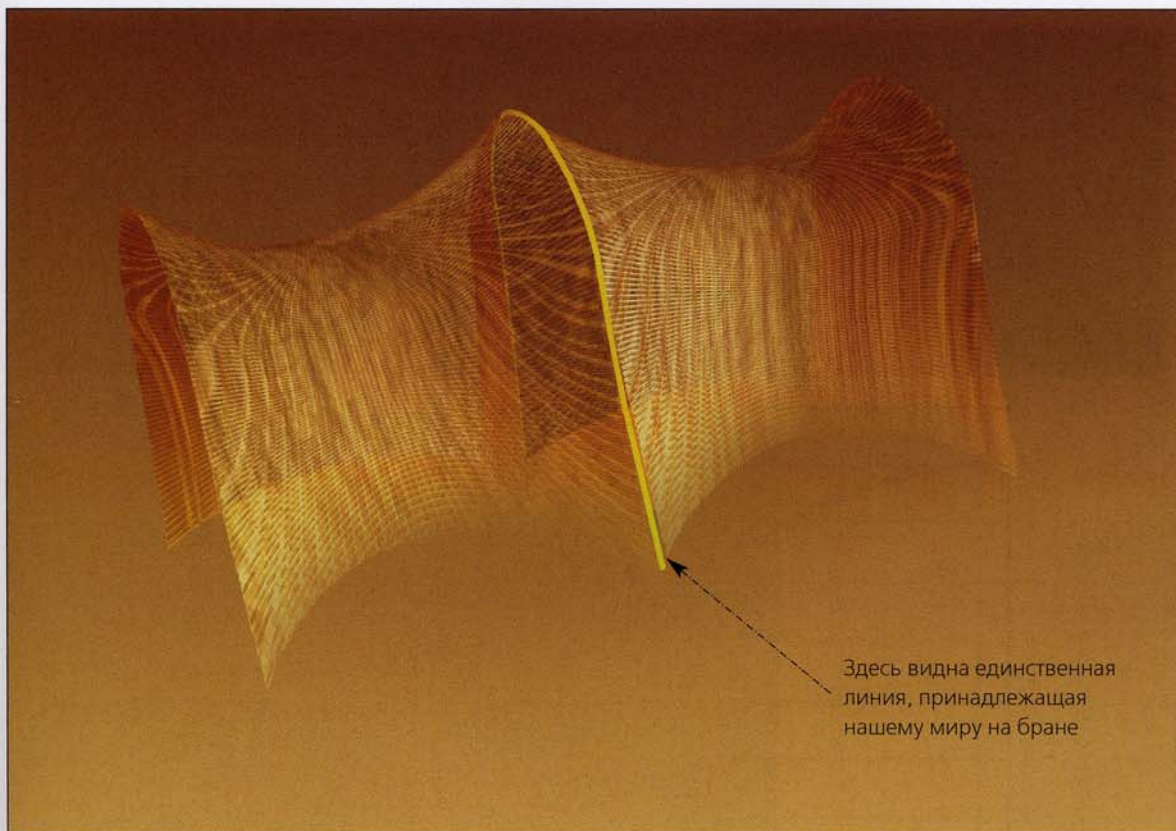
Ничейная зона в дополнительных измерениях, лежащая между бранами

Рис. 7.13

Мы не увидим теневой галактики на теневой бране, поскольку свет не проходит через дополнительные измерения. Но тяготение проходит, и потому вращение нашей Галактики должно испытывать воздействие темной материи, увидеть которую мы не можем.

взаимодействующие массивные частицы) или аксоны (очень легкие элементарные частицы). Но также возможно, что недостающая масса указывает на существование теневого мира и вещества в нем. Быть может, там есть и теневые человеческие существа, озадаченные массой, которая кажется отсутствующей в их мире, но влияет на орбиты теневых звезд вокруг центра теневой галактики (рис. 7.13).

Вместо того чтобы заканчиваться на второй бране, дополнительные измерения могут быть бесконечными, но с сильным седлообразным искривлением (рис. 7.14). Лиза Рэндалл и Раман Сандрам показали, что этот тип кривизны дает эффект,



Здесь видна единственная линия, принадлежащая нашему миру на бране

очень похожий на тот, что обуславливает присутствие второй браны: гравитационное влияние объекта на бране будет ограничено небольшой окрестностью и не распространится до бесконечности в дополнительных измерениях. Как и в модели с теневой браной, на больших расстояниях гравитационное поле будет спадать как раз с той скоростью, которая нужна, чтобы объяснить планетные орбиты и лабораторные измерения, но на коротких расстояниях тяготение будет меняться значительно быстрее.

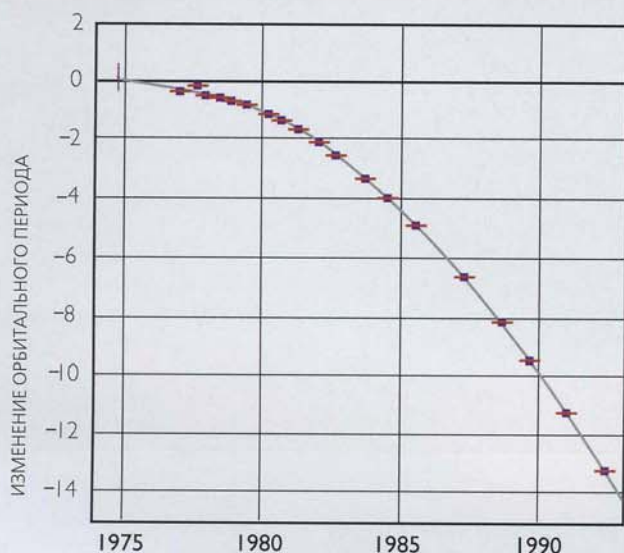
Однако между моделью Рэндалл – Сандрама и моделью теневой браны есть важное различие. Тела, которые движутся под воздействием тяготения, порождают гравитационные волны, колебания кривизны, которые распространяются по пространству-времени со скоростью света. Подобно световым электромагнитным волнам, гравитационные волны должны нести энергию, это предсказание подтвердилось наблюдениями двойного пульсара PSR1913+16.

Рис. 7.14

В модели Рэндалл – Сандрама есть только одна брана (представленная здесь лишь одним своим измерением). Дополнительные измерения тянутся до бесконечности, но искривлены как седло. Эта кривизна мешает гравитационному полю вещества на бране распространяться далеко в дополнительные измерения.



Две компактные нейтронные звезды, сближающиеся друг с другом по спиральной траектории



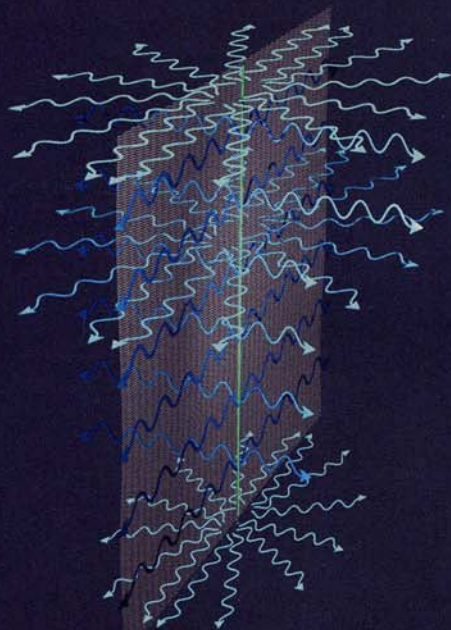
ИЗМЕНЕНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ПЕРИОДА ДВОЙНОГО ПУЛЬСАРА PSR1913+16 В 1975–1992 гг.

ДВОЙНЫЕ ПУЛЬСАРЫ

Общая теория относительности предсказывает, что массивные тела, движущиеся под воздействием тяготения, испускают гравитационные волны. Они, подобно световым волнам, уносят энергию объектов, которые их испускают. Правда, обычно потеря энергии идет крайне медленно и ее трудно заметить. Например, испускание гравитационных волн заставляет Землю медленно по спирали двигаться к Солнцу, но для того, чтобы упасть, ей понадобится 10^{27} лет.

Однако в 1975 г. Рассел Халс и Джозеф Тейлор открыли двойной пульсар PSR1913+16, систему из двух компактных нейтронных звезд, которые при обра-

нии удаляются друг от друга не больше чем на один радиус Солнца. Согласно общей теории относительности быстрое движение означает, что орбитальный период этой системы должен сокращаться в гораздо меньшем масштабе времени благодаря испусканию сильного гравитационно-волнового сигнала. Предсказания общей теории относительности получили великоплетное подтверждение в наблюдениях Халса и Тейлора. Они измерили, что с 1975 г. период обращения сократился более чем на 10 с. В 1993 г. им была присуждена Нобелевская премия за это подтверждение общей теории относительности.



Если мы действительно живем на бране в пространстве с дополнительными измерениями, гравитационные волны, возникающие при движении тел на бране, должны уходить в другие измерения. Если есть вторая, теневая, брана, гравитационные волны будут отражаться назад и оставаться между двумя бранами. С другой стороны, при наличии только одной браны и уходящих на бесконечность измерений, как в модели Рэндалл – Сандрама, гравитационные волны могут исчезать и уносить энергию из мира на нашей бране (рис. 7.15).

Это, похоже, должно противоречить одному из фундаментальных физических принципов — закону сохранения энергии, гласящему, что общее количество энергии остается неизменным. Но подобные процессы будут казаться нарушением лишь потому, что видимые нам явления ограничены

Рис. 7.15

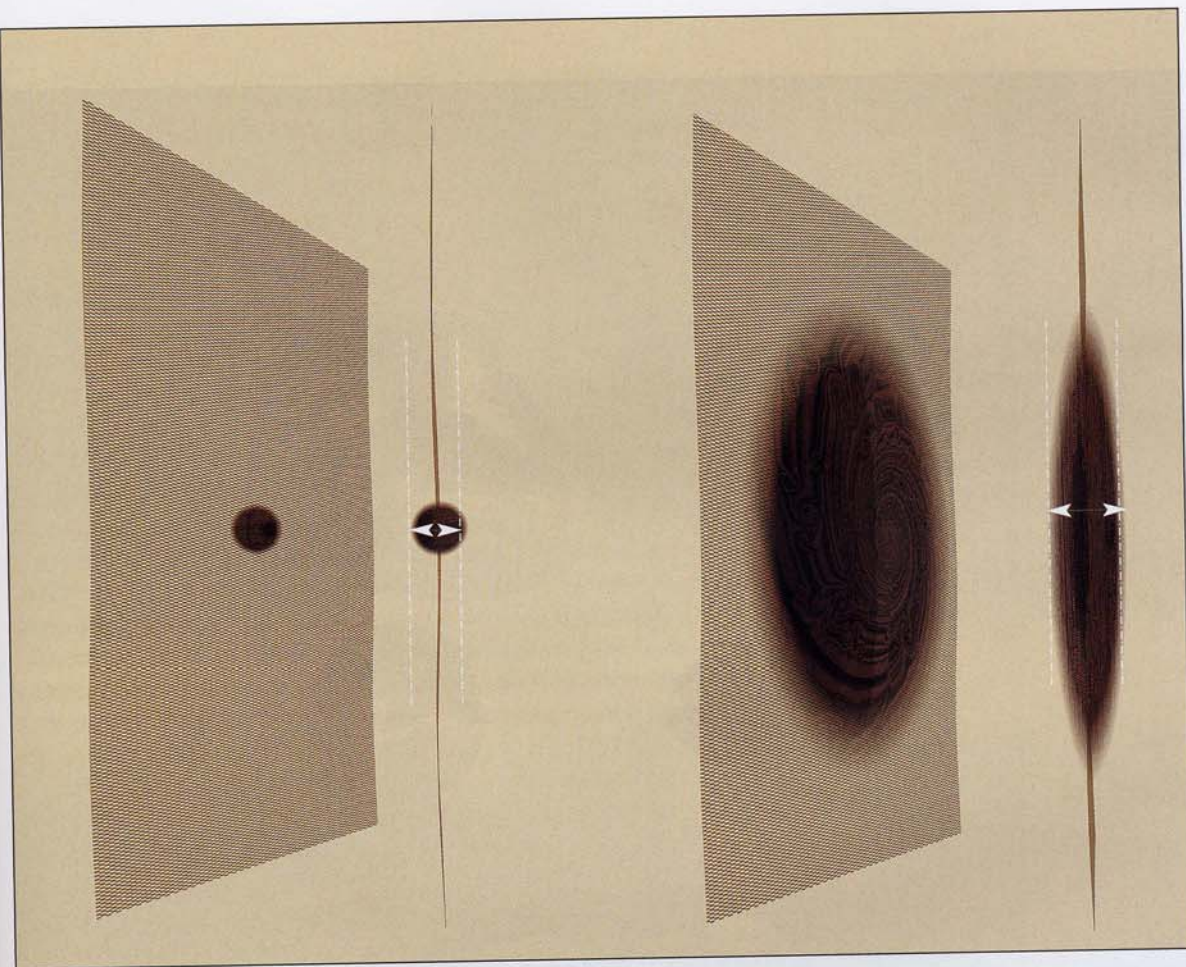
В модели Рэндалл – Сандрама короткие гравитационные волны могут уносить энергию от источников на бране, вызывая кажущееся нарушение закона сохранения энергии.

браной. Ангел, способный видеть дополнительные измерения, знал бы, что энергия остается неизменной и просто растекается в стороны.

Гравитационные волны, порождаемые двумя звездами, которые обращаются одна вокруг другой, имеют длину волны много больше радиуса седловидной кривизны дополнительных измерений. Это означает, что такие волны будут, подобно силе тяготения, удерживаться в ближайших окрестностях браны, они не будут далеко распространяться в дополнительные измерения или уносить с браны значительное количество энергии. В то же время гравитационные волны с длиной короче масштаба искривления дополнительных измерений легко ускользнут из окрестностей браны.

Единственным источником значительного количества коротких гравитационных волн, по-видимому, являются черные дыры. Черная дыра на бране будет простирается и в дополнительные измерения. Если она маленькая, у нее будет почти круглая форма, то есть в дополнительных измерениях у нее будет такой же поперечник, как и на бране. А вот большая черная дыра на бране растянется в «черный блин», который привязан к окрестностям браны и может быть гораздо меньше в толщину (в дополнительных измерениях), чем в ширину (на бране) (рис. 7.16).

Как объяснялось в главе 4, квантовая теория утверждает, что черные дыры не совсем черные: они, как любое нагретое тело, испускают излучение и частицы всех видов, которые будут распространяться по бране, поскольку к ней привязаны вещество и негравитационные силы, такие как электричество. Однако черные дыры испускают также и гравитационные волны. Они не будут привязаны к бране и могут распространяться также и в дополнительные измерения. В случае большой блиноподобной черной дыры гравитационные волны останутся вблизи браны. Это означает, что скорость потери черной дырой энергии (а значит, и массы — по закону $E = mc^2$) должна быть такой же, какой можно ожидать в четырехмерном пространстве-времени. Черная дыра должна поэтому медленно испаряться и сокращаться в размерах, пока не станет меньше радиуса кривизны седлообразных дополнительных измерений. В этой точке испускаемые черной дырой гравитационные волны начнут свободно уходить в дополнительные измерения. Тому, кто находится на бране, будет казаться, что черная дыра (или темная звезда, как ее называл



Мичелл, — см. главу 4) испускает темное излучение, которое невозможно наблюдать непосредственно на бране, но о существовании которого говорит тот факт, что черная дыра теряет массу.

Это означает, что финальная вспышка излучения от испаряющейся черной дыры покажется менее мощной, чем она в действительности была. Вот почему, возможно, мы не наблюдаем всплесков гамма-излучения, которые можно было бы связать со смертью черных дыр, хотя есть и другое, более прозаичное объяснение: может быть, просто черных дыр с массой, достаточно малой, чтобы они успели испариться за время существования Вселенной, не слишком много.

Рис. 7.16

Черная дыра в нашем мире на бране должна иметь продолжение в дополнительных измерениях. Если черная дыра маленькая, она будет почти круглой, но большая черная дыра на бране будет в дополнительных измерениях напоминать по форме блин.



Рис. 7.17. Образование мира на бране может быть подобно образованию пузырька пара в кипящей воде.



Излучение от черных дыр в мире на бране возникает из-за квантовых флуктуаций частиц на бране и вне ее. Но браны, как и все остальное во Вселенной, сами подвержены квантовым флуктуациям. Они могут вызвать спонтанное появление и исчезновение бран. Квантовое рождение браны чем-то похоже на образование пузырька пара в кипящей воде. Жидкая вода состоит из миллиардов и миллиардов молекул H_2O , связанных между собой благодаря взаимодействию между ближайшими соседями. По мере нагревания воды молекулы движутся все быстрее и, сталкиваясь, отскакивают друг от друга. Изредка эти столкновения придают такие большие скорости группе молекул, что связи между ними разрываются и образуется крошечный пузырек пара, окруженный водой. Затем пузырек будет расти или уменьшаться случайным образом в зависимости от того, каких молекул больше: тех, что переходят из связанного жидкого состояния в пар или наоборот. Большинство маленьких пузырьков пара схлопывается, вновь возвращаясь в жидкое состояние, но есть такие, что вырастают до определенного критического размера, за которым они почти наверняка продолжат расти. Именно эти большие расширяющиеся пузыри мы видим, когда вода кипит (рис. 7.17).

Аналогично ведут себя миры на бранах. Принцип неопределенности позволяет им появляться из ничего, как пузырькам, причем брана образует поверхность пузырька, а его внутренность находится в пространстве более высокой размерности. Очень маленькие пузырьки имеют тенденцию схлопываться и возвращаться в небытие, но пузырь, который благодаря квантовым флуктуациям вырос крупнее определенного критического размера, скорее всего, продолжит расти. Люди (такие, как мы), живущие на бране, то есть на поверхности пузыря, будут думать, что Вселенная расширяется. Как будто галактики нарисовали на поверхности воздушного шара и стали его надувать. Галактики будут разбегаться, но ни одну галактику нельзя считать центром расширения. Будем надеяться, что никто не проткнет наш пузырь космической булавкой.

Согласно предположению об отсутствии границ, которое мы рассматривали в главе 3, спонтанно созданный мир на бране должен иметь историю в мнимом времени, которая похожа на скорлупу ореха — четырехмерную сферу, подобную





поверхности Земли, но с двумя дополнительными измерениями. Важное отличие состоит в том, что описанная в главе 3 ореховая скорлупка была, по сути, пустой: четырехмерная сфера не имела никаких границ, а шесть или семь других измерений, которые предсказывает М-теория, должны быть свернуты до размеров куда меньше скорлупки. Однако в новой картине мира на бране скорлупка должна быть наполнена: история в мнимом времени для браны, на которой мы живем, будет четырехмерной сферой, которая ограничивает пятимерный пузырь, а оставшиеся пять или шесть измерений свернуты до очень малых размеров (рис. 7.18).

Эта история браны в мнимом времени должна задавать ее историю в действительном времени, в котором она будет расширяться в ускоряющемся инфляционном режиме, как это было описано в главе 3. Идеально гладкая и круглая скорлупа будет самой вероятной историей пузыря в мнимом времени. Однако она соответствует бране, которая в действительном времени вечно расширяется в инфляционном режиме. На такой бране не образуются галактики и потому не сможет развиваться разумная жизнь. С другой стороны, хотя вероятность не идеально гладких и круглых историй в мнимом времени несколько меньше, зато они могут соответствовать поведению в действительном времени, при котором брана вначале проходит фазу ускоряющегося инфляционного расширения, но потом расширение начинает замедляться. Во время этого замедления могут образоваться галактики и развиваться разумная жизнь. Так что согласно описанному в главе 3 антропному принципу разумные существа, которые задаются вопросом, почему происхождение Вселенной было не идеально гладким, могут наблюдать только немного «волосатые» скорлупки.

По мере расширения браны объем пространства высокой размерности внутри нее будет увеличиваться. В конце концов образуется колоссальный пузырь, окруженный браной, на которой живем мы. Но действительно ли мы живем на бране? Согласно голографической идее, описанной в главе 2, информация о том, что происходит внутри области пространства-времени, может быть закодирована на ее границе. Так что, быть может, мы думаем, что живем в четырехмерном мире, потому что представляем собой лишь тени, отбрасываемые на брану тем, что происходит внутри пузыря. Однако, придерживаясь позитивистской точки зрения, нельзя спро-



Полая сфера

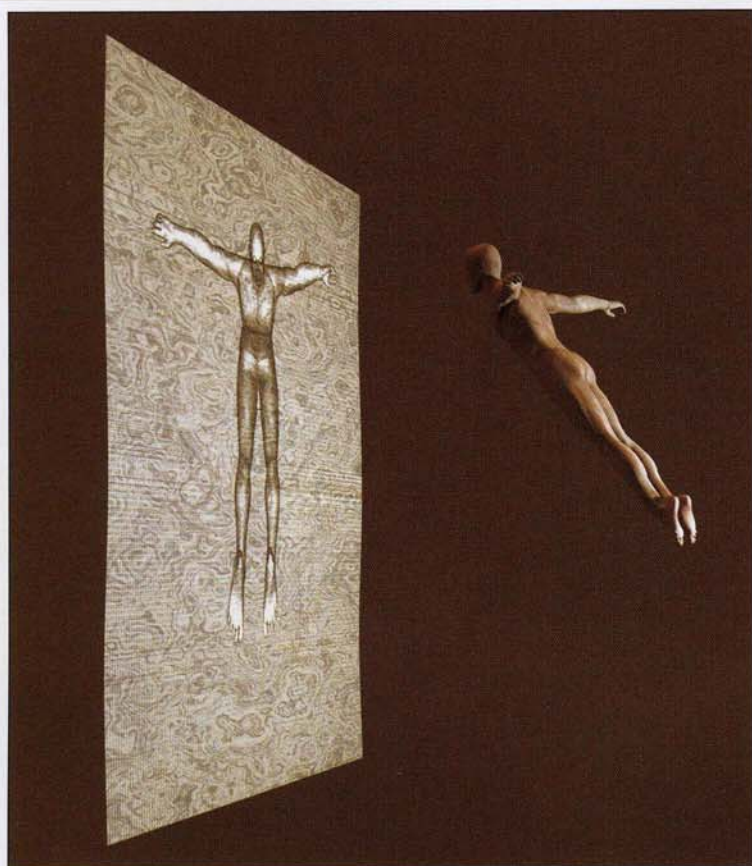


Заполненная сфера



Рис. 7.18

Картина происхождения Вселенной в случае мира на бране отличается от той, что обсуждалась в главе 3, поскольку слегка приплюснутая четырехмерная сфера — наша ореховая скорлупка — больше не является пустой, а заполнена пятым измерением.



ГОЛОГРАФИЯ

Голография сохраняет информацию об области пространства на поверхности, размерность которой на единицу меньше. И это, по-видимому, является свойством гравитации, о чем говорит тот факт, что площадь горизонта событий служит мерой числа внутренних состояний черной дыры. В модели мира на бране голография — это однозначное соответствие между состояниями нашего четырехмерного мира и состояниями более высокой размерности. С позитивистской точки зрения нельзя определить, какое из описаний является более фундаментальным.



суть: «Что есть реальность: брана или пузырь?» И то и другое — математические модели, которые описывают наблюдения. Каждый свободен использовать ту модель, которая ему наиболее удобна. Что находится снаружи браны? Тут есть несколько возможностей (рис. 7.19).

1. Снаружи может не быть ничего. Хотя пузырь пара окружен водой, это лишь аналогия, помогающая нам визуализировать происхождение Вселенной. Можно представить себе математическую модель, которая будет просто браной с многомерным пространством внутри, за пределами которой



нет абсолютно ничего, даже пустого пространства. Предсказания такой математической модели можно рассчитать без всяких ссылок на то, что снаружи.

2. Можно построить математическую модель, в которой внешняя сторона пузыря будет приклеена к внешней стороне другого пузыря. В действительности эта модель математически эквивалентна описанной выше возможности, что за пределами пузыря ничего нет, но с позиций психологии она имеет отличие: люди чувствуют себя комфортнее, находясь в центре пространства-времени, а не на его краю. Однако для позитивиста возможности 1 и 2 идентичны.

3. Пузырь может расширяться в пространство, которое не является полной копией того, что внутри пузыря. Эта возможность отличается от двух рассмотренных выше и больше похожа на случай кипящей воды. Могут образовываться и расширяться другие пузыри. Их столкновения и слияния с пузырем, на котором живем мы, чревато катастрофическими последствиями. Есть даже предположение, что сам Большой взрыв мог случиться из-за столкновения между бранами.

Подобные этим модели миров на бране — горячая тема научных исследований. Все эти построения в высшей степени гипотетические, но они предполагают новые типы эффектов, которые можно проверить наблюдениями. Они могут объяснить, почему гравитация выглядит столь слабой. В фундаментальной теории она может быть очень сильной, но растекание гравитационного взаимодействия по дополнительным измерениям будет означать его ослабление на больших расстояниях на бране, которую мы населяем.

Следствием этого будет то, что планковская длина — наименьшее расстояние, которое мы можем изучать, не создавая черных дыр, — окажется намного больше, чем соответствует слабой гравитации на нашей четырехмерной бране. Самая маленькая матрешка может оказаться не такой уж крошечной и быть в пределах досягаемости для будущих ускорителей элементарных частиц. Фактически мы могли бы уже открыть наименьшую матрешку, фундаментальную планковскую длину, если бы США из-за финансового кризиса в 1994 г. не прекратили сооружение сверхпроводящего суперколлайдера SSC (Superconducting Super Collider), который уже был наполовину построен. Сейчас строится другой такой ускоритель — Большой адронный коллайдер LHC (Large Hadron Collider) в Женеве (рис. 7.20). Эксперименты на нем и другие наблюдения,

Рис. 7.19

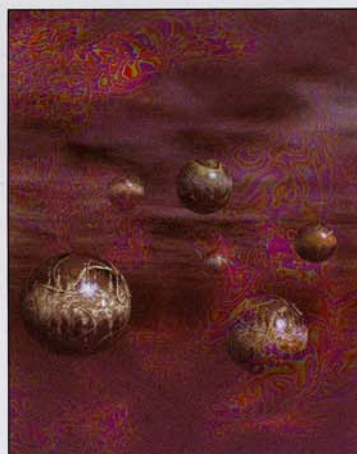


1. Брана/пузырь, внутри которой находится пространство более высокой размерности, а снаружи ничего нет

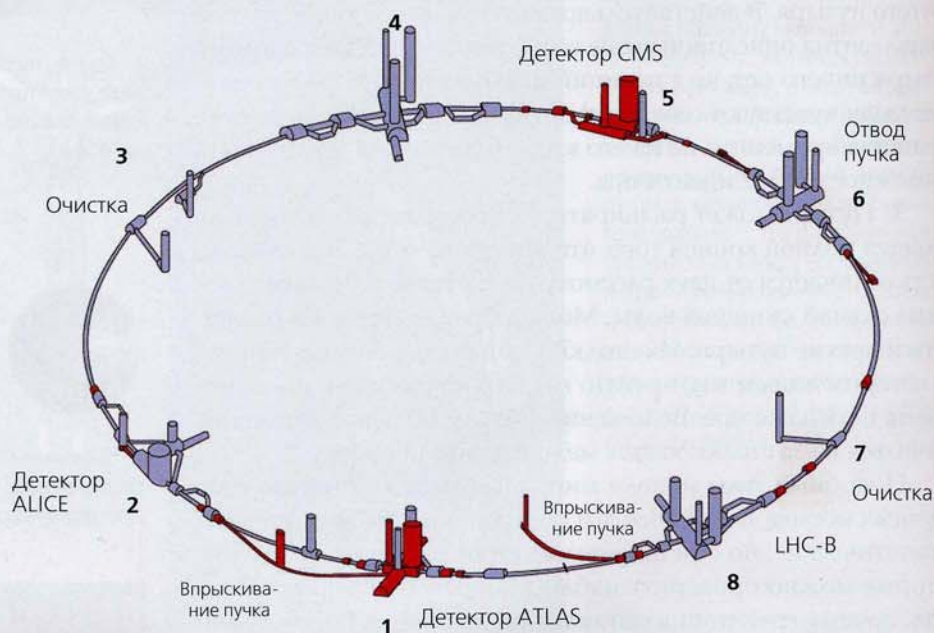
Идентичны



2. Внешняя сторона браны/пузыря склеена с внешней стороной другого пузыря



3. Брана/пузырь расширяется в пространство, которое не является зеркально подобным тому, что находится внутри. В таком сценарии могут образовываться и расширяться другие пузыри



Будущие сооружения
Существующие под-
земные сооружения



Рис. 7.20

Схема размещения в туннеле Большого электрон-позитронного коллайдера LEP существующей инфраструктуры и установок будущего Большого адронного коллайдера LHC. Женева, Швейцария.

такие как измерения фона космического микроволнового излучения, возможно, позволят определить, живем ли мы на бране или нет. Если да, то, предположительно, потому, что антропный принцип выбрал модель бран из огромного паноптикума вселенных, допускаемых М-теорией. Переиначив слова Миранды из шекспировской «Бури», воскликнем:

О дивный браны мир, где существа
Такие обитают!

Это и есть мир в ореховой скорлупке.



ГЛОССАРИЙ

Абсолютное время

Представление о том, что могут быть универсальные часы. Эйнштейновская теория относительности показала, что таких часов быть не может.

Абсолютный ноль

Наименьшая возможная температура, при которой вещество не обладает тепловой энергией; составляет около -273 градусов по шкале Цельсия или 0 по шкале Кельвина.

Амплитуда

Для волны: максимальная высота пика или максимальная глубина впадины.

Античастица

Каждому типу частиц материи соответствуют свои античастицы. Когда частица сталкивается с античастицей, они аннигилируют и остается только энергия.

Антропный принцип

Представление, согласно которому мы видим Вселенную такой, какова она есть, потому что, если бы она была другой, нас бы здесь не было и мы не могли бы ее увидеть.

Атом

Основная единица обычного вещества, состоящая из крошечного ядра (сложенного из протонов и нейтронов), вокруг которого обращаются электроны.

Бесконечность

Неограниченная или безграничная протяженность или число.

Бозон

Частица (или форма колебаний струны), спин которой выражается целым числом.

Большое сжатие

Один из возможных сценариев конца Вселенной, в котором все пространство и материя коллапсируют в сингулярность.

Большой взрыв

Сингулярность в самом начале эволюции Вселенной, около 15 млрд лет назад.

Брана

Фундаментальный элемент М-теории, объект, который может обладать различными пространственными размерностями. В общем случае p -брана имеет протяженность в p направлениях: 1-брана — это струна, 2-брана — поверхность или мембрана и т. д.

Вес

Сила, действующая на тело со стороны гравитационного поля. Вес пропорционален массе, но это не одно и то же.

Виртуальная частица

В квантовой механике: частица, которую никогда нельзя непосредственно зарегистрировать, но чье существование порождает измеримый эффект. См. также эффект Казимира.

Волновая функция

Фундаментальное понятие квантовой механики; числа, заданные в каждой точке пространства и определяющие вероятность того, что данная частица будет обнаружена в данной точке.

Второе начало термодинамики

Закон, утверждающий, что энтропия всегда возрастает и никогда не убывает.

Гипотеза защиты хронологии

Представление о том, что законы физики в совокупности не допускают путешествия во времени для макроскопических объектов.

Голая сингулярность

Сингулярность пространства-времени, не окруженная черной дырой (горизонтом событий) и видимая удаленному наблюдателю.

Голографическая теория

Представление о том, что квантовые состояния системы в области пространства-времени могут быть закодированы на границе области.

Голубое смещение

Сокращение длины волны излучения, испускаемого объектом, который движется в сторону наблюдателя, вызванное эффектом Доплера. См. также Красное смещение, Эффект Доплера.

Горизонт событий

Край черной дыры; граница области, из-под которой невозможно вырваться на бесконечность.

Гравитационная волна

Волноподобное возмущение в гравитационном поле.

Гравитационное взаимодействие

Самое слабое из четырех фундаментальных взаимодействий в природе. Связывает любые объекты, обладающие массой или энергией.

Гравитационное поле

Сущность, посредством которой оказывает свое воздействие гравитация.

Граничные условия

Описывают начальное состояние физической системы или, обобщенно, состояние системы на ее границах во времени и пространстве.

Грассмановские числа

Класс некоммутативных чисел. При перемножении обычных действительных чисел результат не зависит от того, в каком порядке их перемножают: $A \times B = C$ и $B \times A = C$. Грассмановские же числа антикоммутативны, поэтому для них $A \times B$ — это то же самое, что $-B \times A$.

Длина волны

Расстояние между двумя соседними впадинами или двумя соседними гребнями волны.

ДНК

Дезоксирибонуклеиновая кислота, состоящая из фосфата, сахара и четырех оснований: аденина, гуанина, тимина и цитозина. Две нити ДНК образуют двойную спираль, напоминающую винтовую лестницу. ДНК играет ключевую роль в механизме наследственности, в ней закодирована вся информация, необходимая клетке для репродукции.

Дуальность

Соответствие между внешне различными теориями, которое показывает, что они дают одинаковые физические результаты.

Единая теория

Любая теория, которая описывает все четыре взаимодействия и все виды материи в рамках единого подхода.

Закон Мура

Закон, утверждающий, что производительность компьютеров будет удваиваться каждые 18 месяцев. Это, очевидно, не может продолжаться бесконечно.

Закон сохранения энергии

Закон, утверждающий, что энергия (или эквивалентная ей масса) не может быть ни создана, ни уничтожена.

Законы движения Ньютона

Законы, описывающие движение тел на основе концепции абсолютных пространства и времени. Эти представления были поколеблены открытием специальной теории относительности Эйнштейна.

Замкнутая струна

Струна, имеющая форму петли.

Излучение

Энергия, переносимая волнами и частицами через пространство или иную среду.

Интерференционная картина

Волновой узор, который появляется при наложении двух или более волн, испускаемых из разных мест или в разные моменты времени.

Инфляция

Короткий период ускоренного расширения, во время которого очень молодая Вселенная выросла в размерах в колоссальное число раз.

Квант

Неделимая порция, которыми могут испускаться и поглощаться волны.

Квантовая гравитация

Теория, объединяющая квантовую механику и общую теорию относительности.

Квантовая механика

Физические законы, которые действуют в царстве очень малых объектов, таких как атомы, протоны и т. п., и основываются на квантовом принципе Планка и принципе неопределенности Гейзенберга.

Квантовый принцип Планка

Представление о том, что электромагнитные волны (например, свет) могут излучаться и поглощаться только дискретными порциями — квантами.

Кварк

Заряженная элементарная частица, которая участвует в сильном взаимодействии. Кварки бывают шести «ароматов»: нижний (d, down), верхний (u, up), странный (s, strange), очарованный (c, charmed), прелестный (b, beauty или bottom) и истинный (t, truth или top), каждый из которых может быть трех «цветов»: красного, зеленого и синего.

Кельвин

Градус температурной шкалы Кельвина, отсчет по которой ведется от абсолютного нуля.

Классическая теория

Теория, основанная на концепциях, которые оставались общепринятыми до появ-

ления теории относительности и квантовой механики, и предполагающая, что объекты имеют хорошо определенные положения и скорости. На очень малых размерах это неверно, что и показывает принцип неопределенности Гейзенберга.

Корпускулярно-волновой дуализм

Квантово-механическая концепция, состоящая в том, что между волнами и частицами нет различий; частицы могут вести себя как волны, и наоборот.

Космическая струна

Длинный тяжелый объект с крайне малым поперечным сечением, который мог возникнуть на ранних стадиях развития Вселенной. К настоящему времени одна струна может пересекать всю Вселенную.

Космологическая постоянная

Математический трюк, использованный Эйнштейном для наделения Вселенной склонностью к расширению, что позволяло общей теории относительности предсказывать стационарную Вселенную.

Космология

Наука, изучающая Вселенную как целое.

Красное смещение

Увеличение длины волны излучения, испускаемого объектом, который удаляется от наблюдателя, вызванное эффектом Доплера. См. также Голубое смещение, Эффект Доплера.

Кротовая нора

Тонкая трубка пространства-времени, соединяющая отдаленные районы Вселенной. Может также связывать параллельные или дочерние вселенные, делая возможными путешествия во времени.

Лоренцевское сжатие

Сокращение движущихся предметов вдоль направления их движения, предсказываемое специальной теорией относительности.

Магнитное поле

Поле, отвечающее за магнитное взаимодействие.

Макроскопический

Достаточно большой, чтобы быть видимым невооруженным глазом; обычно так говорят о размерах примерно до 0,01 мм. Меньшие масштабы называют *микроскопическими*.

Максвелловское поле

Синтез электричества, магнетизма и света в виде динамических полей, которые могут колебаться и двигаться сквозь пространство.

Масса

Количество материи в теле; его инерция или сопротивление ускорению в свободном пространстве.

Микроволновое фоновое излучение

Излучение, оставшееся от светящейся горячей ранней Вселенной и испытавшее к настоящему времени такое сильное красное смещение, что из света оно превратилось в микроволны (радиоизлучение с длиной волны несколько сантиметров).

Мир на бране

Четырехмерная поверхность или брана в пространстве-времени большей размерности.

Мнимое время

Время, измеряемое с помощью мнимых чисел.

Мнимые числа

Абстрактная математическая конструкция. Действительные и мнимые числа можно представлять себе как метки точек на плоскости, так что мнимые числа располагаются под прямым углом к обычным действительным числам.

Модель Рэндалл – Сандрама

Теория, согласно которой мы живем на бране в бесконечном пятимерном пространстве с отрицательной седлообразной кривизной.

Наблюдатель

Человек или набор инструментов для измерения физических свойств системы.

Научный детерминизм

Предложенное Лапласом представление о Вселенной как о часовом механизме, полное знание о текущем состоянии которого

позволяет в точности предсказать его прошлые и будущие состояния.

Начальные условия

Состояние физической системы в начальный момент времени.

Нейтрино

Незаряженная элементарная частица, участвующая только в слабых взаимодействиях.

Нейтрон

Незаряженная элементарная частица, очень похожая на протон. Нейтроны составляют около половины частиц в атомных ядрах. Состоит из трех кварков (двух d-кварков и одного u-кварка).

Общая теория относительности

Теория Эйнштейна, основанная на идее о том, что законы природы должны быть одинаковыми для всех наблюдателей, независимо от того, как те движутся. Объясняет силу тяготения в терминах искривления четырехмерного пространства-времени.

Основное состояние

Состояние системы с минимальной энергией.

Отсутствие граничных условий

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

Первичная черная дыра

Черная дыра, возникшая в ранней Вселенной.

Петля времени

Другое название замкнутой времениподобной кривой.

Планковская длина

Около 10^{-35} сантиметра. Размер типичной струны в теории струн.

Планковское время

Время, за которое свет проходит расстояние, равное планковской длине. Около 10^{-43} секунды.

Позитивистский подход

Представление о том, что научная теория — это математическая модель, которая

описывает и систематизирует выполняемые нами наблюдения.

Позитрон

Положительно заряженная античастица электрона.

Поле

Сущность, распределенная в пространстве и времени, в противоположность частице, которая существует только в одной точке в каждый момент времени.

Постоянная Планка

Ключевой элемент принципа неопределенности: произведение неопределенностей положения и скорости частицы должно быть больше постоянной Планка. Обозначается символом $\hbar$.

Принцип запрета (Паули)

Утверждение о том, что две одинаковые частицы со спином $1/2$ не могут иметь одновременно одинаковые (в пределах, наложенных принципом неопределенности) положение и скорость.

Принцип неопределенности

Сформулированный Гейзенбергом принцип, согласно которому невозможно одновременно точно знать и положение, и скорость частицы. Чем точнее известно одно, тем менее точно можно знать другое.

Пространственное измерение

Любое из трех пространственноподобных измерений пространства-времени.

Пространство-время

Четырехмерное пространство, точки которого являются событиями.

Протон

Положительно заряженная элементарная частица, очень похожая на нейтрон. Протоны составляют около половины всех частиц в атомных ядрах. Состоит из трех кварков (двух u -кварков и одного d -кварка).

Радиоактивность

Спонтанный распад атомного ядра, превращающий его в ядро другого типа.

Растяжение времени

Следствие теории относительности, предсказывающее, что течение времени замедляется для наблюдателя, находящегося

в движении или под воздействием сильного гравитационного поля.

Свернутое измерение

Пространственное измерение, которое свернуто до таких малых размеров, что его не удается обнаружить.

Световая секунда

Расстояние, проходимое светом за одну секунду.

Световой год

Расстояние, проходимое светом за один год.

Световой конус

Поверхность в пространстве-времени, которая отмечает возможные направления световых лучей, проходящих через определенное событие.

Свободное пространство

Участок пустого пространства, полностью свободного от полей, то есть не подвергающегося воздействию каких-либо сил.

Силовое поле

Сущность, посредством которой оказывает свое воздействие сила (взаимодействие).

Сильное взаимодействие

Взаимодействие, удерживающее вместе кварки в протонах и нейтронах, а сами эти частицы — в атомных ядрах. Самое сильное из четырех фундаментальных взаимодействий с самым коротким радиусом действия.

Сингулярность

Точка в пространстве-времени, в которой его кривизна становится бесконечной.

Скорость

Физическая величина, описывающее быстроту и направление движения объекта.

Слабое взаимодействие

Взаимодействие, влияющее на все материальные частицы, кроме частиц — переносчиков взаимодействий. Второе по силе из четырех фундаментальных взаимодействий с очень коротким радиусом действия.

Событие

Точка в пространстве-времени, заданная местом и временем.

Солнечное затмение

Период темноты, длящийся обычно несколько минут, который наступает, когда

Луна проходит между Землей и Солнцем. В 1919 г. наблюдения затмения в Западной Африке подтвердили правильность общей теории относительности.

Спектр

Частотные компоненты, из которых складывается волна. Видимую часть солнечного спектра можно наблюдать в радуге.

Специальная теория относительности

Теория Эйнштейна, основанная на представлении о том, что в отсутствие гравитационных полей законы природы должны быть одинаковыми для всех наблюдателей независимо от того, как они движутся.

Спин

Внутреннее свойство элементарных частиц, связанное с обыденным понятием вращения, но не идентичное ему.

Стандартная космологическая модель

Теория Большого взрыва с учетом следствий Стандартной модели элементарных частиц.

Стандартная модель элементарных частиц

Объединенная теория трех негравитационных взаимодействий и их воздействия на вещество.

Стационарное состояние

Состояние, которое не меняется во времени.

Струна

Фундаментальный одномерный объект в теории струн, который заменяет представление об элементарных частицах, не имеющих внутренней структуры. Различные режимы колебаний струны воспринимаются как элементарные частицы с разными свойствами.

Супергравитация

Набор теорий, объединяющих общую теорию относительности и суперсимметрию.

Суперсимметрия

Принцип, который связывает свойства частиц с различным спином.

Т*емная материя*

Материя в галактиках, их скоплениях и, возможно, между скоплениями, которая недоступна непосредственному наблюдению,

но обнаруживается по ее гравитационному полю. На долю темной материи приходится около 90 % вещества во Вселенной.

Теорема о сингулярности

Теорема, показывающая, что при определенных обстоятельствах должна существовать сингулярность, то есть точка, где не действует общая теория относительности. В частности, она показывает, что Вселенная должна брать свое начало в сингулярности.

Теория Большого объединения

Теория, которая объединяет электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия.

Теория всемирного тяготения Ньютона

Теория, согласно которой сила притяжения между двумя телами зависит от их масс и разделяющего их расстояния, а именно пропорциональна произведению масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Теория струн

Физическая теория, в которой частицы описываются как волны на струнах. Объединяет квантовую механику и общую теорию относительности. Известна также как теория суперструн.

Теория Янга – Миллса

Обобщение теории поля Максвелла, описывающее взаимодействие сильных и слабых ядерных сил.

Термодинамика

Теория, изучающая связи между энергией, работой, теплом и энтропией в динамических физических системах.

У*равнение Шрёдингера*

Уравнение, которое описывает эволюцию волновой функции в квантовой теории.

Ускорение

Темп изменения скорости объекта или направления движения объекта. См. также Скорость.

Ускоритель элементарных частиц

Установка, которая ускоряет движение заряженных частиц, увеличивая их энергию.

Ф

ермион

Частица (или форма колебаний струны), спин которой выражается полуцелым числом ($1/2$, $3/2$ и т. д.).

Фотон

Квант света; мельчайшая порция электромагнитного поля.

Фотоэлектрический эффект

Явление, заключающееся в том, что некоторые металлы под действием света испускают электроны.

Ч

астота

Для волны: число полных циклов колебания в секунду.

Черная дыра

Область пространства-времени, из которой ничто, даже свет, не может вырваться из-за очень сильной гравитации.

Э

лектрический заряд

Свойство частиц, благодаря которому они могут отталкивать (или притягивать) другие частицы, имеющие заряд того же (или противоположного) знака.

Электромагнитная волна

Волноподобное возмущение электрического поля. Все волны электромагнитного спектра — видимый свет, рентгеновские лучи, микроволны, инфракрасное излучение и т. д. — распространяются со скоростью света.

Электромагнитное взаимодействие

Сила, возникающая между частицами, которые несут электрический заряд одинакового (или противоположного) знака. Второе по силе из четырех фундаментальных взаимодействий.

Электрон

Элементарная частица с отрицательным зарядом, которая обращается вокруг ядра атома.

Элементарная частица

Частица, которую, как считается, нельзя подвергнуть дальнейшему делению.

Энергия вакуума

Энергия, присутствующая даже в пространстве, которое выглядит совершенно пустым. В отличие от массы, обладает удивительным свойством ускорять расширение Вселенной.

Энтропия

Мера беспорядка в физической системе; число различных микроскопических конфигураций системы, которые оставляют неизменным ее макроскопический вид.

Эфир

Гипотетическая нематериальная среда, которая, как когда-то считалось, заполняет все пространство. Идея, что такая среда необходима для распространения электромагнитного излучения, больше не является убедительной.

Эффект Доплера

Смещение частоты и длины звуковых или световых волн, которые регистрирует наблюдатель, когда источник излучения движется относительно него.

Эффект Казимира

Явление, состоящее в том, что между двумя плоскими параллельными металлическими пластинами, помещенными в вакууме очень близко друг от друга, возникает притяжение из-за давления, вызванного уменьшением обычного числа виртуальных частиц между пластинами

Я

дерный распад

Процесс, в ходе которого одно атомное ядро распадается на два или несколько более легких ядер, выделяя энергию.

Ядерный синтез

Процесс, в ходе которого два атомных ядра сталкиваются и сливаются, образуя более крупное и тяжелое ядро.

Ядро

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

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЧТЕНИЯ

Существует множество популярных книг — от очень хороших, как «Элегантная Вселенная» (*The Elegant Universe*), до посредственных (о них я не хочу упоминать). Поэтому я ограничил свой список работами авторов, которые внесли важный вклад в исследование темы, чтобы адресовать вас к изначальному опыту.

Я приношу свои извинения тем, кого не упомянул в силу незнакомства с их работами. Вторая часть моего списка предназначена для читателей, которые хотят познакомиться с более специальными текстами.

Einstein, Albert. *The Meaning of Relativity*, Fifth Edition. Princeton: Princeton University Press, 1966. (Пер.: Эйнштейн, А. Собр. науч. тр. — М.: Наука, 1966. — Т. 2.)

Feynman, Richard. *The Character of Physical Law*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1967. (Пер.: Фейнман, Р. Характер физических законов. — Серия «Библиотечка „Квант“». — М.: Наука, 1987.)

Greene, Brian. *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. New York: W.W. Norton & Company, 1999. (Пер.: Грин, Б. Элегантная Вселенная. — М.: Едиториал УРСС, 2004.)

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. (Пер.: Рус, М. Наша космическая обитель. — М.-Ижевск: Ин-т компьютерных исслед., 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.

Weinberg, Steven. *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*, Second Edition. New York: Basic Books, 1993. (Пер.: Вайнберг, С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. — Регулярная и хаотическая динамика, 2000.)

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. (Линде, А. Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология. — М.: Наука, 1990.)

Misner, Charles W., Kip S. Thorne, John A. Wheeler. *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1973. (Пер.: Мизнер, Ч., Торн, К., Уилер, Дж. Гравитация: В 3-х т. — М.: Мир, 1977.)

Peebles, P. J. *Principles of Physical Cosmology*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1993.

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.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ АВТОРСКИХ ПРАВ НА ИЛЛЮСТРАЦИИ

С. 11, 27: с разрешения архива California Institute of Technology. Albert Einstein™ по лицензии The Hebrew University of Jerusalem, предоставлено Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net; с. 13: AKC Photo, London, Albert Einstein™ по лицензии The Hebrew University of Jerusalem, предоставлено Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net; с. 21: с разрешения Los Alamos National Laboratory; с. 31: с разрешения Science Photo Library; с. 34: Albert Einstein™ по лицензии Hebrew University of Jerusalem, предоставлено Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net; с. 35: фото Harry Burnett / с разрешения архива California Institute of Technology. Albert Einstein™ по лицензии Hebrew University of Jerusalem, предоставлено Roger Richman Agency Inc., www.albert-einstein.net; с. 63: с разрешения Neel Shearer; с. 76: с разрешения Space Telescope Science Institute (STScI) / NASA; с. 77: Орел клюет печень прикованного Прометея. Этресская чернофигурная керамика. Vatican Museums and Galleries, Vatican City, Italy / Bridgeman Art Library; с. 78: Спиральная галактика NGC 4414 — с разрешения Hubble Heritage Team, STScI/NASA; Пересеченная спиральная галактика NGC 4314 — с разрешения University of Texas et al., STScI/NASA; эллиптическая галактика NGC 147 — с разрешения STScI/NASA; Млечный Путь — с разрешения S. J. Maddox, C. Efstathiou, W. Sutherland, J. Loveday, Department of Astrophysics, Oxford University; с. 84: с разрешения Jason Ware, galaxyphoto.com; с. 85: с разрешения Observatories of the Carnegie Institution of Washington; с. 191: фото Floyd Clark / с разрешения Archives, California Institute of Technology; с. 115: с разрешения Neel Shearer; с. 120: с разрешения NASA / Chandra X-Ray Center / Smithsonian Astrophysical Observatory / H. Marshall et al.; с. 121: с разрешения STScI/NASA; с. 124: с разрешения STScI/NASA; с. 141, 161: Copyright California Institute of Technology; с. 154: с разрешения Neel Shearer; с. 170: из книги *The Blind Watchmaker* by Richard Dawkins, New York: W. W. Norton & Company, 1986; с. 176: Hubble Deep Field с разрешения R. Williams, STScI/NASA; с. 177: "INDEPENDENCE DAY" ©1996 Twentieth Century Fox Film Corporation. Все права защищены; E.T. still: Copyright © 2001 by Universal Studios Publishing Rights, a Division of Universal Studios Licensing, Inc. Все права защищены; с. 203: с разрешения Neel Shearer.

Все не упомянутые выше оригинальные иллюстрации были созданы для этой книги Малькольмом Годвином из Moonrunner Design Ltd. (Великобритания).

Научно-популярное издание

Стивен Хокинг

МИР В ОРЕХОВОЙ СКОРУПКЕ

Ответственный редактор *Татьяна Филатова*
Художественный редактор *Егор Саламашенко*
Технический редактор *Елена Траскевич*
Корректор *Анастасия Рыко*
Верстка *Максима Залиева*

Подписано в печать 12.03.2012.
Формат издания 84×108 ¹/₁₆. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 23,10. Тираж 4500 экз.
Изд. № 12048. Заказ № 2089/12.

Издательство «Амфора».
Торгово-издательский дом «Амфора».
197110, Санкт-Петербург,
наб. Адмирала Лазарева, д. 20, литера А.
www.amphora.ru, e-mail: secret@amphora.ru

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ЗАО «ИПК Парето-Принт», г. Тверь. www.pareto-print.ru

**По вопросам поставок
обращайтесь:**

«Книжный клуб 36.6»

105082, Москва,
ул. Бакунинская, д. 71,
строение 10, этаж 8.

Тел.: (495) 926-45-44.

E-mail: club366@club366.ru

Информация в Интернете: www.club366.ru