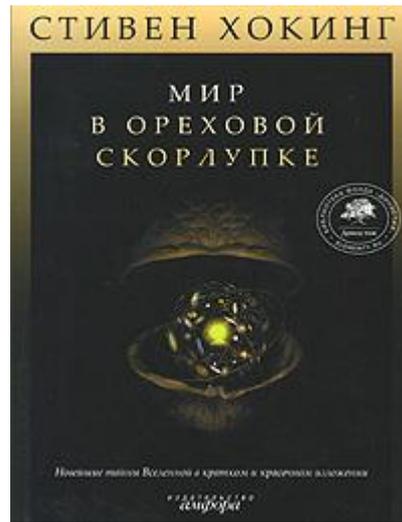


Стивен Хокинг Мир в ореховой скорлупке



«Мир в ореховой скорлупе»:
ЗАО ТИД "Амфора"; Санкт-Петербург; 2007; ISBN ISBN 978-5-367-00614-8 (рус.) ISBN 0593-
048156 (англ.)
Перевод: А. Г. Сергеев

Аннотация

Один из самых известных физиков-теоретиков нашего времени, Стивен Хокинг, возвращается с новой, блестяще иллюстрированной научно-популярной книгой о происхождении Вселенной и природе пространства и времени.

Стивен Хокинг "МИР В ОРЕХОВОЙ СКОРЛУПКЕ"

Живо и интригующе. Хокинг от природы наделен даром учить и разъяснять, с юмором иллюстрировать крайне сложные понятия аналогиями из повседневной жизни.

New York Times

Эта книга обручает детские чудеса с гениальным интеллектом. Мы путешествуем по вселенной Хокинга, перенесенные гуда силой его разума.

Sunday Times

Живо и остроумно... Позволяет широкому читателю почерпнуть глубокие научные истины из первоисточника.

New Yorker

Стивен Хокинг – мастер ясности... Трудно представить, чтобы кто-то другой из ныне живущих доходчивее изложил устрашающие профана математические выкладки.

Chicago Tribune

Наверное, лучшая научно-популярная книга Мастерское обобщение того, что современные физики по астрофизике. Спасибо, доктор Хокинг! думают о Вселенной и том, как она стала такой.

Wall Street journal



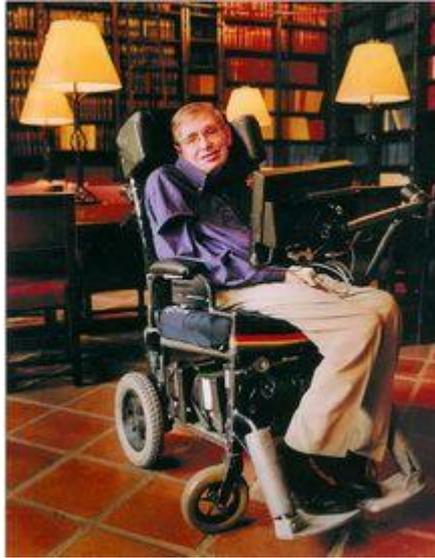
В 1988 году книга Стивена Хокинга «Краткая история времени», побившая рекорды продаж, познакомила читателей во всем мире с идеями этого замечательного физика-теоретика. И вот новое важное событие: Хокинг возвращается! Великолепно иллюстрированное продолжение – «Мир в ореховой скорлупке» – раскрывает суть научных открытий, которые были сделаны после выхода в свет его первой, широко признанной книги.

Один из самых блестящих ученых нашего времени, известный не только смелостью идей, но также ясностью и остроумием их выражения, Хокинг увлекает нас к переднему краю исследований, где правда кажется причудливее вымысла, чтобы объяснить простыми словами принципы, которые управляют Вселенной. Как и многие физики-теоретики, Хокинг жаждет отыскать Священный Грааль науки – Теорию Всего, которая лежит в основании космоса. Он позволяет нам прикоснуться к тайнам мироздания: от супергравитации до суперсимметрии, от квантовой теории до М-теории, от голографии до дуальностей. Вместе с ним мы пускаемся в увлекательные приключения, когда он рассказывает о попытках создать на основе общей теории относительности Эйнштейна и выдвинутой Ричардом Фейнманом идеи о множественности историй Полную объединенную теорию, которая опишет все, что происходит во Вселенной.

Мы сопутствуем ему в необыкновенном путешествии через пространство-время, а великолепные цветные иллюстрации служат нам вехами в этом странствии по сюрреалистической Стране чудес, где частицы, мембраны и струны движутся в одиннадцати измерениях, где черные дыры испаряются, унося с собой свои секреты, и где космическое семя, из которого выросла наша Вселенная, было крохотным орешком.

Стивен Хокинг занимает кресло Лукасовского профессора математики в Кембриджском университете, наследуя на этом посту Исааку Ньютону и Полу Дираку. Он считается одним из самых выдающихся физиков-теоретиков со времен Эйнштейна.

Предисловие



Я не ожидал, что моя научно-популярная книга «Краткая история времени» окажется настолько успешной. В списке бестселлеров лондонской «Санди тайме» 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 добивались 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 замаячила 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 говорится, лучше продолжать путь с надеждой, чем прибыть к цели".¹ 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,

¹ Фраза из эссе Роберта Луиса Стивенсона «*Virginitus Puerisque*». — *Здесь и далее примеч. перев.*

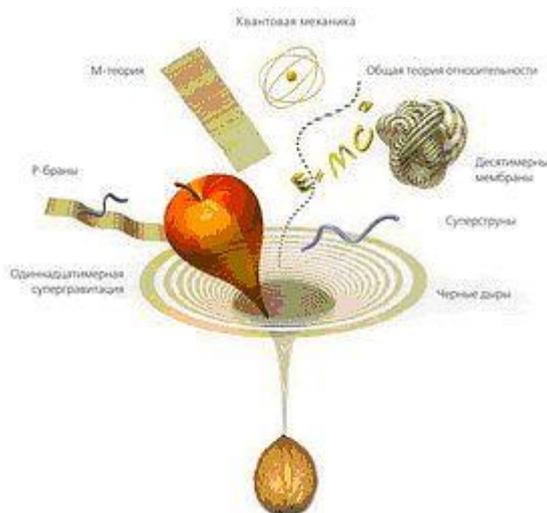
какой она предстает перед нами. Я сконцентрировался на тех вопросах, над которыми работал сам, в силу чувства причастности. Детали этой работы крайне специальные, но я уверен, что основные идеи можно передать и тому, кто не обладает большим математическим багажом. Надеюсь, что мне это удалось.

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.

Глава 1. Краткая история относительности

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



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 (ETH²). Склонность к спорам и нелюбовь 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.

² Eidgenössische Technische Hochschule — Высшее техническое училище.



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

ТЕОРИЯ НЕПОДВИЖНОГО ЭФИРА



Альберт Эйнштейн. 1920

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).

Не было обнаружено никаких различий между скоростью света в направлении движения Земли по орбите и скоростью света в перпендикулярном направлении.

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).

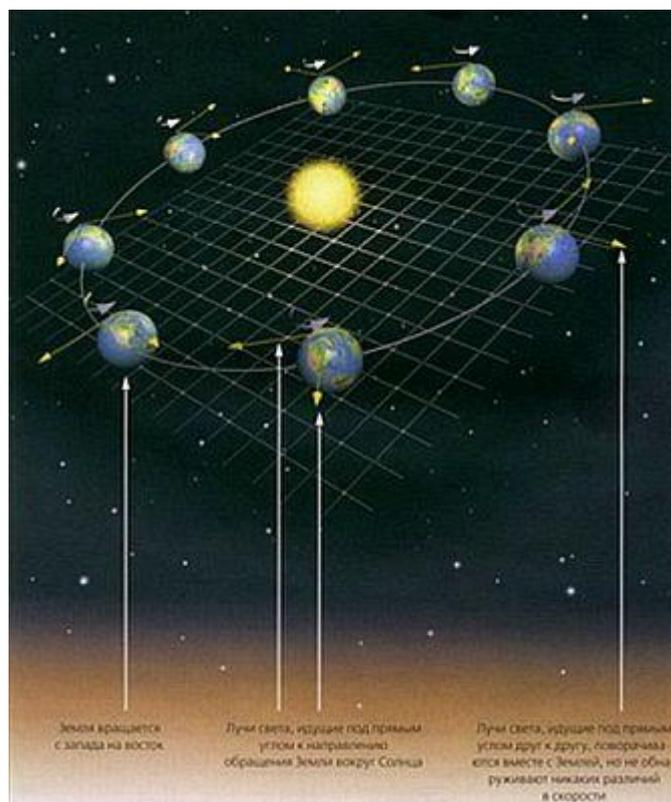


Рис. 1.3. Измерение скорости света

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.

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 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.

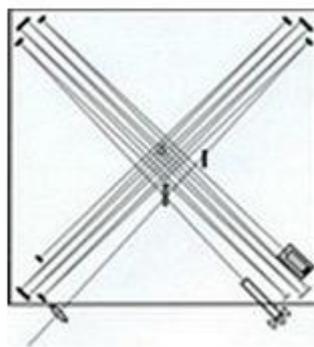
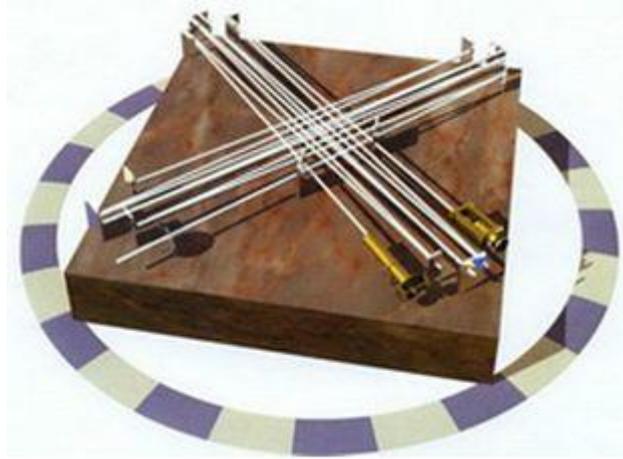


Рис. 1.4. Схема эксперимента, реконструированная по иллюстрации, которая появилась в журнале «Сайнтифик америкен» в 1887 г.

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 Парадокс близнецов

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

Один из близнецов(а) отправляется в космическое путешествие, в ходе которого движется с околосветовой скоростью (с), а его брат (Б) остается на Земле.

Из-за движения в космическом корабле время для путешественника (а) идет медленнее, чем для его близнеца (Б) на Земле. Поэтому, вернувшись, космический путешественник (а2) обнаружит, что его брат (Б2) постарел больше, чем он сам.

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

Космический корабль пролетает мимо Земли со скоростью, равной четверть от скорости света. Импульс света испускается в одном конце кабины и отражается обратно в другом (а). За светом следят люди на Земле и на корабле. Из-за движения космического корабля они разойдутся в оценке пути, пройденного светом (б).

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.

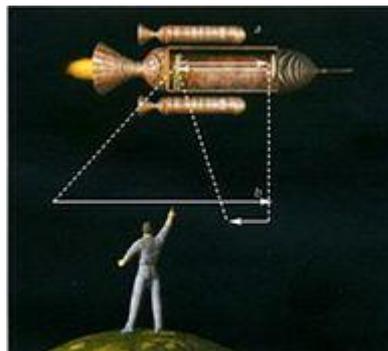


Рис. 1.6

Постулат Эйнштейна о том, что законы природы должны быть одинаковы для всех свобод-

но 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. 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).



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).

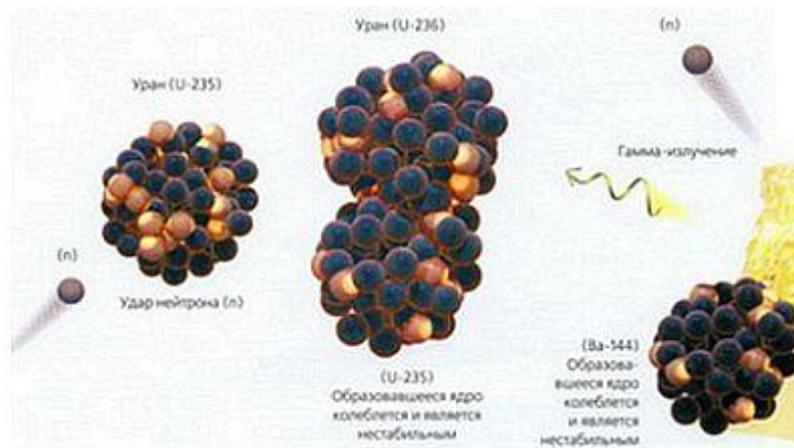


Рис. 1.8 Ядерная энергия связи

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. 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 радю. 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».



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 перебрался в Немецкий уни-

верситет 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 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.

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 Amc^2 , где Am – разница между массой ядра и суммой масс входящих в него частиц; c – скорость света.

Именно выделение этой потенциальной энергии порождает разрушительную мощь ядерных устройств.

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 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»,³ и Эйнштейн скорее представлял себе людей в лифте, чем в космическом корабле.) Но в лифте нельзя долго ускоряться или свободно падать: все быстро закончится катастрофой (рис. 1.9).

³ 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.

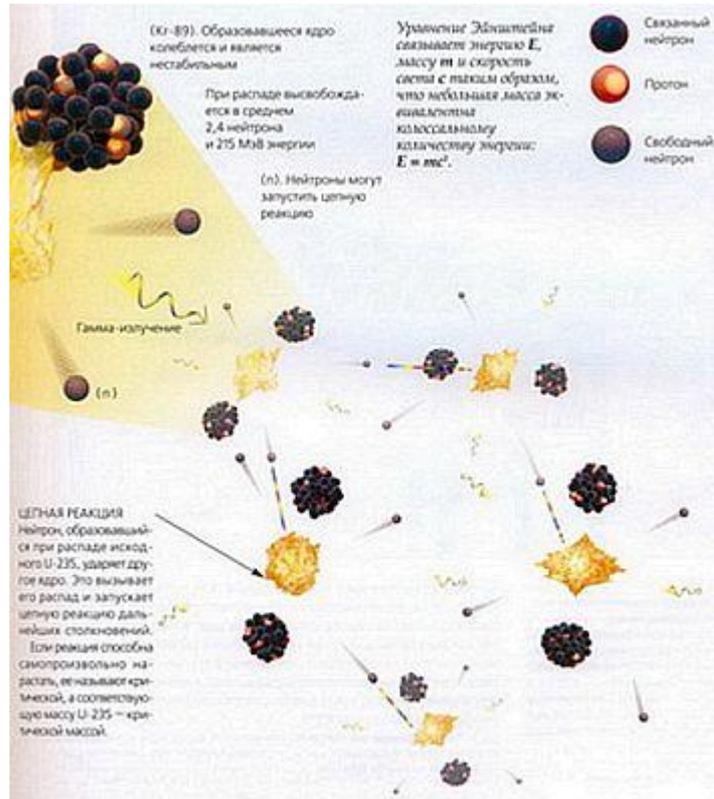
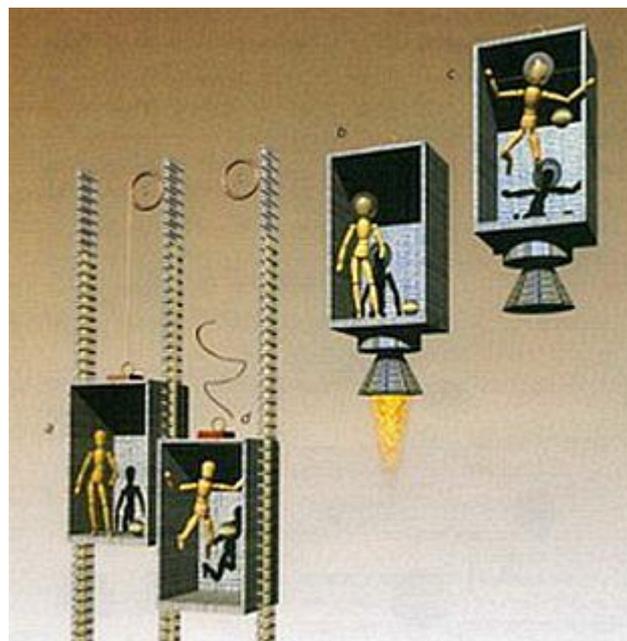


Рис. 1.9

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

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



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 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).

Будь Земля плоской (рис. 1.10), с равным основанием можно было бы сказать, и что яблоко упало на голову Ньютону 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.

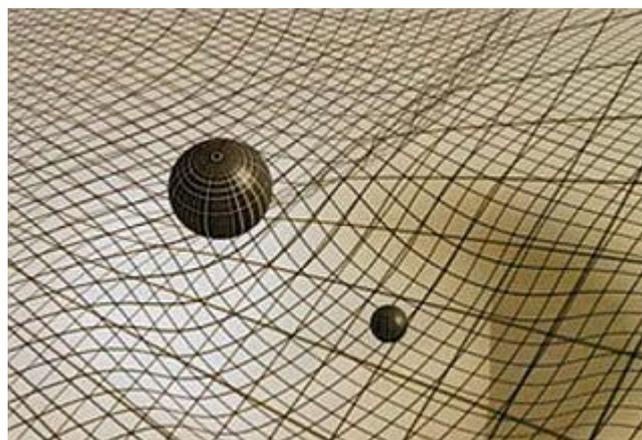


Рис. 1.12 Искривление пространства-времени

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

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 простран-

ство-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 уравнения, 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 Гёт-тингенский 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.

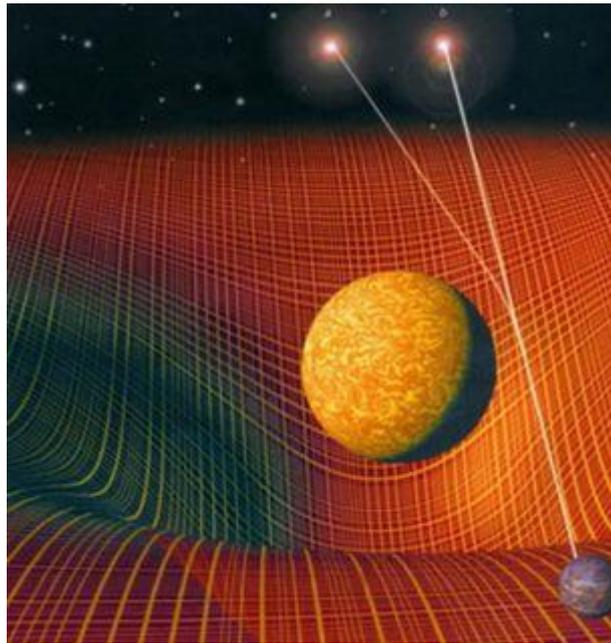


Рис. 1.13. Искривление света

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 разворачиваются 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 постоян-

ной, 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 попробовать 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 ранней 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 (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 стремится 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).

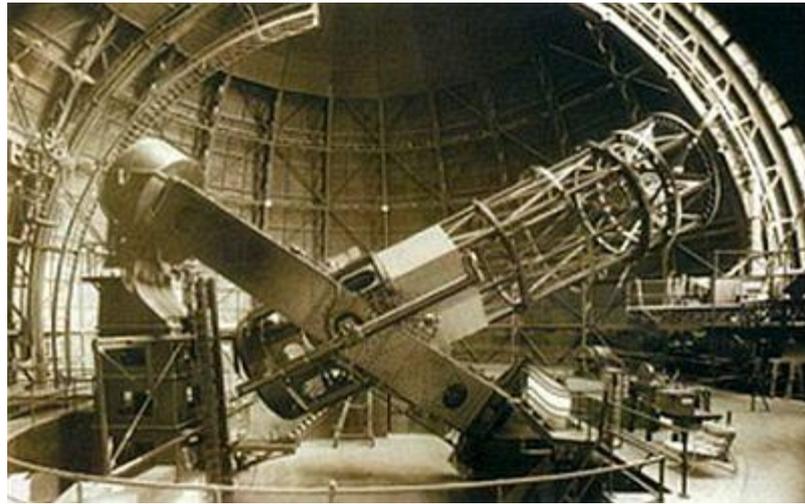
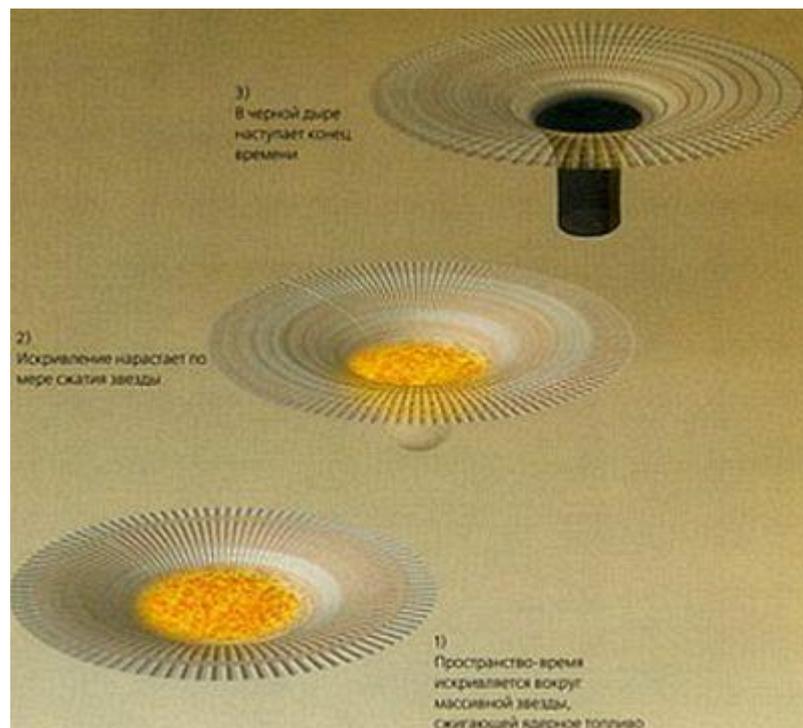


Рис. 1.15 Стодюймовый телескоп хукера в обсерватории Маунт-Вилсон

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.



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 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?



Глава 2. Форма времени

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

Что такое время? Тот ли оно вечно катящийся поток, что смывает все наши мечты, как говорится в старинном псалме?⁴ 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).

⁴ Имеются в виду строки из 90-го псалма Исаака Уотса (1674–1748): «Время, как вечно катящийся моток, // Смывает всех своих детей; // Они летят забытые, словно сны, // Умирающие с началом дня » (Time, like ever-rolling stream // Bears all its sons away; // They fly, forgotten, as a dream, // Dies at the opening day).

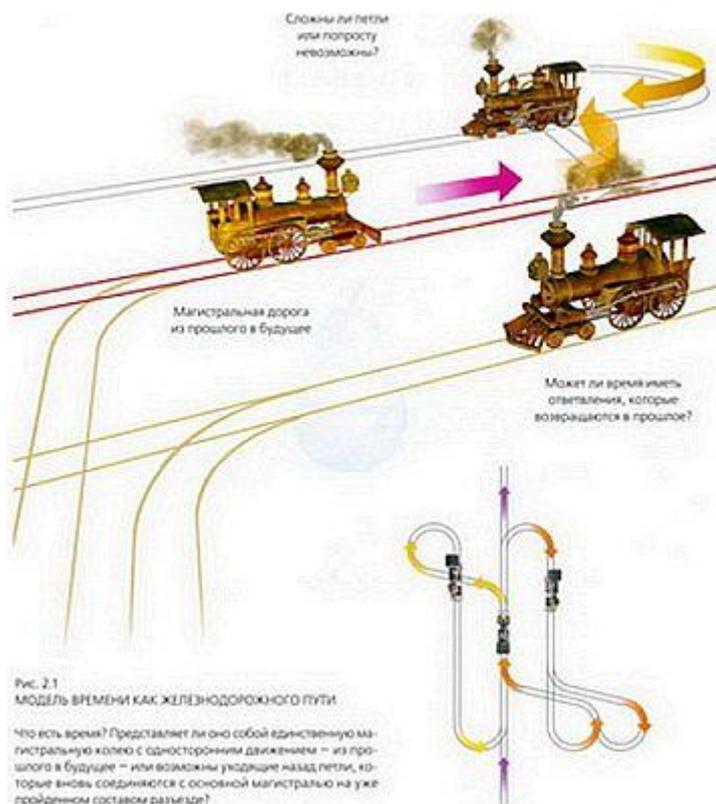


Рис. 2.1 Модель времени как железнодорожных путей

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 Поппе-ром 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 точности 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 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).

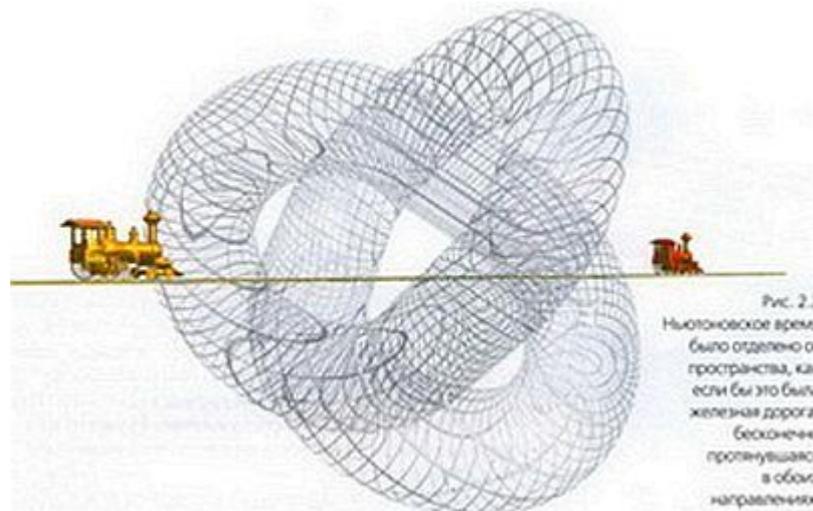


Рис. 2.1
Ньютоновское время
было отделено от
пространства, как
если бы это была
железная дорога,
бесконечно
протянувшаяся
в обоих
направлениях

Рис. 2.2

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,⁵ которое ныне занимаю я, правда, в его время оно не имело электронного управления.⁶

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



⁵ 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.

⁶ Хокинг намекает на инвалидное кресло, в котором вынужден перемещаться из-за тяжелой болезни. Он любит подшучивать над своим физическим состоянием.

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.

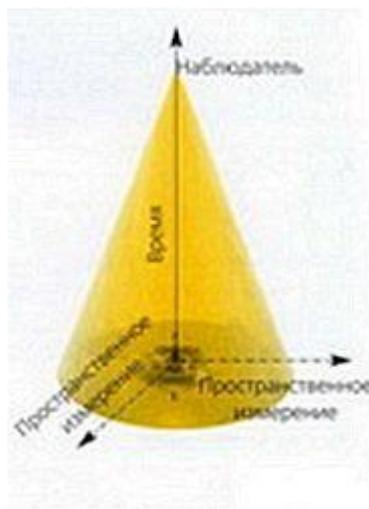
Теория относительности Эйнштейна, которая согласуется с большим числом экспериментов, говорит, что время и пространство неразделимо переплетены.



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 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, 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 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.

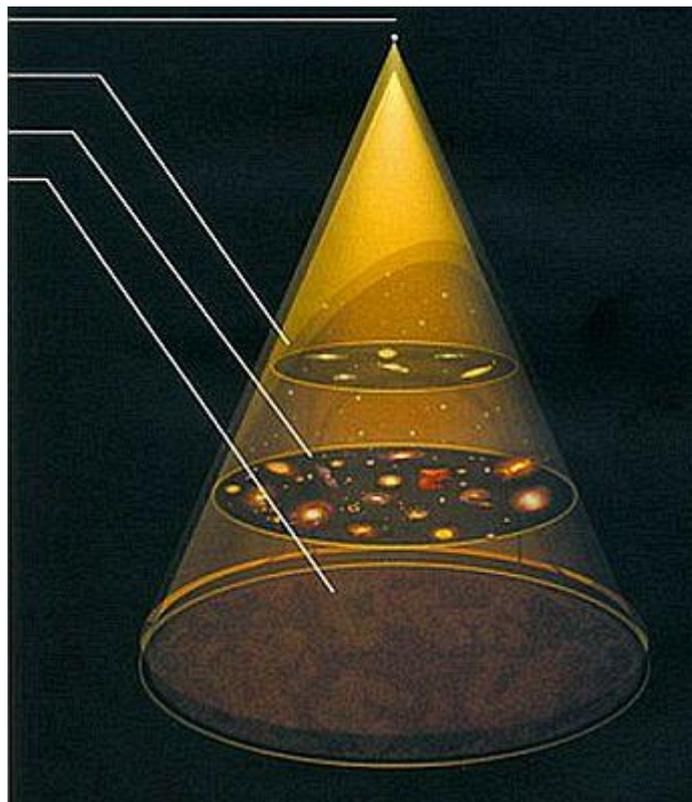


Рис. 2.5. Световой конус нашего прошлого

Наблюдатель смотрит назад сквозь время Галактики, как они выглядели недавно Галактики, как они выглядели 5 млрд лет назад.

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.

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.

Поскольку Вселенная расширяется и все объекты становятся намного 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. Настраивая 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).

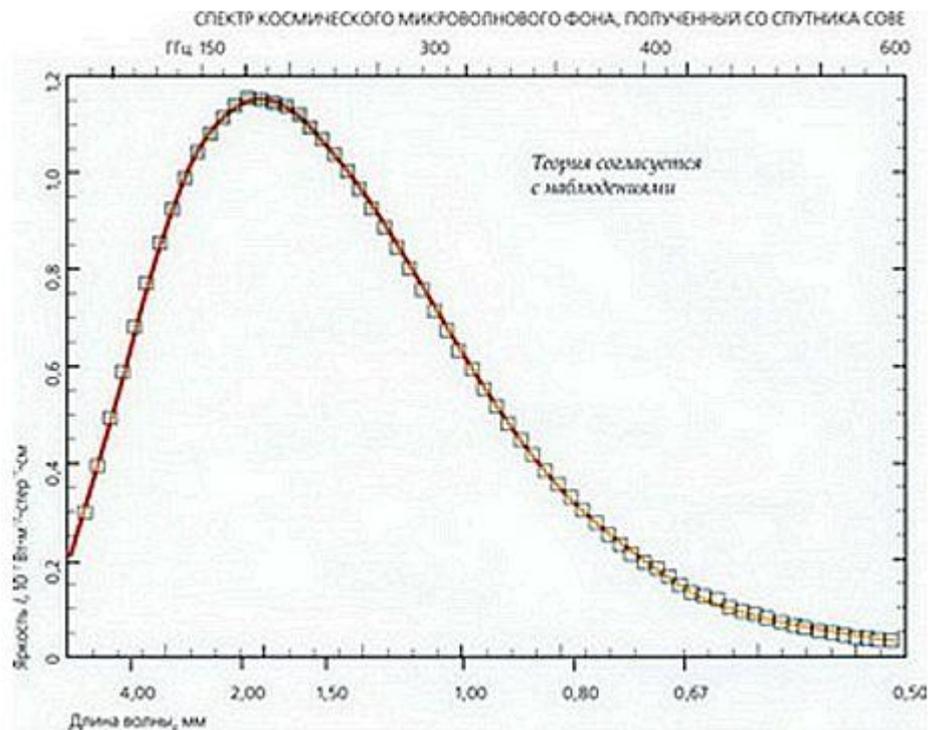


Рис. 2.6

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

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).

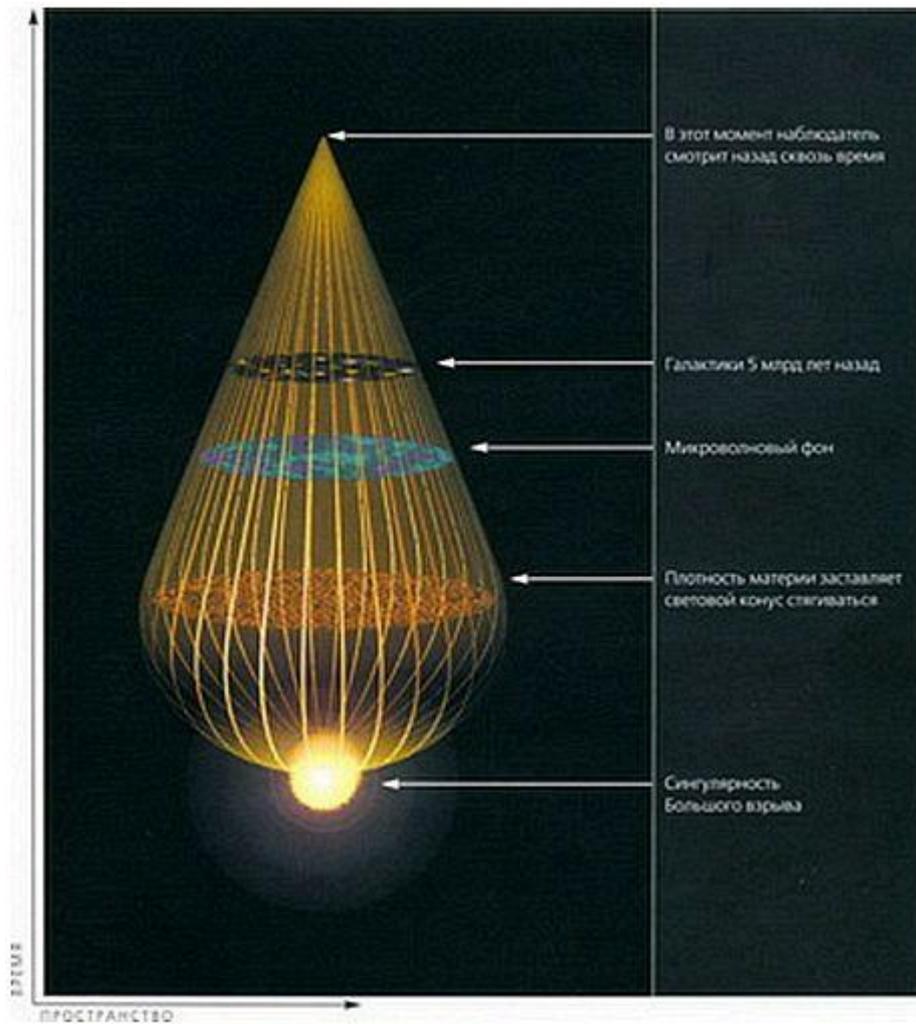


Рис. 2.7

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).

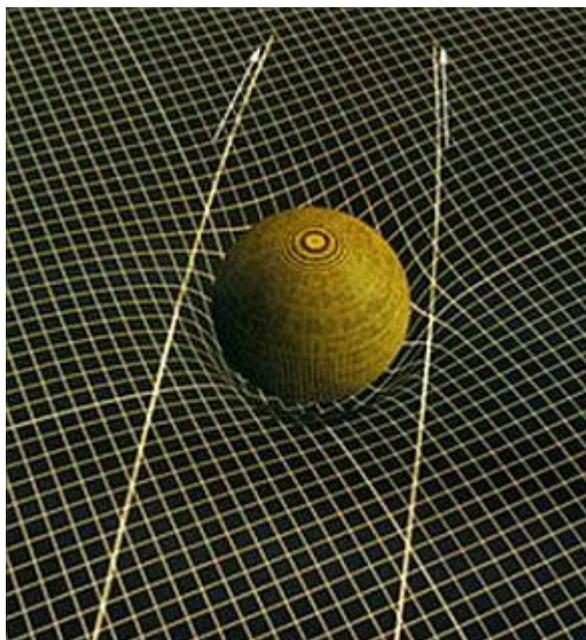
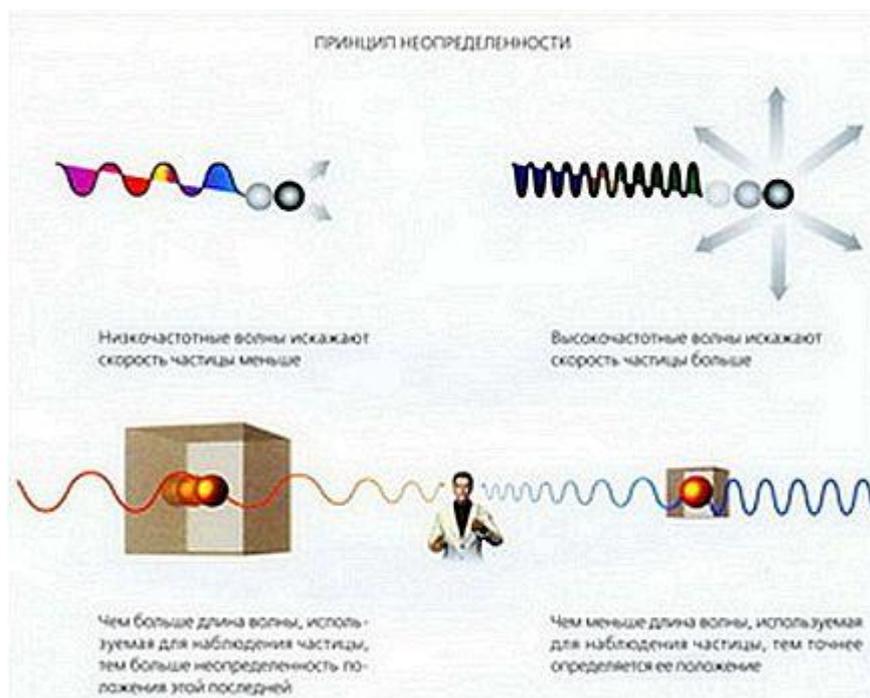


Рис. 2.8. Грушевидное время

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 относительности 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.

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.



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.



Форма времени



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 опровергнуть 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 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.

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.

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.

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).

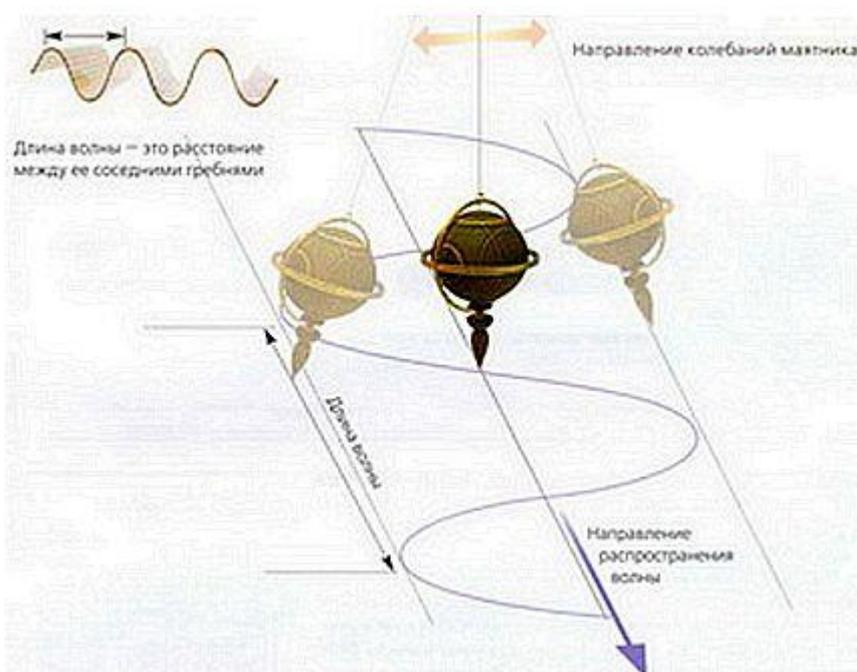


Рис. 2.9 Движение волны и колебания маятника

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.

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 запрещает точное измерение положения и скорости в один и тот же момент времени. Неопределенность положения, умноженная на неопределенность импульса,⁷ 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).

⁷ Импульс — произведение массы на скорость.

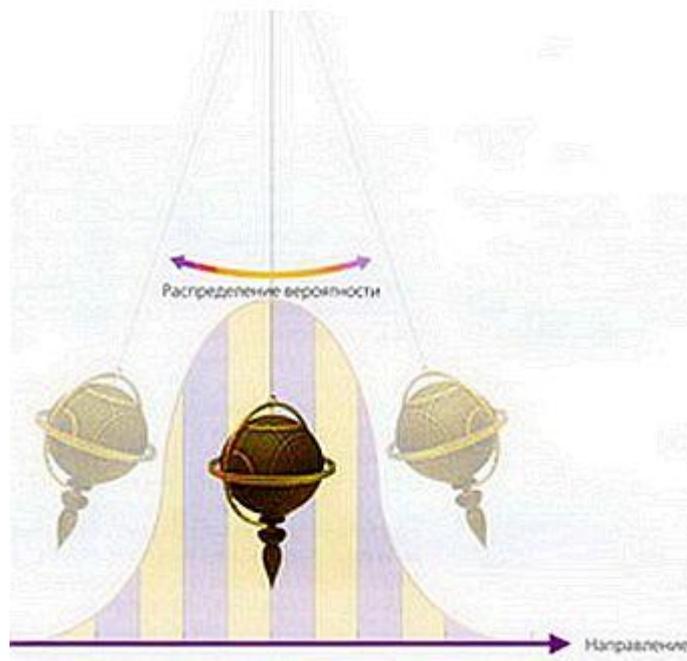


Рис. 2.10 Маятник и распределение вероятности

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 флуктуации 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.⁸ 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.

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 флуктуации 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 флуктуации основного состояния хотя и останется бесконечной, окажется меньше плотности энергии вовне на некоторую конечную величину (рис. 2.11).

⁸ Эта работа была отмечена Нобелевской премией по физике за 1965 г

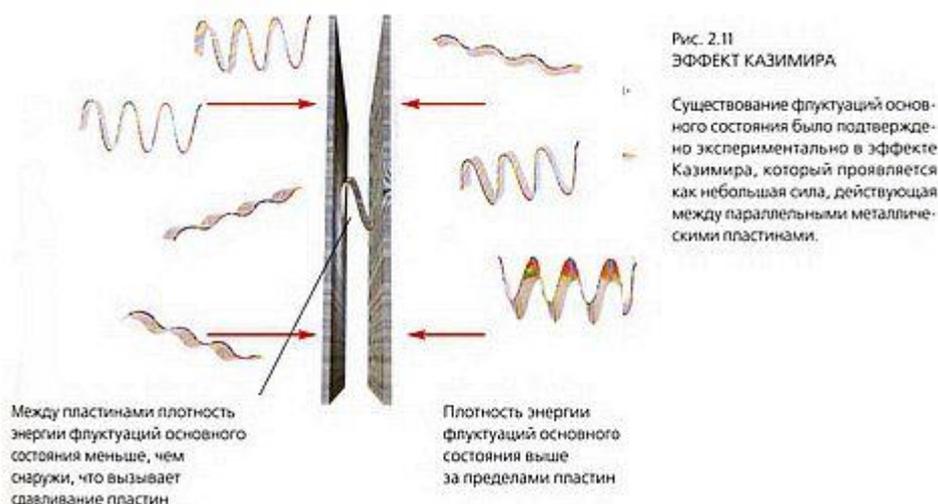


Рис. 2.11 Эффект Казимира

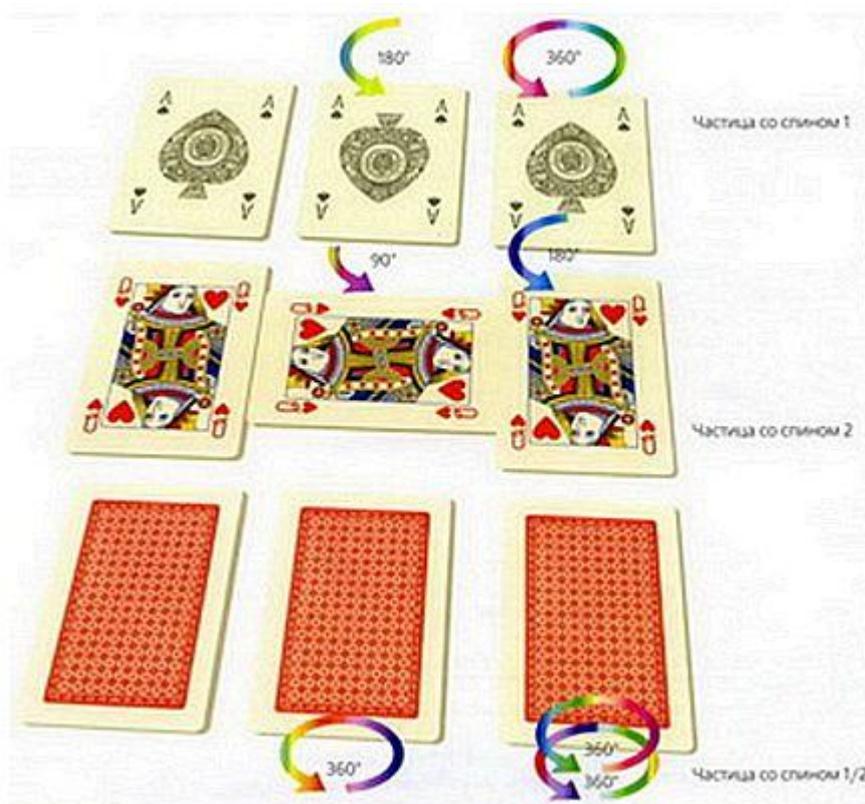


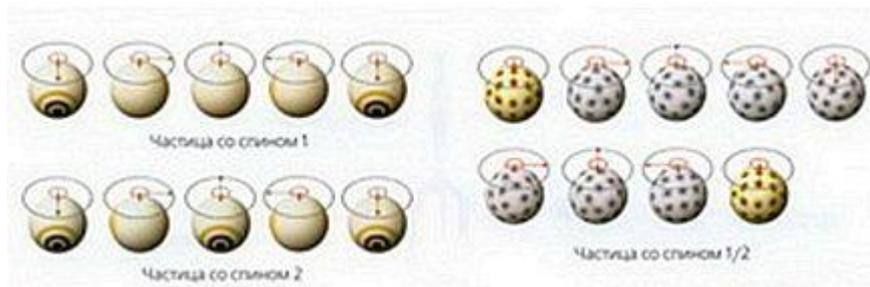
Рис. 2.12 Спин

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 $1/2$.



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 стадио 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.

Обычные числа $A \times B = B \times A$

Грассмановские числа $A \times B = -B \times A$

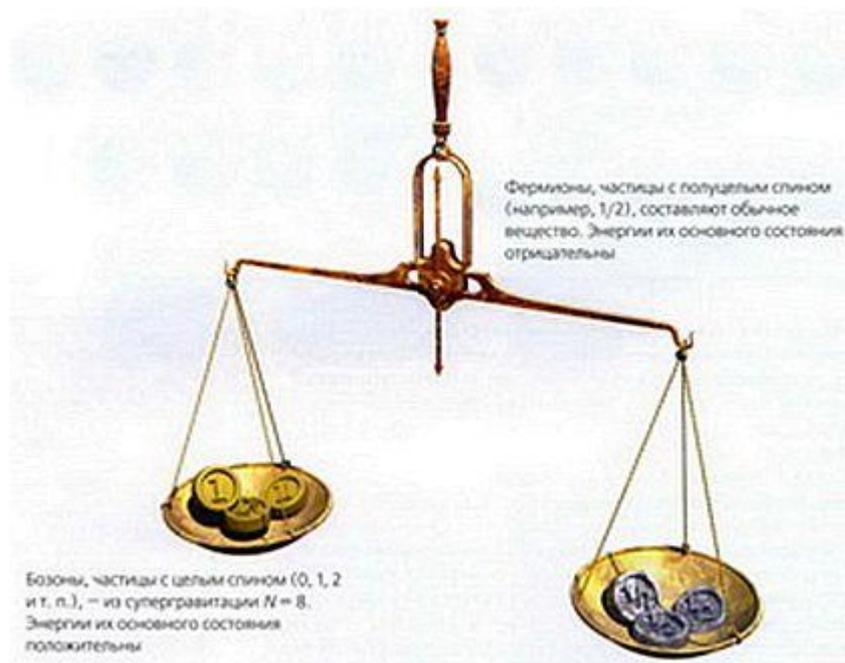
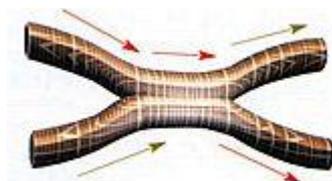


Рис. 2.13 Суперпартнеры

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 ит. 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 спином, 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

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

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

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.

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.

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

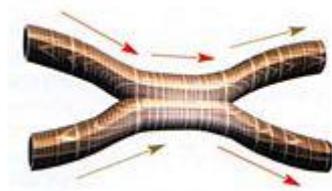


Рис. 2.14. Колебания струн

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.

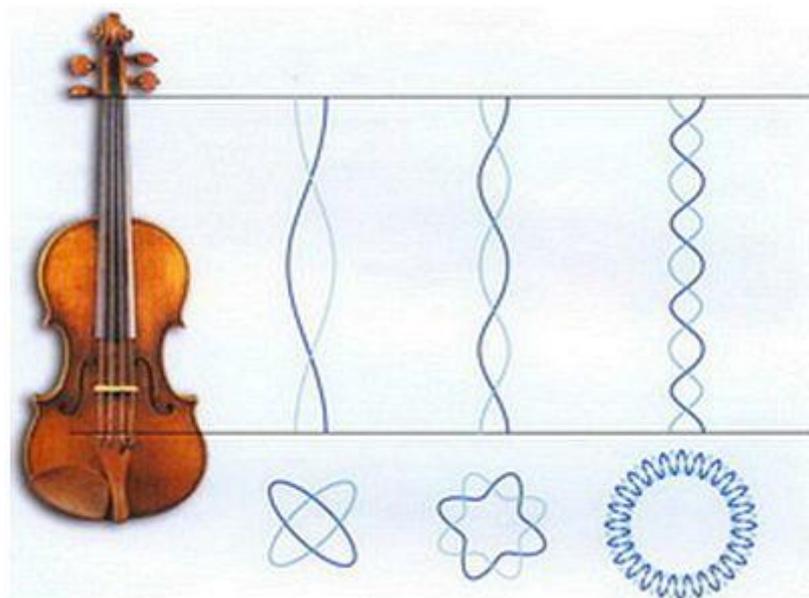
К счастью, в 1970-х гг. был открыт совершенно новый тип симметрии, который обеспечил естественный физический механизм сокращения бесконечностей, появляющихся из флуктуации основного состояния. Суперсимметрия – это свойство наших современных математических мо-

делей, 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 не коммутативны: 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).

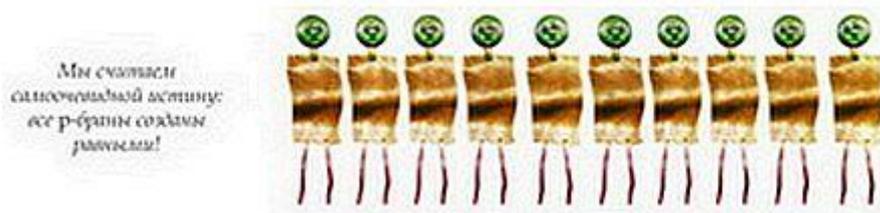
Энергии основного состояния бозонов – полей с целочисленным спином (0, 1, 2 и т. д.) – положительны. С другой стороны, энергии основного состояния фермионов – полей, спин которых выражается полуцелыми числами ($1/2$, $3/2$ и т. д.), – отрицательны. Поскольку имеется одинаковое число бозонов и фермионов, 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?

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 «р-бранами». Такая р-брана имеет протяженность в r направлениях. Так, при $r = 1$ брана является струной, при $r = 2$ – поверхностью или мембраной и т. д. (рис. 2.15). По-видимому, нет причин отдавать предпочтение струнам с $r = 1$ перед струнами с другими значениями r . Напротив, следует принять принцип р-бранной демократии: все р-браны созданы равными.⁹

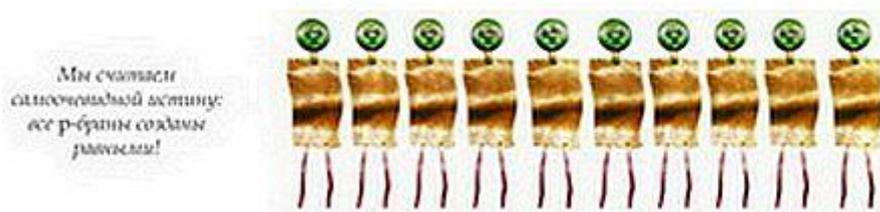
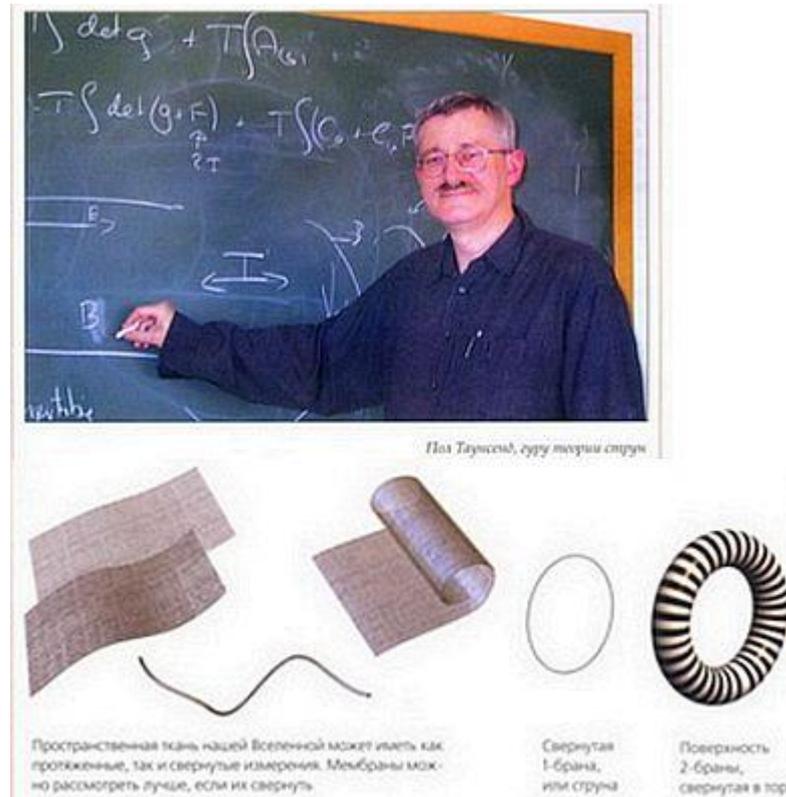


Рис. 2.15. Р-браны

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

⁹ 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...»).



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.

Все р-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).

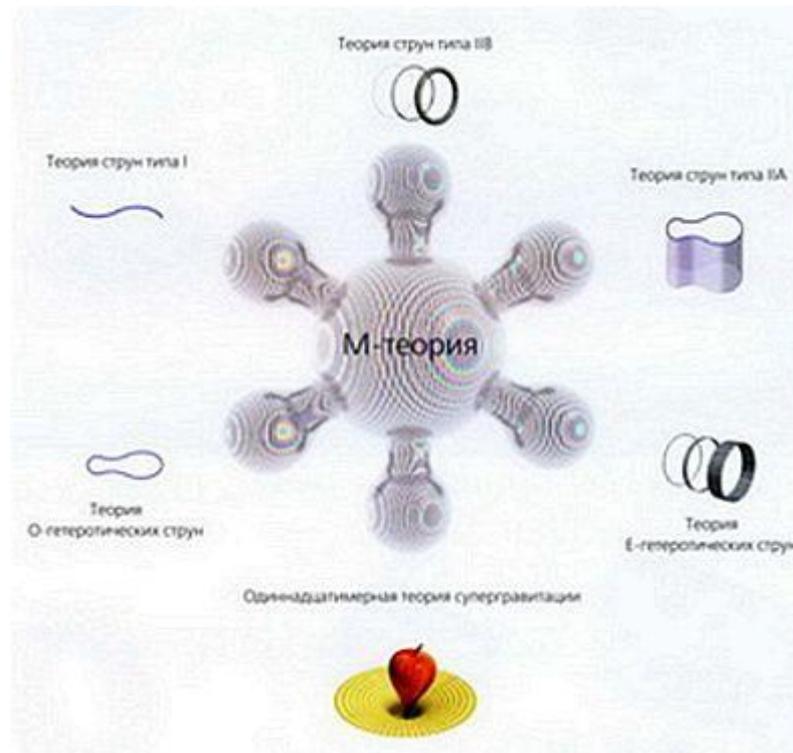


Рис. 2.16 Объединенная схема



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 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).

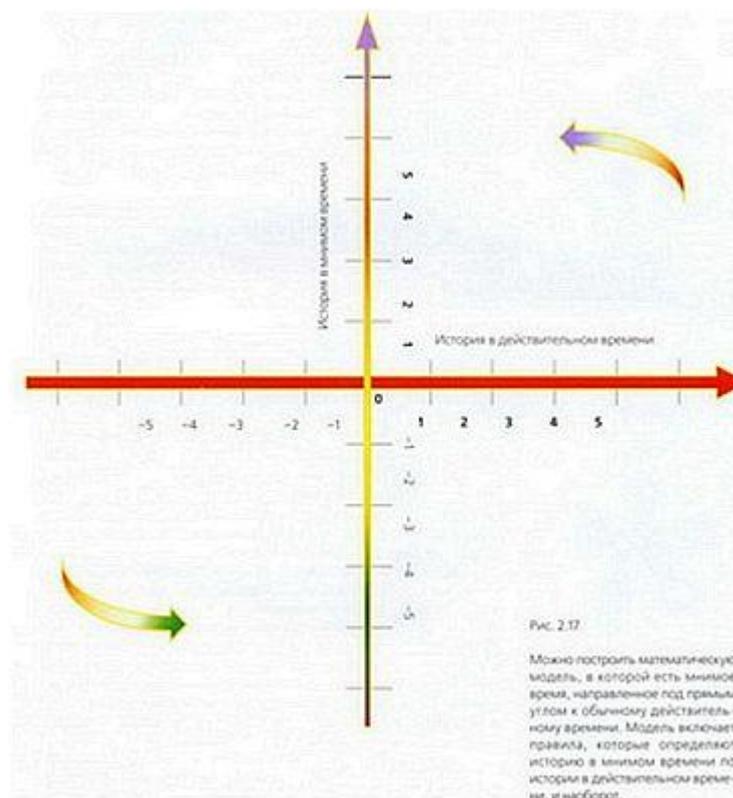


Рис. 2.17

Мнимые числа правомерно изобразить соответствующими отсчетами на вертикальной оси: ноль опять посередине, положительные мнимые числа – вверху, отрицательные мнимые – внизу. 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).

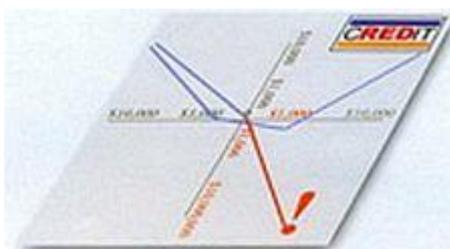
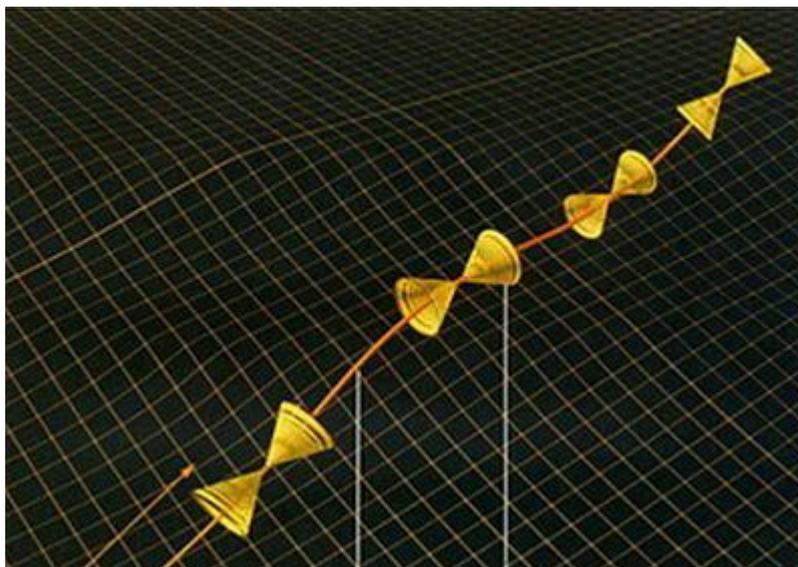


Рис. 2.18

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 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 мнимо? Неужели вся разница лишь в нашем сознании?

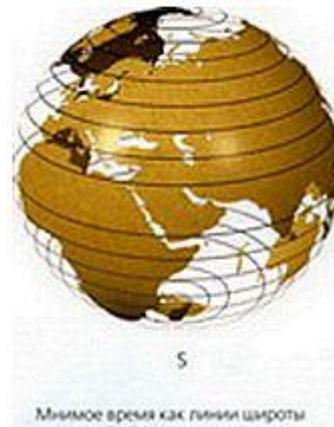


Мнимые числа – это математическая конструкция. У вас не может быть мнимого счета по кредитной карте.

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.

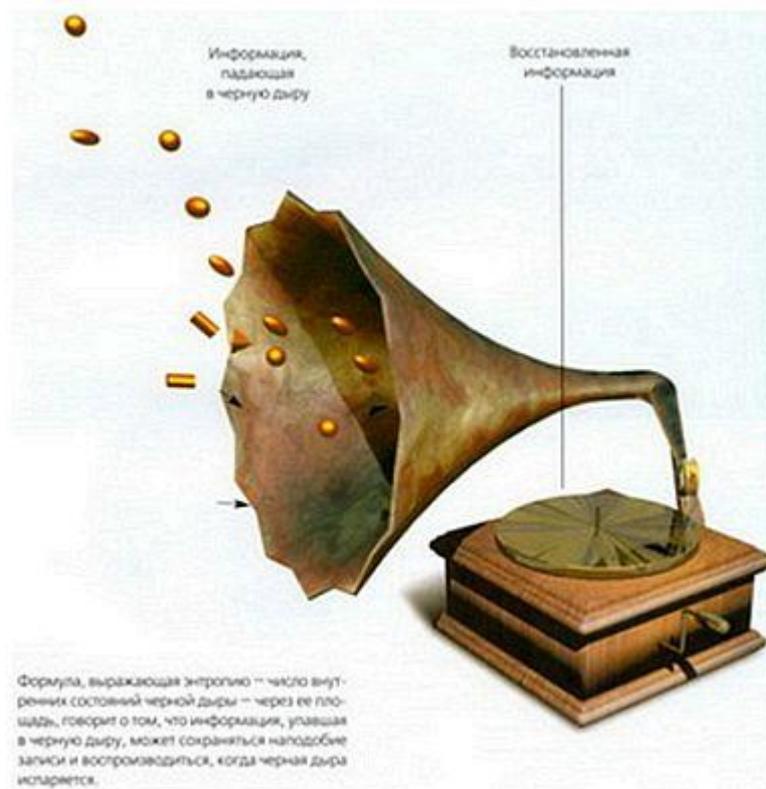
Классическая (то есть неквантовая) общая теория относительности Эйнштейна объединяет действительное время и три измерения пространства в четырехмерное пространство-время. Но направление действительного времени отличается от трех пространственных измерений: мировая линия, или история наблюдателя, всегда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





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.

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.



$$S = \frac{Akc^3}{4\hbar G}$$

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

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 долгой 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 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).



ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП

Сознание 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.

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.

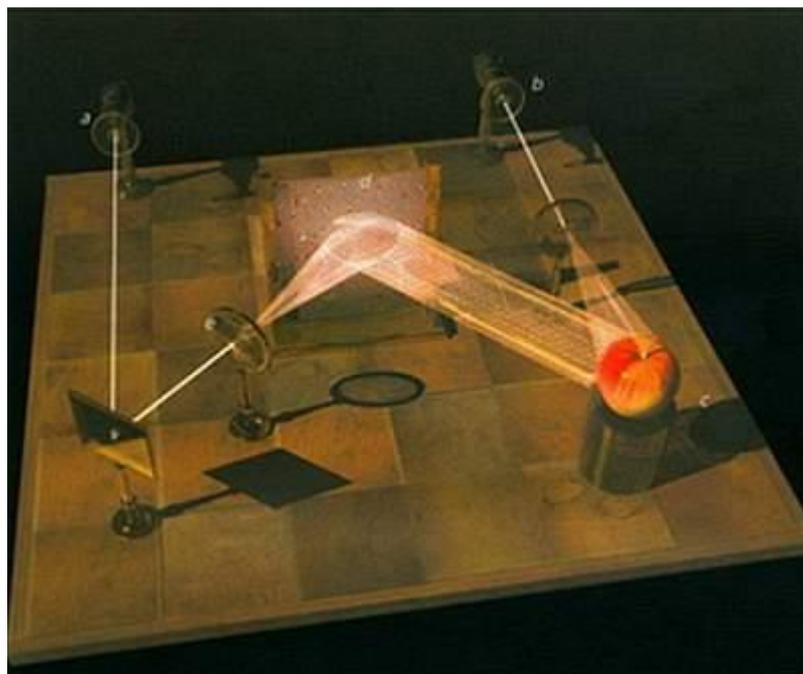


Рис. 2.22

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

Когда лазер светит сквозь проявленную пластинку, восстанавливается полное трехмерное изображение исходного объекта. Наблюдатель может обойти голографическое 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 скорлупке

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



Я бы и в ореховой скорлупе считал себя властелином необъятного пространства.¹⁰

У Шекспир. Гамлет. Акт 2, сцена 2

¹⁰ Перевод К. Р. (Константина Романова).



Вверху: Прометей, Рисунок на эрусской вазе, VI в. до н. э.

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

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 выклевывать его печень?

Вопреки предостережению, заключенному в легенде, я верю, что мы можем и должны пытаться познать 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).

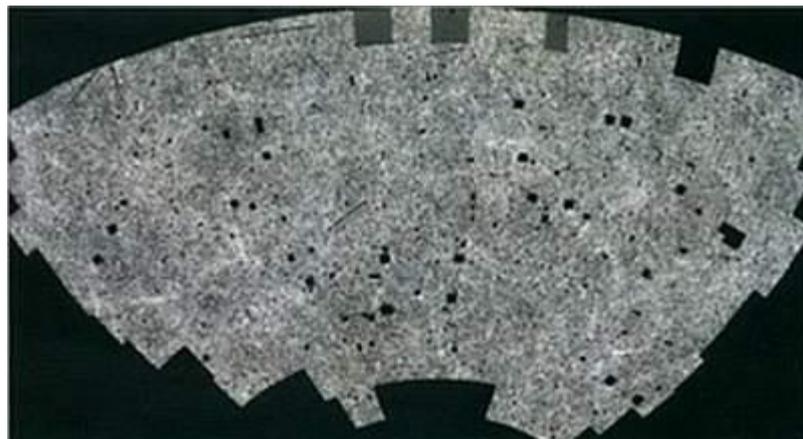


Рис. 3.1

Каждая галактика содержит неисчислимые миллиарды звезд, и у многих из них есть планеты. Мы живем на планете, обращающейся вокруг 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).

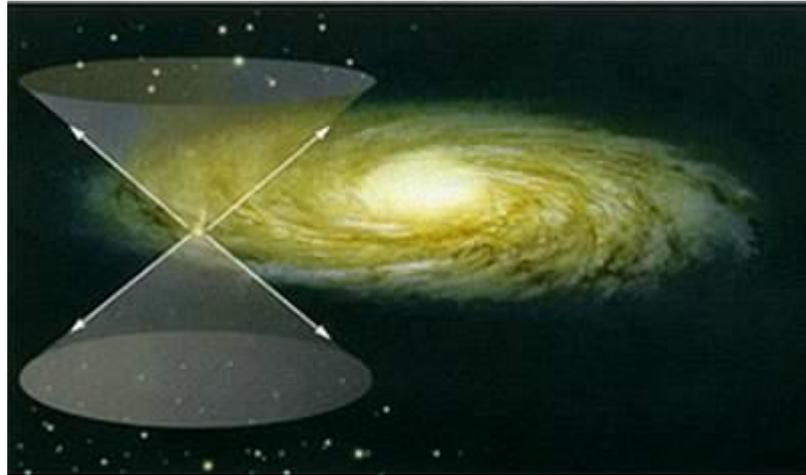


Рис. 3.2

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).

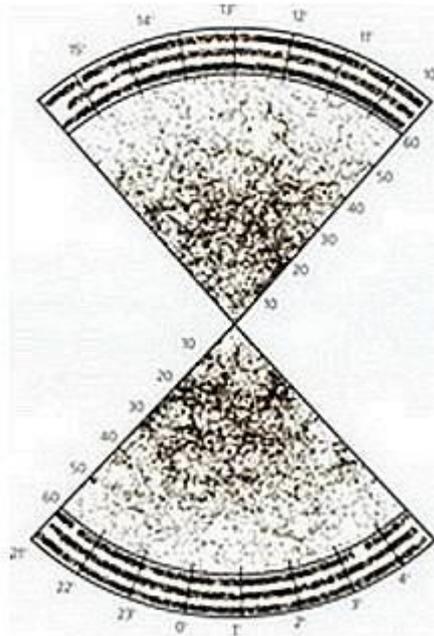


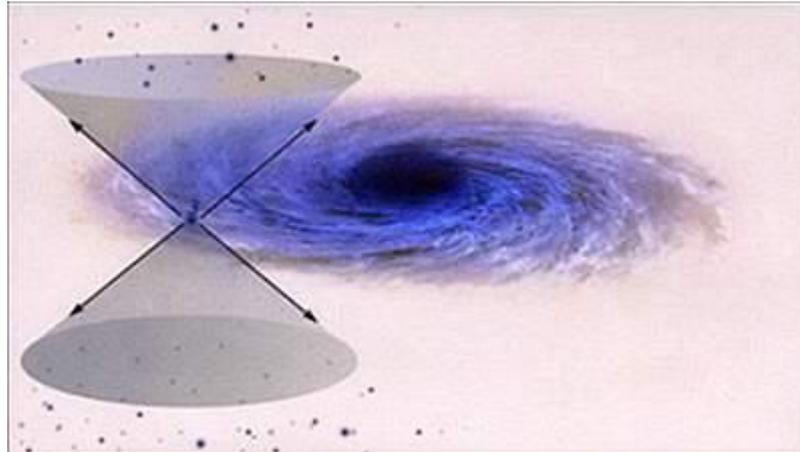
Рис. 3.3



Спиральная галактика Спиральная галактика Эллиптическая галактика

Когда мы смотрим в глубины Вселенной, то видим миллиарды и миллиарды галактик. Га-

лактики могут иметь разные формы и размеры; они могут быть эллиптическими или спиральными, подобно нашему Млечному Пути.



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

Наша планета Земля (3) 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.

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

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, конечное 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.

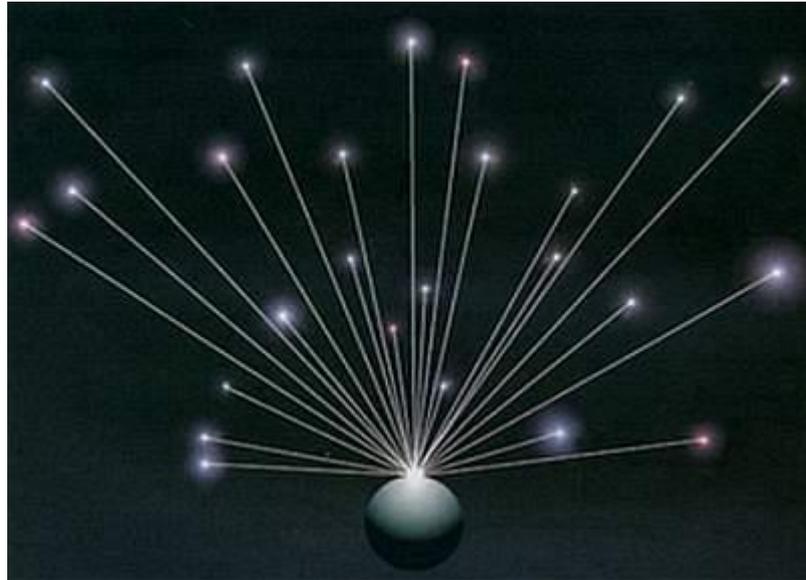


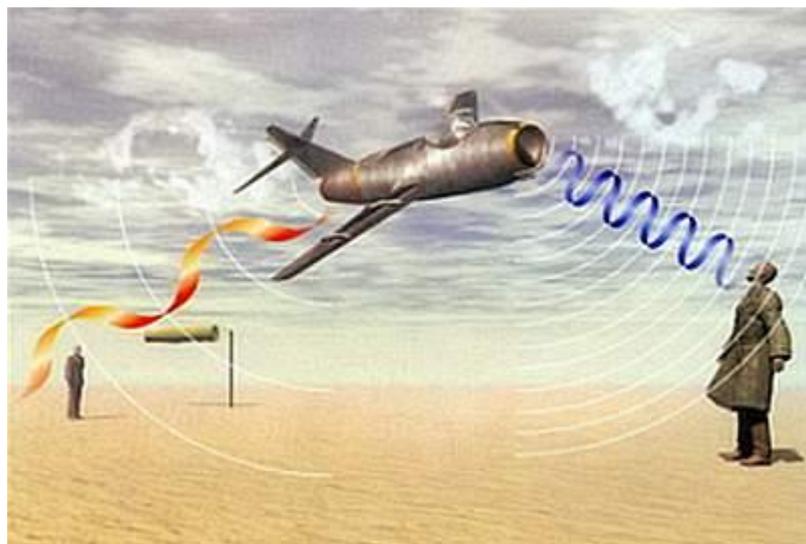
Рис. 3.4

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,

Если бы Вселенная была статичной и бесконечной во всех направлениях, повсюду на ночном небе взгляд упирался бы в звезды и оно светилось 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.

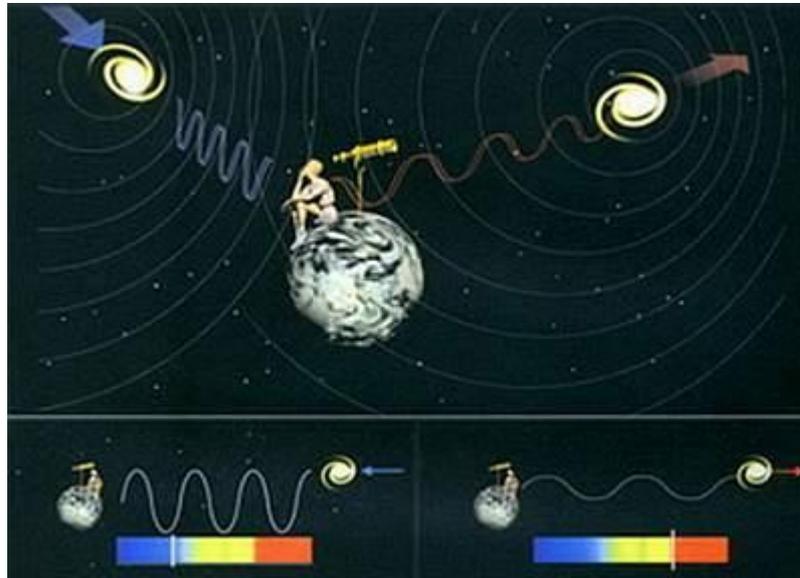
Прислушайтесь к самолету, который пролетает над головой. Когда он приближается, звук двигателя кажется высоким, а когда удаляется – низким.

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

ного 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).

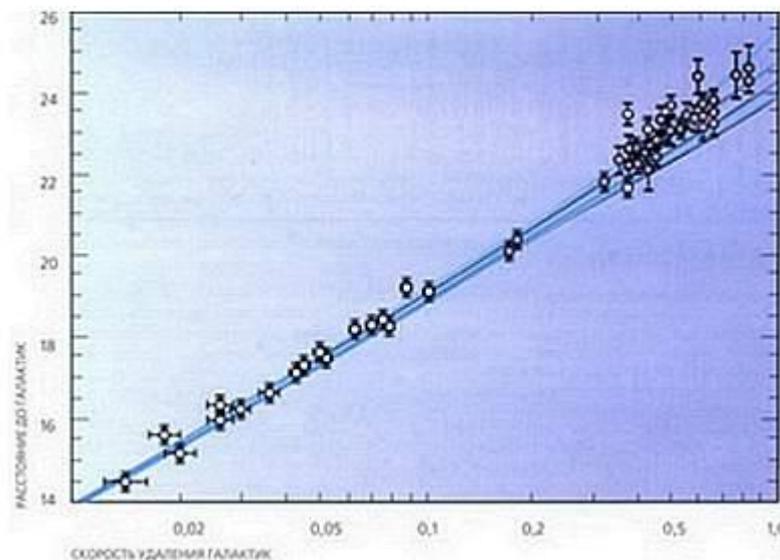


Рис. 3.6. Закон Хаббла

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 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.

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 испытывают голубое смещение (слева).

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.



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

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

утверждая, 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.



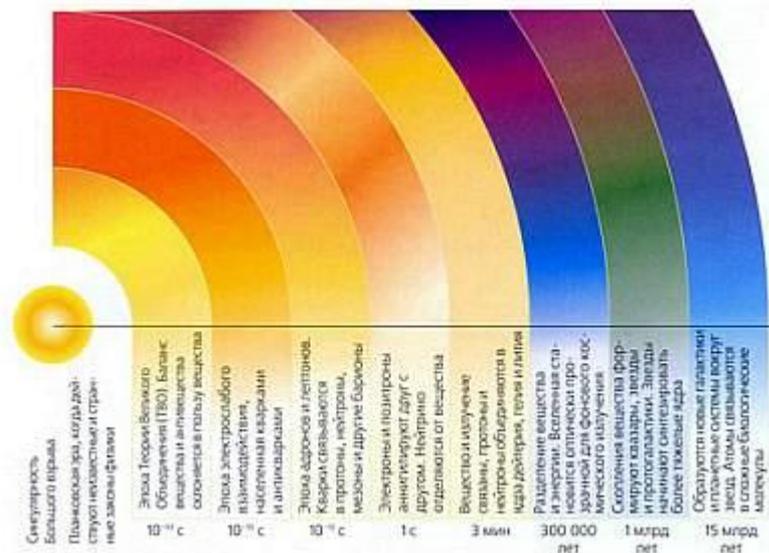
Эдвин Хаббл у 100-дюймового телескопа обсерватории Маунт-Вилсон. 1930

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.]



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 устраивают 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.

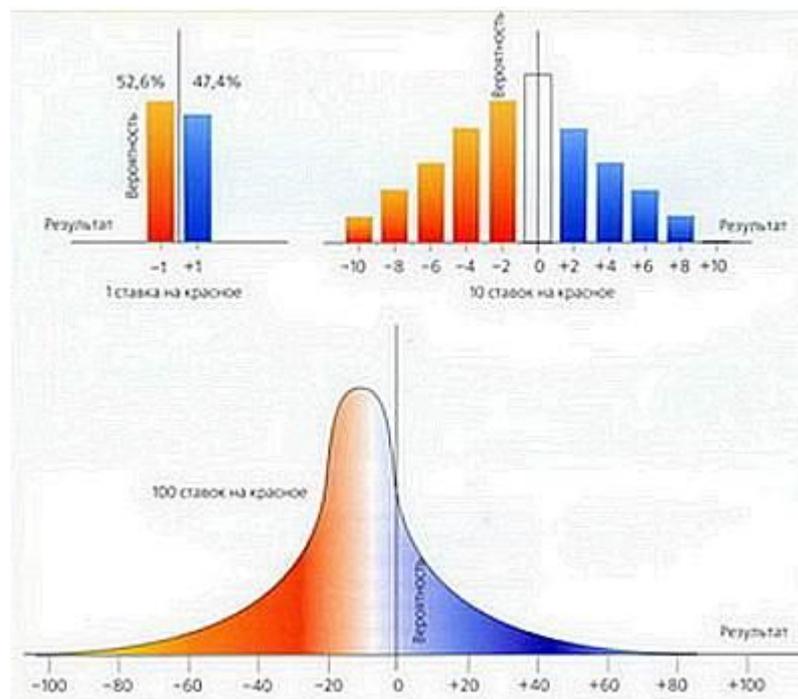
Мы сейчас работаем над тем, чтобы совместить эйнштейновскую общую теорию относительности и фейнмановскую идею множественности историй в полной единой теории, которая описывает все, что случается во Вселенной. Единая теория позволит рассчитать, как будет развиваться Вселенная, если нам известно, как началась 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 границ 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.

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.

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 ведет 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).

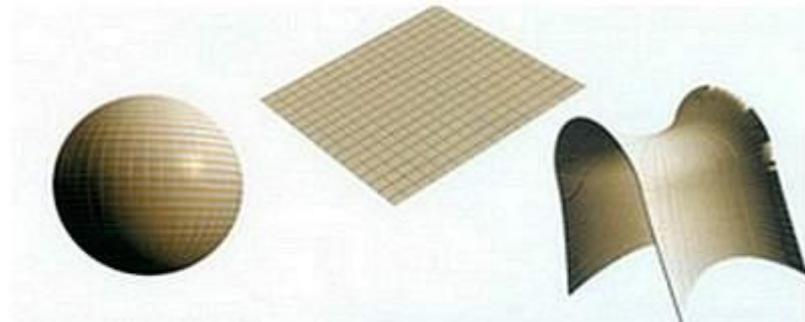


Рис. 3.9. Истории Вселенной



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 это-

го был привлечен к участию в Манхэттенском проекте. Фейнман прославился неугомонным 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 неумное 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 предположил, 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.

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 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 уходят на бесконечность, как в мнимом времени представляют собой замкнутые по-в случае седла, то встает проблема задания граничных верхности, подобные поверхности Земли, тогда зада-условий на бесконечности. Если все истории Вселенной вать граничные условия вовсе не требуется.

ЗАКОНЫ ЭВОЛЮЦИИ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Законы 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, кото-

рые 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.



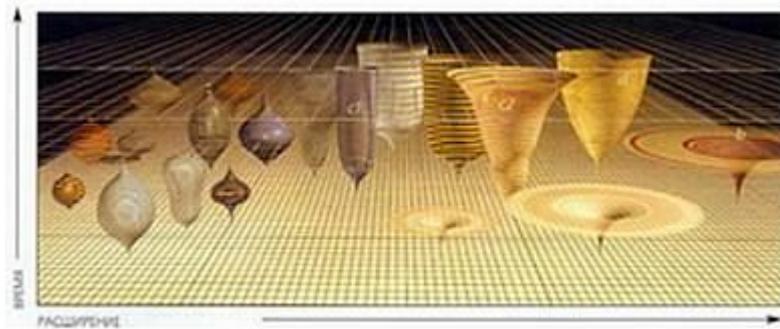
Если истории Вселенной в мнимом времени действительно являются замкнутыми поверхностями, как предположили мы с Хартлом, это должно иметь важные последствия для философии и для картины нашего происхождения. Вселенная в таком случае полностью замкнута и самодостаточна; не требуется ничего за ее пределами, 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 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. 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).

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

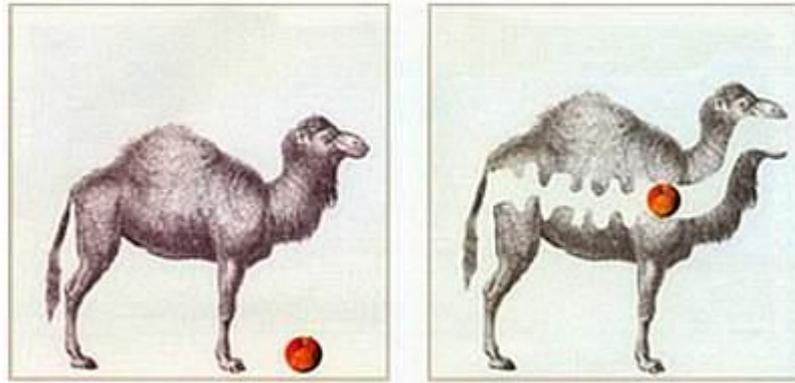


АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП



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.

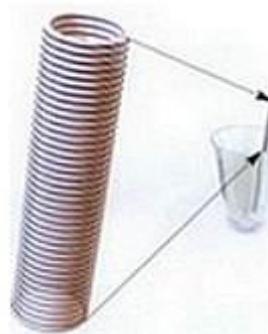
Слабый антропный принцип сводится к объяснению того, в каких из множества эпох или частей Вселенной мы могли бы жить. Например, Большой взрыв должен был произойти порядка 10 млрд лет назад: Вселенная должна быть достаточно старой, чтобы некоторые звезды уже завершили свою эволюцию и наработали такие 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, необязательно должно было выбираться с особой тщательностью.

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 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).

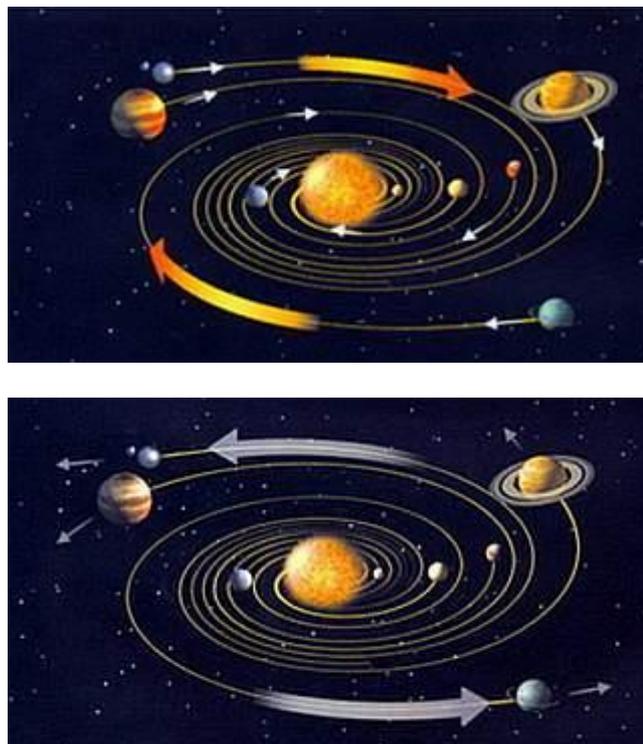


Рис. 3.12

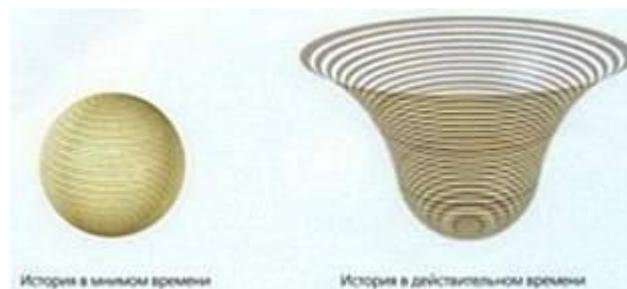
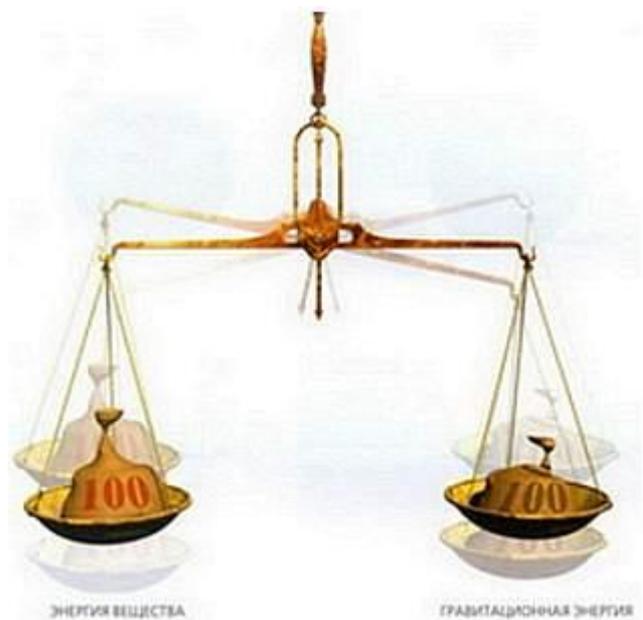


Рис. 3.13

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

Инфляция цен 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)!

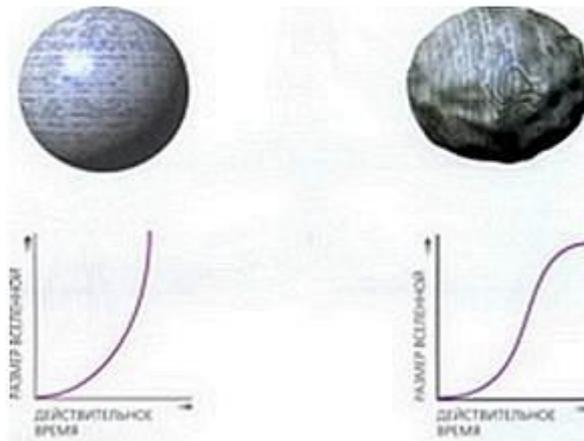


Рис. 3.15. Инфляционная вселенная

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, подразумевая, 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	
Июль 1919 г.	3,4	
Январь 1920 г.	12,6	
Январь 1921 г.	14,4	
Июль 1921 г.	14,3	
Январь 1922 г.	36,7	
Июль 1922 г.	100,6	
Январь 1923 г.	2 785,0	
Июль 1923 г.	194 000,0	
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 сплюснены 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 Вселенная 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).

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.

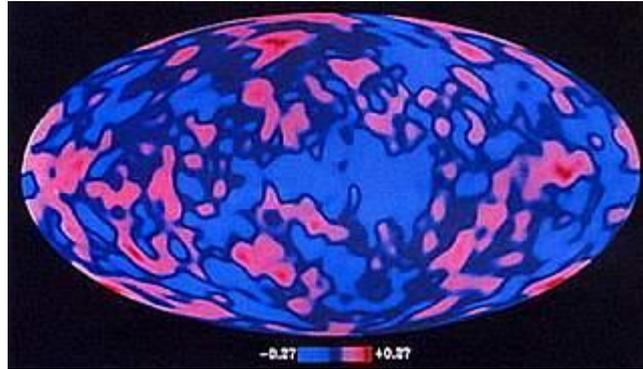


Рис. 3.17 Вероятные и невероятные истории

Гладкие истории наподобие а наиболее вероятны, но их существует лишь небольшое чис-

ло.

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



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 микроволновом 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 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).

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

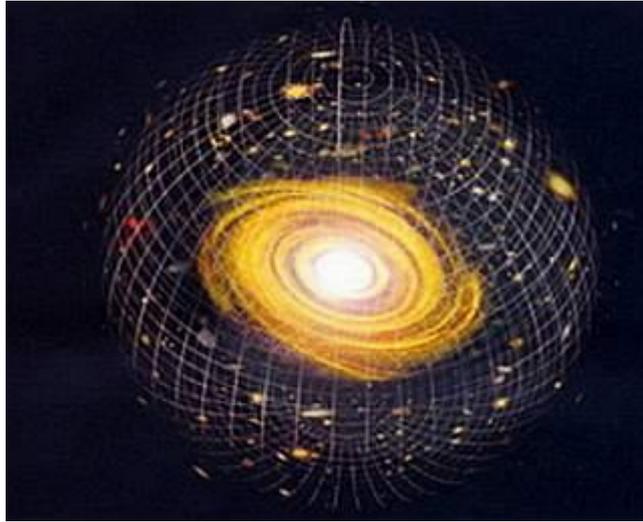


Рис. 3.18 (вверху)

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.



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

рывает 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 флуктуации 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 вакуума, поскольку Вселенная не находится в суперсимметричном состоянии. Единственная неожиданность со-

стоит 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?».

Не была ли космологическая постоянная моей величайшей ошибкой?

Альберт Эйнштейн

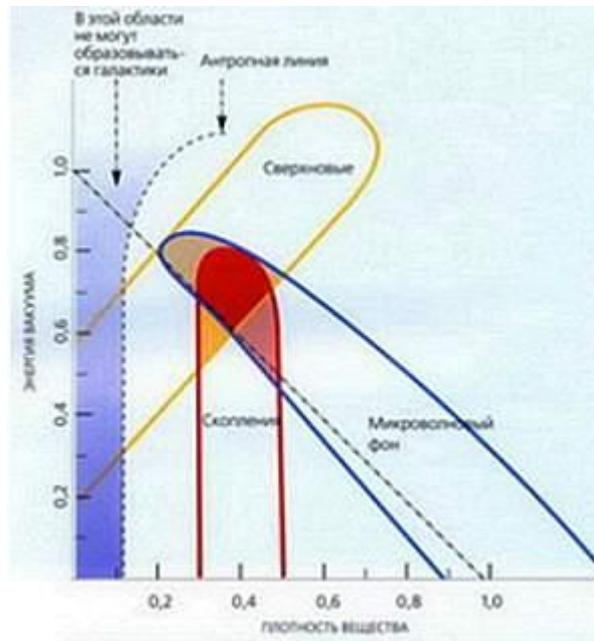


Рис. 3.20

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.

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 Все-

ленной 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

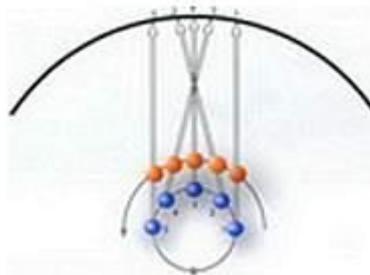


Рис. 4.1

Наблюдатель на Земле (синяя), обращающейся 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 макромолекулами 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 астрология, 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).

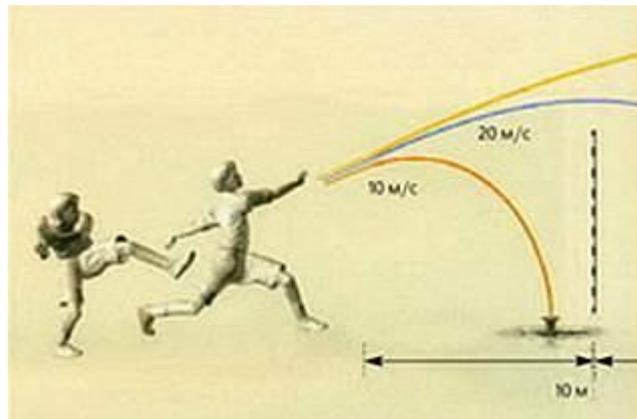


Рис. 4.2. Зная, с какой скоростью брошен бейсбольный мяч, вы можете предсказать, сколько он пролетит.

В этом месяце Марс находится в Стрельце, и для вас это будет врел/я салюопознания. 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 воль предстоит научиться брать на себя ответственность и иметь дело со сложными отношениями.

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

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).



Рис. 4.3

Проблема в том, что последовательность событий не-воспроизводима. В следующий раз, когда бабочка взмахнет крыльями, огромное множество других факторов окажутся иными, 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 механикой, 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).

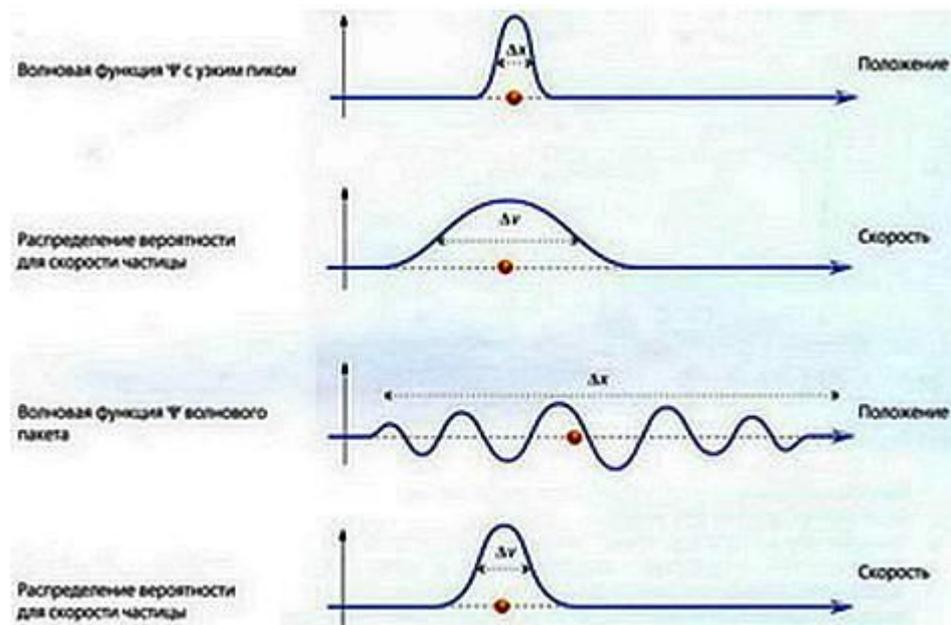


Рис. 4.4. Волновая функция определяет вероятности того, что частица будет иметь раз-

ные положения и скорости, таким образом, что A_x и A_y удовлетворяют принципу неопределенности.

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 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).

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

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

Рис. 4.5. Уравнение Шрёдингера

Зная волновую функцию в один момент времени, 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 положения, 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.

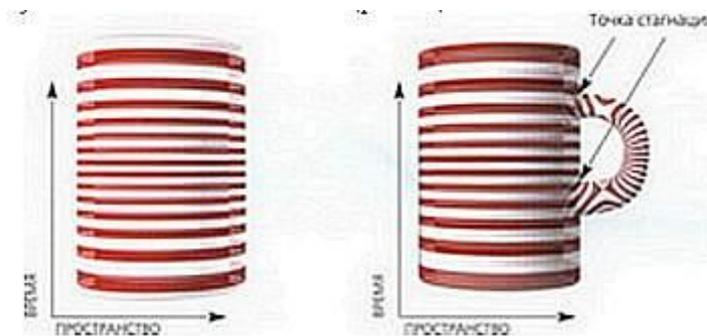
Эволюция во времени волновой функции ψ определяется оператором Гамильтона H , который связан с энергией рассматриваемой системы.

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.



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 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).

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.

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 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).



Рис. 4.8

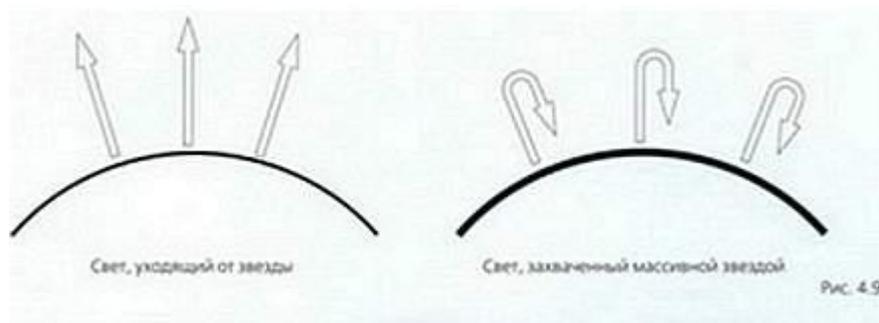


Рис. 4.9

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

странство-время.

ПРЕДСКАЗЫ

ШВАРЦШИЛЬДОВСКАЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА



Рис. 4.11. Звезды образуются в облаках газа и пыли, подобных туманности Ориона

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

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

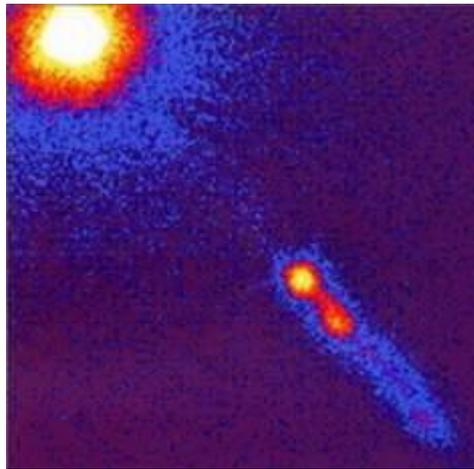
где G – гравитационная постоянная Ньютона; M – масса черной дыры; c – скорость света. Черная дыра с такой же массой, как у Солнца, будет иметь радиус всего 3 км.

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

ДЖОН УИЛЕР

Джон Арчибальд Уилер родился в 1911 г. в Джек-сонвилле, 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.



Квазар 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.

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 решени

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 неоцененными 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

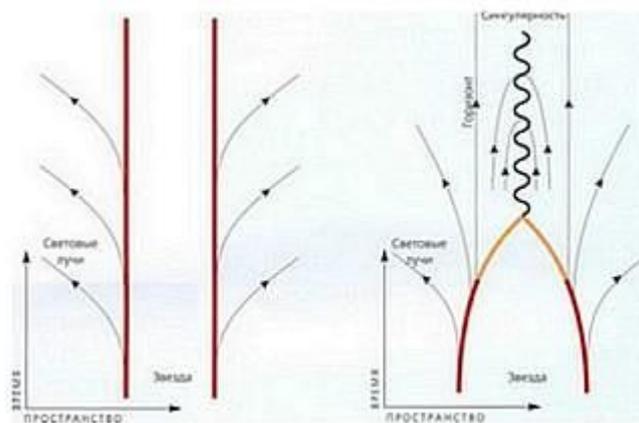
рассказать на семинаре о моем открытии того, что в квантовой теории черные дыры не совсем черные. Мой семинар оказался весьма скучным, поскольку в то время почти никто в Париже не верил в черные дыры. К тому же французам казалось, что это название, которое они перевели как *trou noir*, имеет двусмысленные сексуальные коннотации и должно быть заменено на *aster obscu*, 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 использовании 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.

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.

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.¹¹ После этого звезды оказываются перед лицом кризиса. Они могут сжигать гелий, превращая его в более тяжелые элементы, такие 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).

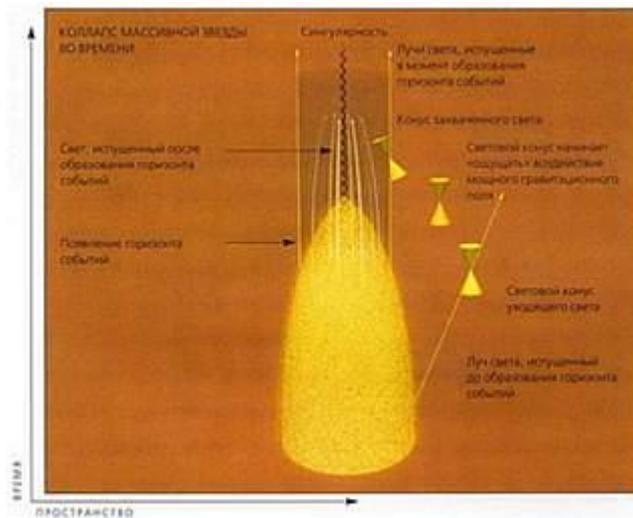


¹¹ Даже быстрее: звезда с массой в 20 раз больше солнечной прогорает за 7–8 млн лет.

Рис. 4.12 (слева) Пространство-время вокруг неколлапсирующей звезды звезды

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.

ПРЕДСКАЗЫВАЯ БУДУЩЕЕ



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 путь света очерчивает поверхность, называемую горизонтом событий, которая отделяет область пространства-времени, откуда свет может выйти, от той, откуда он выйти не может.

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.

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 впечатляющи гигантские черные дыры, встречающиеся в центрах галактик и квазаров (рис. 4.14).

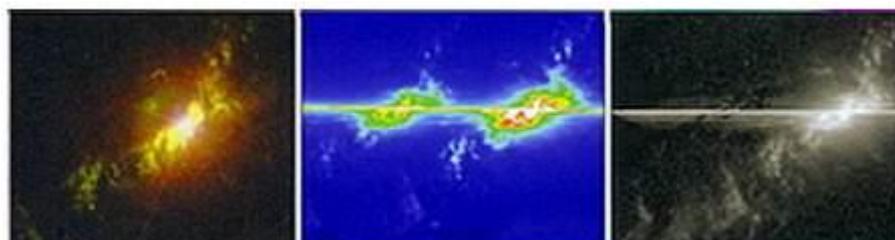


Рис. 4.14. Черная дыра в центре галактики

Слева: Галактика NGC4151, 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.]

Обсуждавшиеся до сих пор свойства черных дыр не создают никаких серьезных проблем для детерминизма. Для астронавта, 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 астронавта по мере его приближения к сингулярности, так что они по-прежнему регистрируют бесконечный интервал времени.¹² На той же 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.

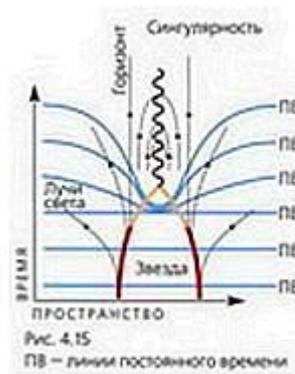
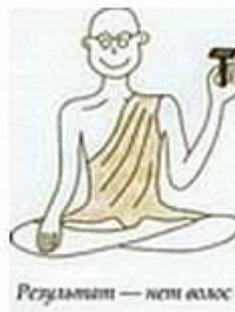
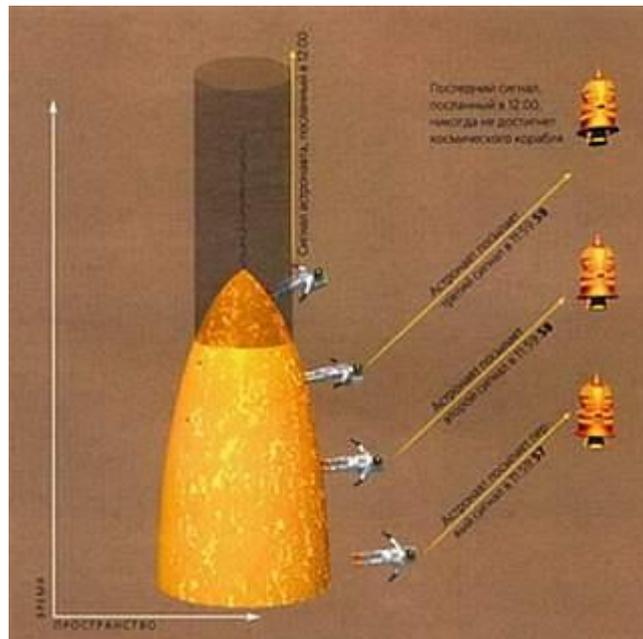


Рис. 4.15

¹² По собственным часам падающий астронавт 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 оттуда 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.

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

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM},$$

где- постоянная Планка; c – скорость света; k – постоянная Больдмана; 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 абсолютного нуля.

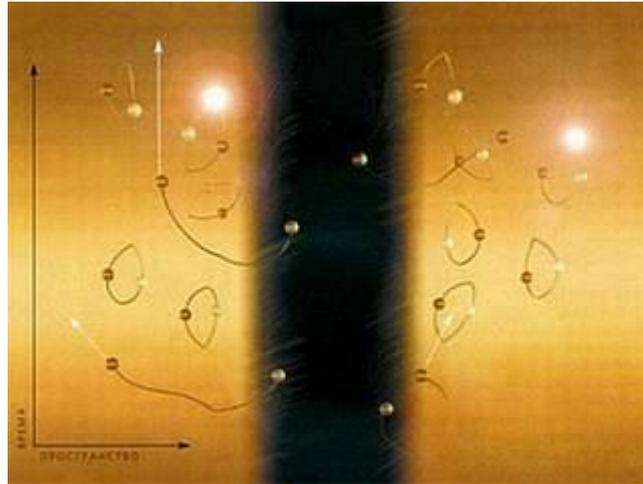
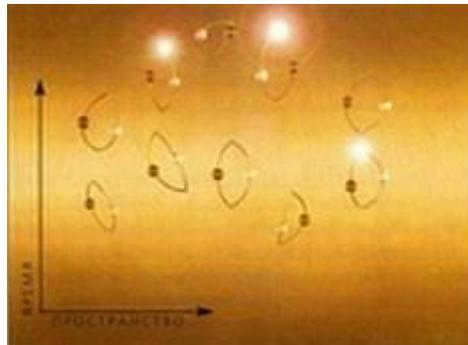


Рис. 4.17. Виртуальные частицы, возникающие и аннигилирующие друг с другом вблизи горизонта событий черной дыры



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.

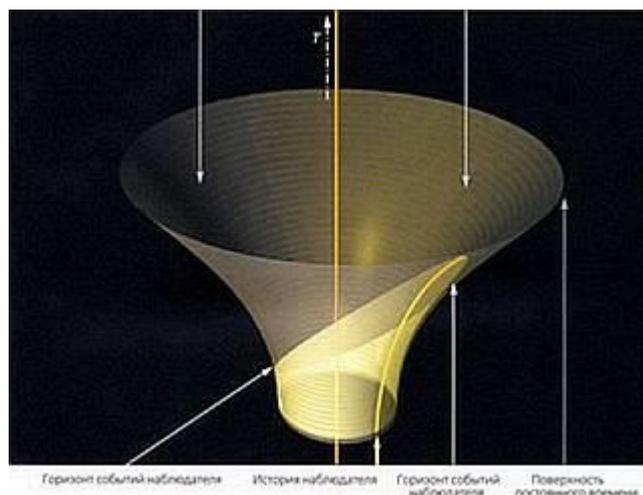


Рис. 4.18

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

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

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

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.



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 нулем, 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 су-

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).

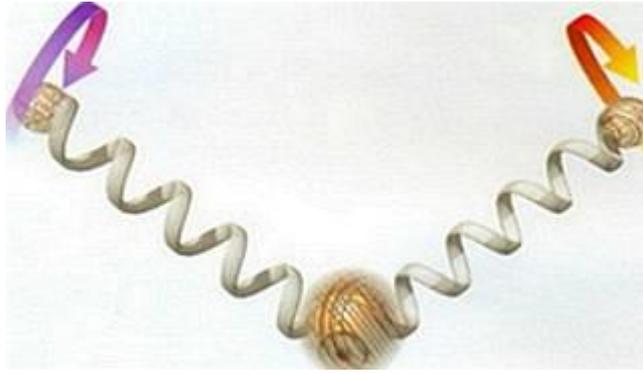
Очень похожие аргументы показывают, что от этого горизонта должно исходить тепловое излучение, как от горизонта черной дыры. В тепловом излучении, как мы знаем, следует ожидать характерного спектра флуктуации плотности. В данном случае эти флуктуации будут расширяться вместе с самой Вселенной. Когда 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 функции, 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.

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.

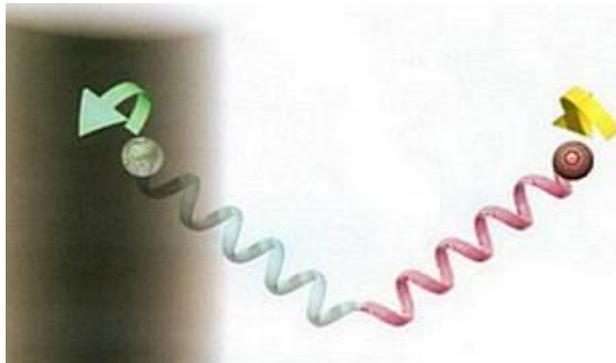


Для переноса информации требуется энергия, а на последних стадиях существования черной дыры энергии очень мало. Единственный правдоподобный способ, которым информация могла бы выбраться из черной дыры наружу – это, не дожидаясь финальной стадии, постепенно выходить вместе с излучением. Однако в рамках картины, где один член пары виртуальных частиц падает, а другой улетает, нельзя ожидать, что улетающая частица будет связана с той, что упала, или вынесет какую-то информацию о ней. Так что единственным ответом будет, по-видимому, утверждение, что информация, содержащаяся в части волновой функции внутри черной дыры, пропадет (рис. 4.19).



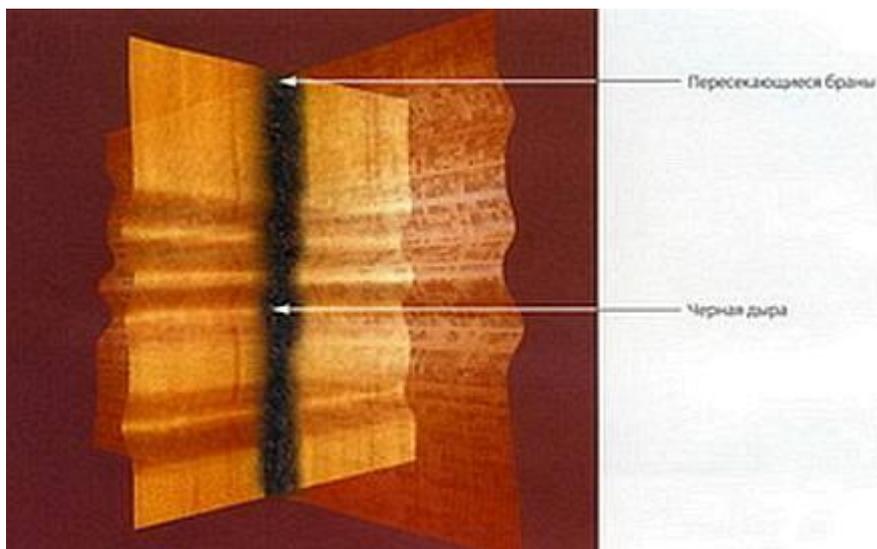
Такая потеря информации должна иметь принципиальное значение для детерминизма. Для начала заметим, что, даже если знать волновую функцию после исчезновения черной дыры, невозможно прогнать уравнение Шрёдингера назад и вычислить, какой она была до того, как черная дыра образовалась. То, какой она была, 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.



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

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.

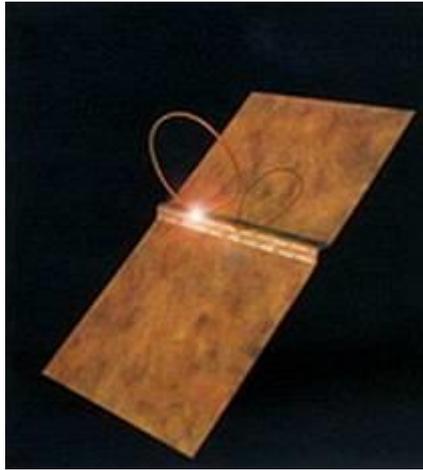


Представьте, что радиоактивный атом распадается и испускает в противоположных направлениях две частицы с противоположными спинами. Наблюдатель, который видит только одну частицу, не может предсказать, будет она вращаться вправо или влево. Но если наблюдатель определит, что она вращается вправо, то он 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. Волновая 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 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.

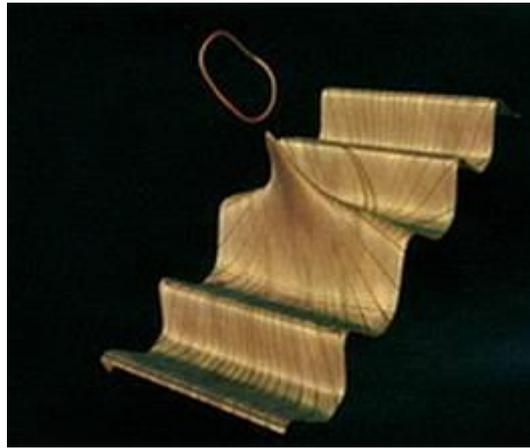
Черные дыры можно представлять себе как пересечения p -бран в пространстве-времени с дополнительными измерениями. Информация о внутреннем состоянии черных дыр будет сохраняться в форме волн на p -бранах.



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

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 р-бранами.

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



Идею с р-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 листков. Здесь уместна аналогия с водой: то обстоятельство, что она состоит из миллиардов и миллиардов сложно взаимодействующих между собой молекул H_2O , нисколько не мешает представлению о непрерывной жидкости оставаться для нее очень эффективной моделью. Математическая модель черных дыр, сложенных из р-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 р-бран предсказывает в точности такую же интенсивность излучения, как и модель виртуальных пар. Но есть одно важное отличие: в модели р-бран информация о том, что падает в черную дыру будет сохраняться в волновой функции колебаний самих р-бран. Эти р-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 р-бран. Поэтому, следуя модели р-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 р-бран? Это один из самых глубоких вопросов современной теоретической физики. По мнению многих, недавние рабо-

ты 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.¹³ Все это было большой неожиданностью – взгляните, что стало с моими коленями.



Кадр из фильма "Звездный путь: Новое поколение"

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 поданному вопросу, выставив требования в недостаточно общем виде) по-прежнему твердо уверен, что голые сингулярности прокляты и должны быть запрещены законами классической физики,

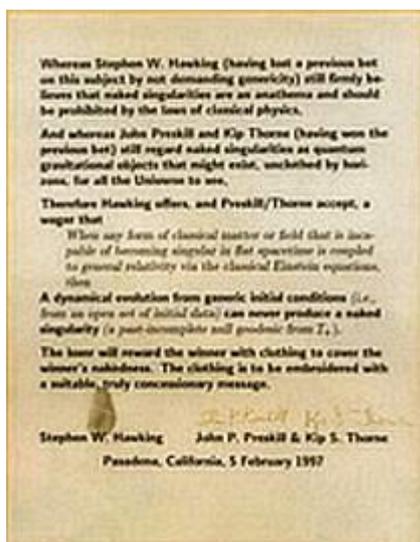
и поскольку Джон Прескилл и Кип Торн (выигравшие предыдущее пари) по-прежнему считают, что голые сингулярности как квантовые гравитационные объекты могут существовать, не будучи укрыты горизонтом, в наблюдаемой нами Вселенной,

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 $1+$ с конечной точкой в прошлом).

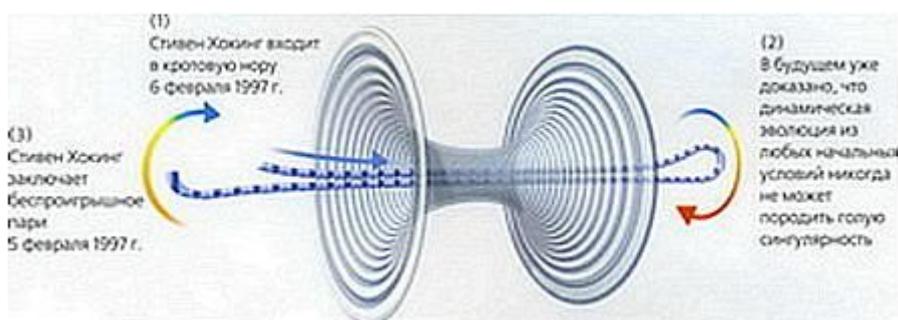
Проигравший вознаграждает победителя одеждой, дабы тот мог прикрыть свою наготу. На одежде должно быть вышито соответствующее случаю сообщение.

¹³ Дэйта — член экипажа «Энтерпрайза», андроид.



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 неполиткорректным. Мы маскируем этот факт при помощи технических терминов, в которых зашифрованы путешествия во времени.



Кип Торн

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

странство 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).

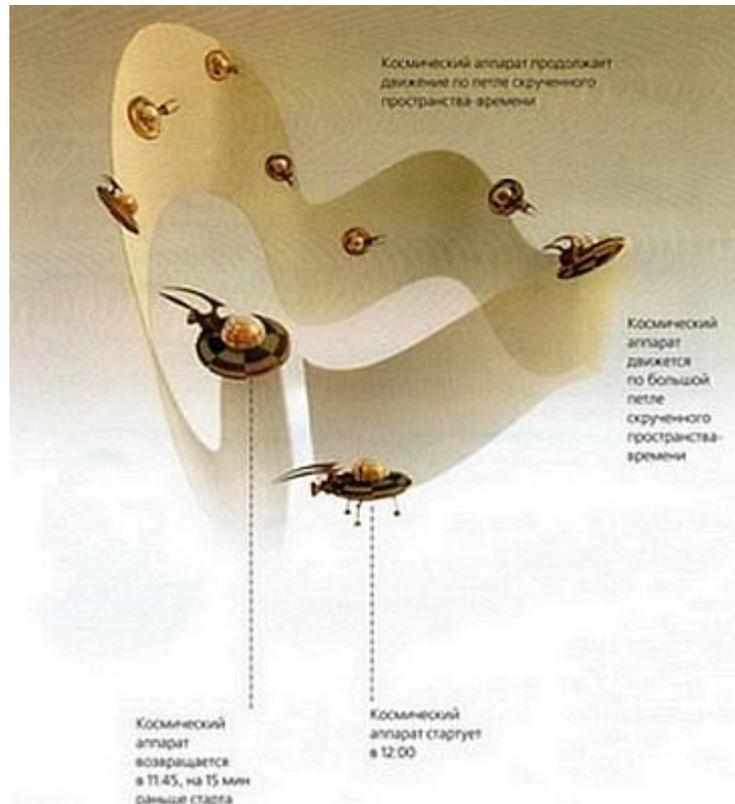


Рис. 5.1

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).



Рис. 5.2. Вторая вариация на тему парадоксальных близнецов



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)?

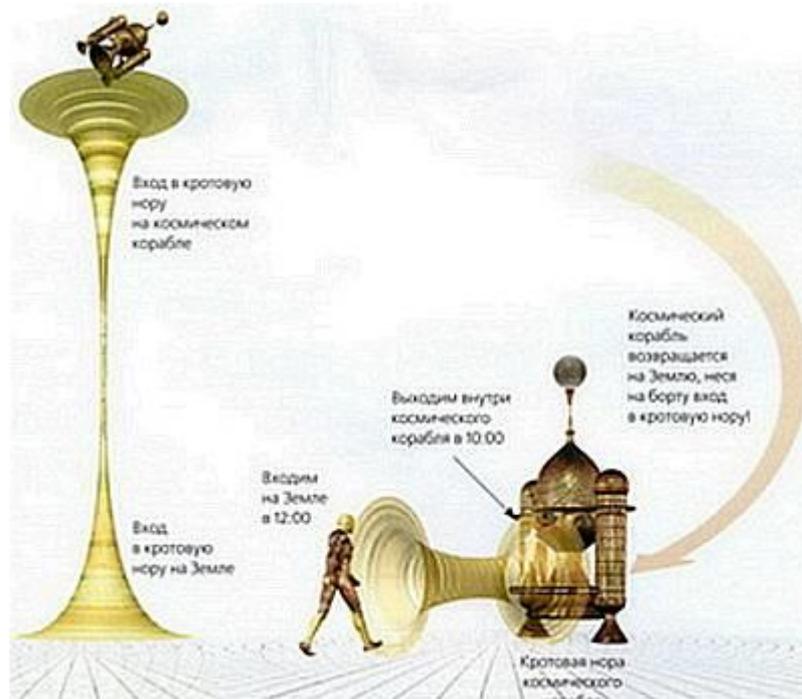


Рис. 5.3. Может ли пуля пролететь через хроновую нору в прошлое и попасть в того, кто ее выпустил?

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 линии.¹⁴ 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».

ЗАЩИЩАЯ ПРОШЛОЕ

¹⁴ **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.



(1) Если бы существовала очень короткая хроновая нора, вы могли выйти из нее в тот же момент, что и вошли

(2) Можно представить себе, что один конец кротовой норы отправляется в дальнее 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.

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 флуктуации.

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.

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 пространст-во-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).



Рис. 5.4. Допускает ли пространство-время существование замкнутых времениподобных кривых, вновь и вновь возвращающихся к своей исходной точке?

Решение Гёделя требовало введения космологической постоянной, которой может в реальности и не быть, но позднее были найдены подобные решения без космологической постоянной. Особенно интересен случай, когда две космические струны движутся друг мимо друга на высокой скорости.

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.

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).

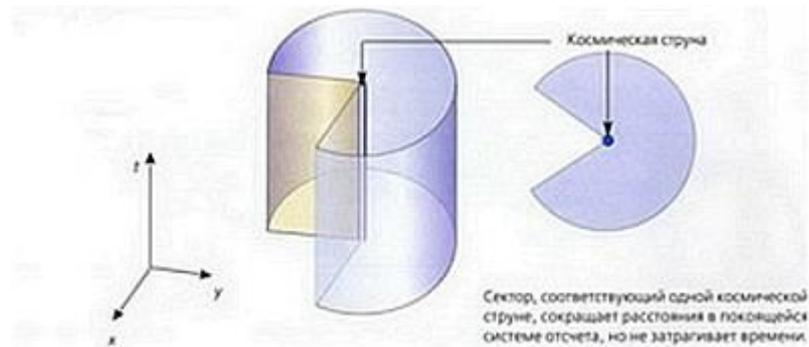
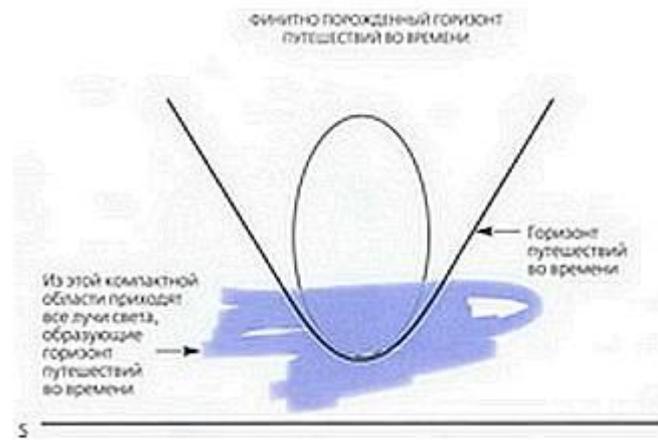


Рис. 5.6. Космическая струна вырезает сектор из пространства-времени

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.





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 конспи-рологические 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 обращусь 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 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.

Может ли некая высокоразвитая цивилизация построить машину времени?

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).



Рис. 5.9. Опасность путешествия во времени



Эти результаты не зависят от уравнения Эйнштейна, а только от того, каким образом про-

странство-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.



Мой внук Уильям Макензи-Смит

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 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).

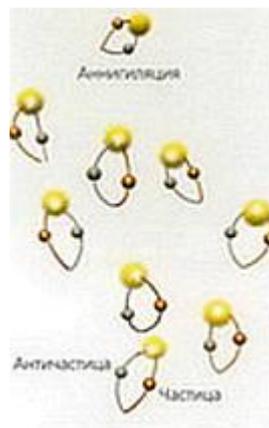


Рис. 5.10

Один из элементов виртуальной пары будет иметь положительную энергию, а другой – отрицательную. При наличии черной дыры частица с отрицательной энергией 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).

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.

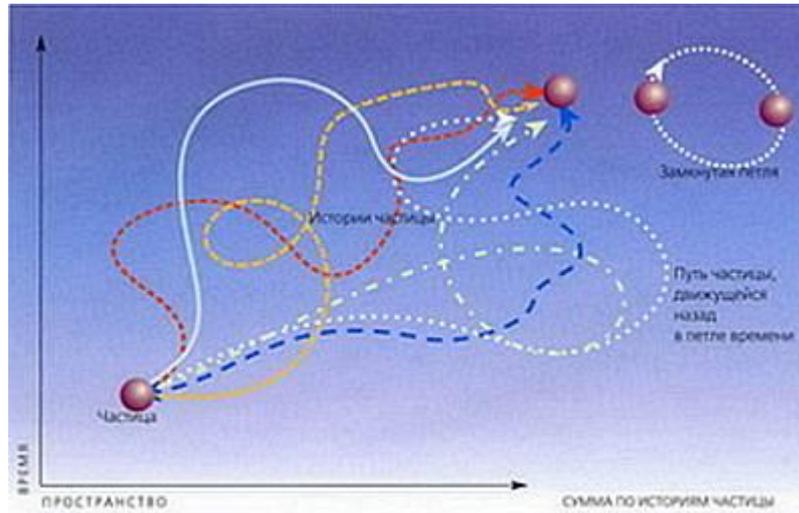
Обычная материя с положительной плотностью энергии порождает притягивающую гравитационную силу и искривляет пространство-время так, что лучи поворачивают друг к другу, в точности как шар на резиновом листе из главы 2 всегда заворачивает маленький шарик к себе и никогда – прочь.

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»?).



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

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

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

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).

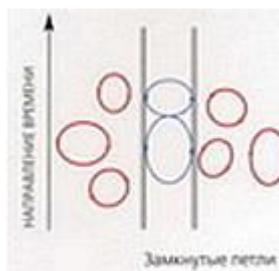


Рис. 5.13

Тогда возникает вопрос: почему такие путешествия не происходят повсеместно? Ответ состоит в том, что перемещения во времени на самом деле имеют место в микроскопическом мас-

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

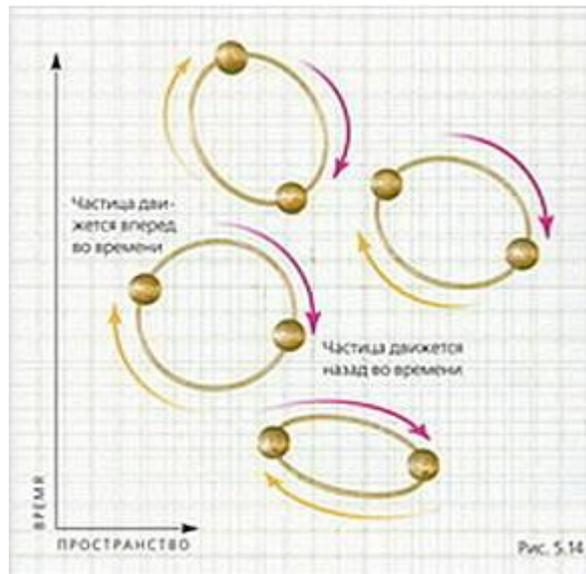


Рис. 5.14

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 имеют 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?

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.

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 называемыми

мой 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).

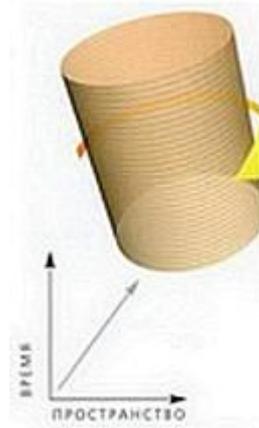


Рис. 5.16

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 пространстве 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.

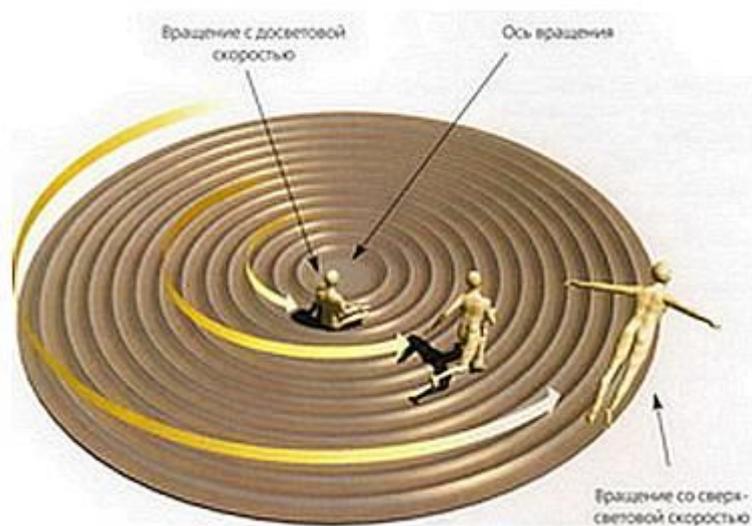


Рис. 5.17

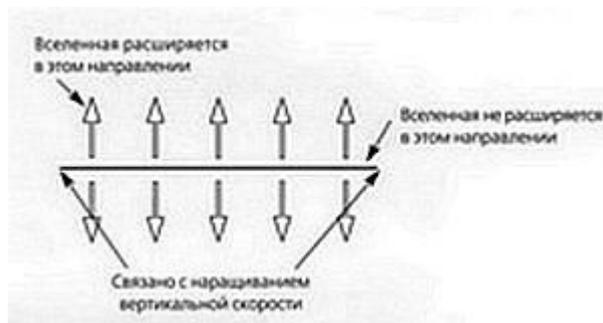


Рис. 5.18. Фон с замкнутыми времениподобными кривыми

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

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



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.

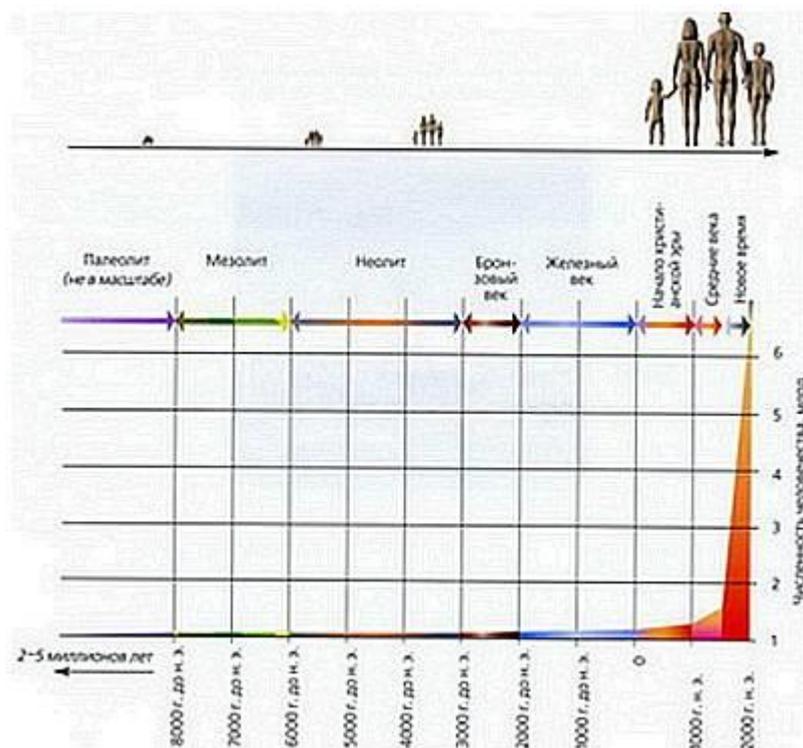


Хотя временные петли разрешены при суммировании по историям, их вероятности получаются чрезвычайно низкими. Основываясь на упоминавшихся выше соотношениях дуальности, я оценил вероятность того, что Кип Торн сможет отправиться в прошлое и убить своего дедушку: она оказалась меньше чем единица к десяти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

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 $1/1010$.

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

Глава 6. Наше будущее: звездный путь или нет?

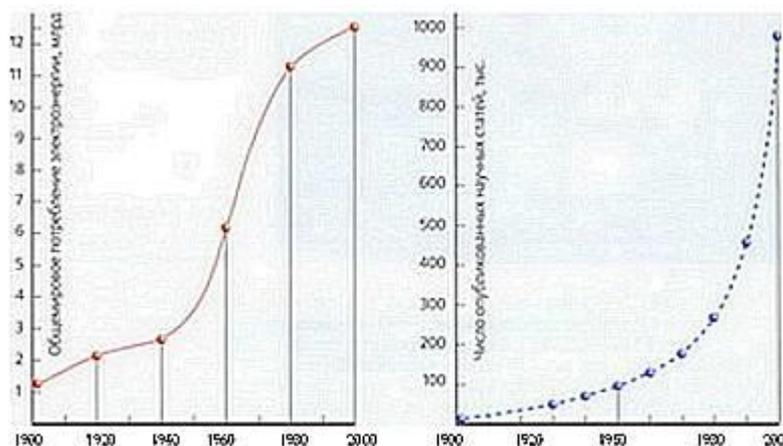
О том, как биологическая и электронная жизнь будут все быстрее и быстрее усложняться



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

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.



Слева: Общепланетное потребление электроэнергии (тонна ВСУ – эквивалентная тонна битуминозного угля, 1 тонна ВСУ = 8,13 МВт-ч).

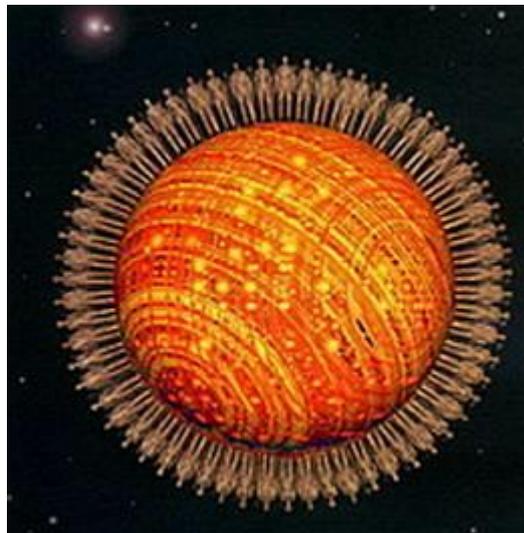
Справа: Количество (тыс.) ежегодно публикуемых научных статей. В 1900 г. опубликовано около 9 тыс. статей. К 1950 г. их стало появляться около 90 тыс., а к 2000 г. – около 900 тыс.

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 смерть¹⁵ (рис. 6.1).

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 нашего

¹⁵ **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).

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).



Рис. 6.3

В сериале «Звездный путь» вся история зависит от звездолета «Эн-терпрайз» 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.

С другой стороны, мы уже знаем законы, которые соблюдаются во всех ситуациях, кроме самых критических, – законы, которым подчиняется экипаж «Энтерпрайза», если не сам звездолет. 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: аде-нин, 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 репродуцированию, 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 репродуцирование. 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 примерно до одного бита в год на протяжении нескольких последних миллионов лет.¹⁶ 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 естественного 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).

¹⁶ За что в 1962 г. были удостоены Нобелевской премии по физиологии и медицине.

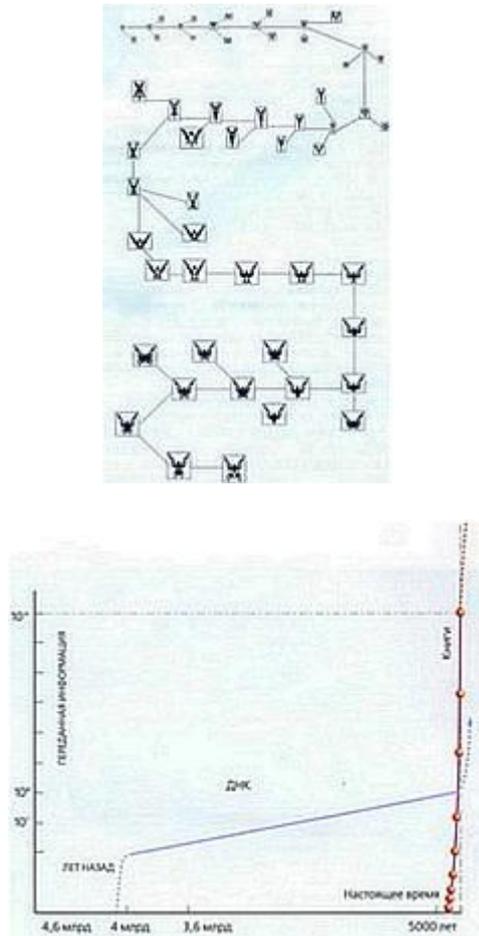


Рис. 6.5. Рост сложности с момента образования Земли (не масштабе)

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

Жизнеспособность того или иного штамма зависела оттого, 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).

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.¹⁷

¹⁷ 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.

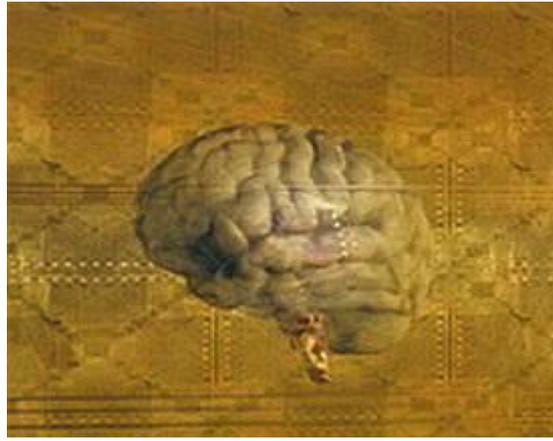
Конечно, все приведенные цифры крайне приблизительны. Если считать только текстовую информацию в новых книгах, то получится меньше миллиона бит в секунду. Но если те же книги посчитать как графику с высоким разрешением, то новой информации окажется в сотни раз больше. С учетом журналов и газет оценка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



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



Эта передача данных по внешним, небологическим 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 несовершенствованными людьми. Мои намерения состоят не в том, 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.



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

НАШЕ БУДУЩЕЕ: ЗВЕЗДНЫЙ ПУТЬ ИЛИ НЕТ?

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.

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).

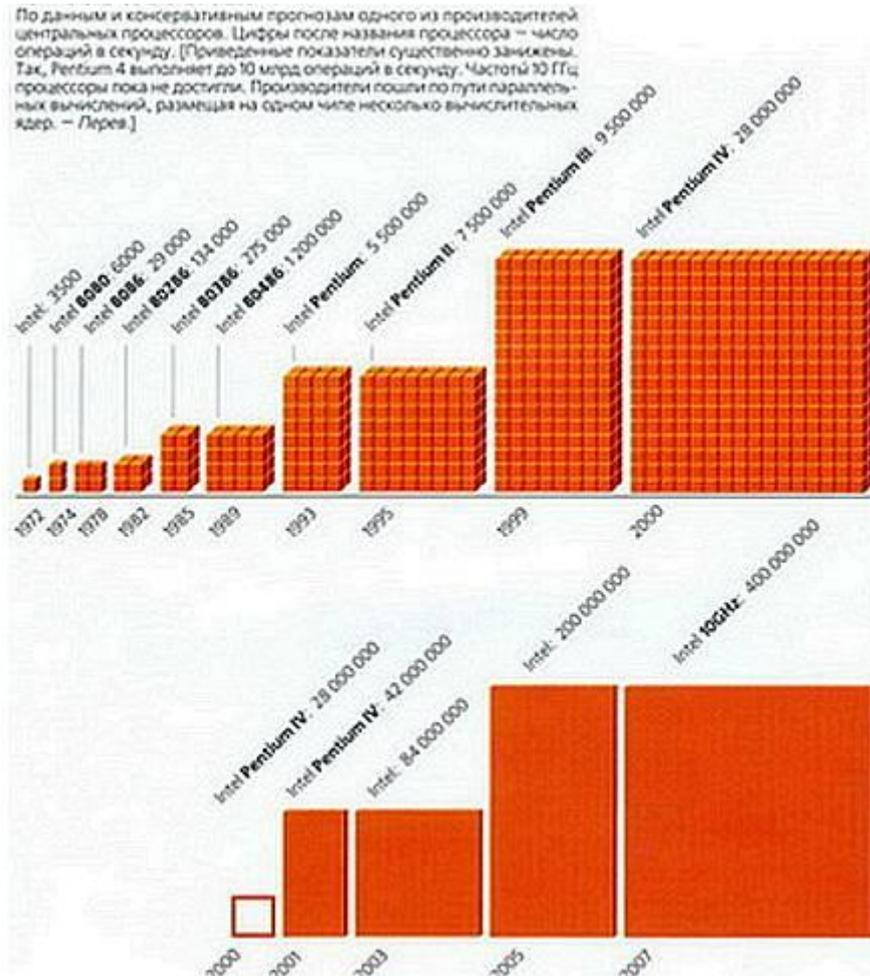


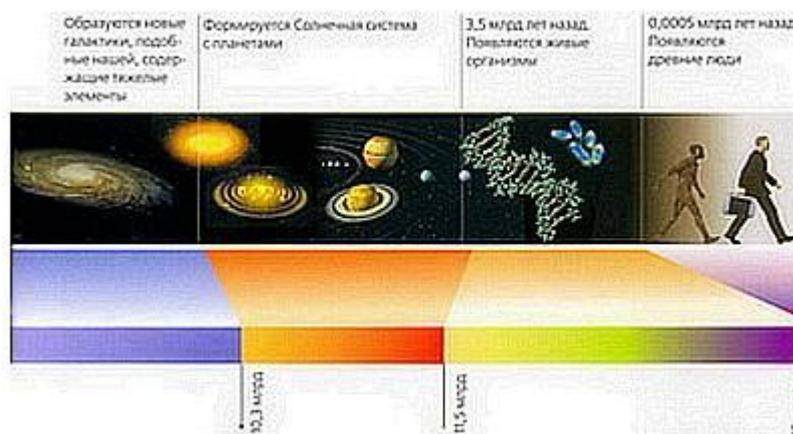
Рис. 6.6. Экспоненциальный рост вычислительной мощности компьютеров с 1972 по 2007 г.

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 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.



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.



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 мудрыми, 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.



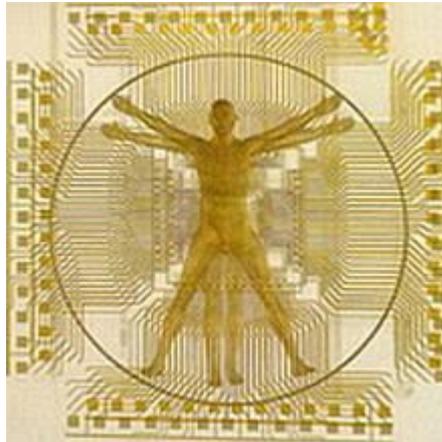
Для электронных цепей характерна та же проблема «сложность против скорости», что и для человеческого мозга. В этом случае, однако, сигналы – электрические, а не биохимические – распространяются со скоростью света, которая много выше. Тем не менее скорость света уже стала на практике ограничивающим фактором 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 киберсдружества 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, преобразив 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.

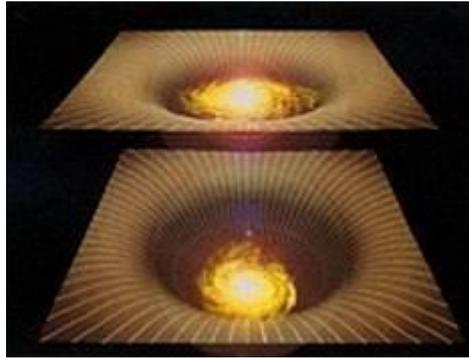


Способен ли разум стать мозгом долгосрочного выживания

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

навелись к нам, это было бы очевидно: скорее как в фильме «День независимости», чем в «Инопланетяине».



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. Немногое 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.

Глава 7. О дивный браны мир

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

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 неизвестным (рис. 7.1). Фактически мы не сможем сказать, что нашли Теорию Всего, пока не заполним эту дыру.



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.

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 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).

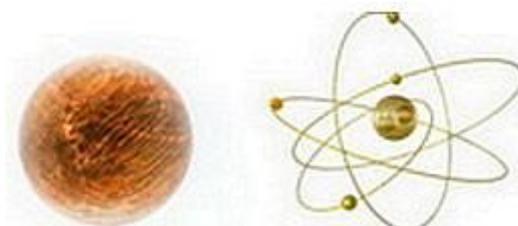


Рис. 7.2.

Слева. Классический неделимый атом.

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

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.



Рис. 7.3 Протон (вверху) и нейтрон (внизу)

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).

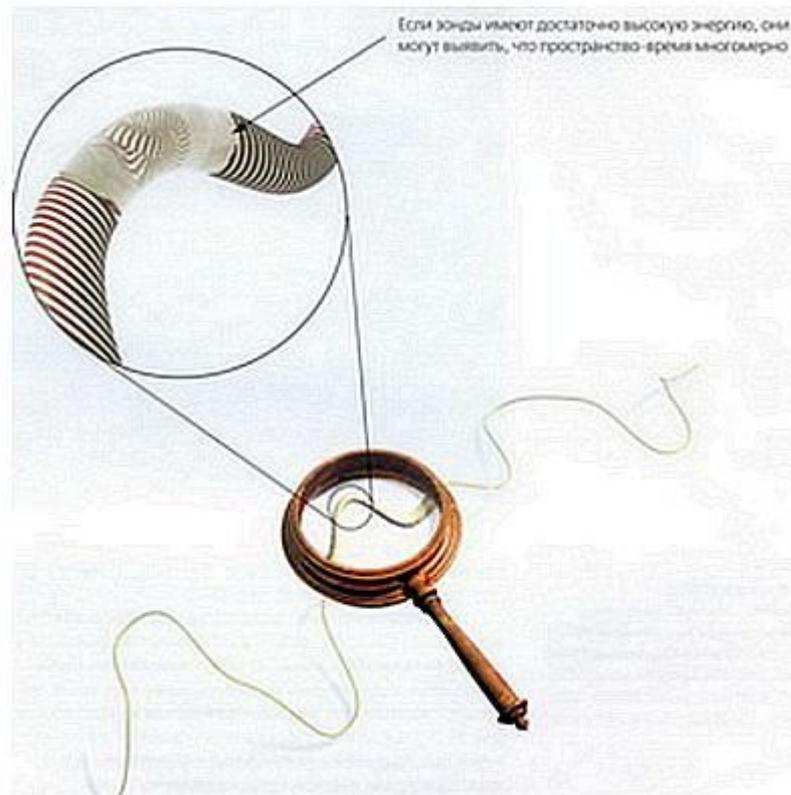


Рис. 7.6.

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.

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

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.

О ДИВНЫЙ БРАНЫ МИР

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).

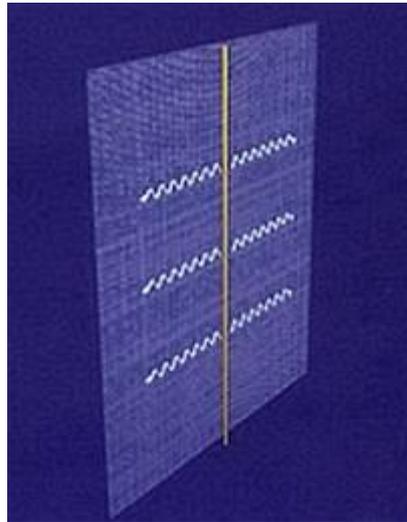


Рис. 7.7. Миры на Бране

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).

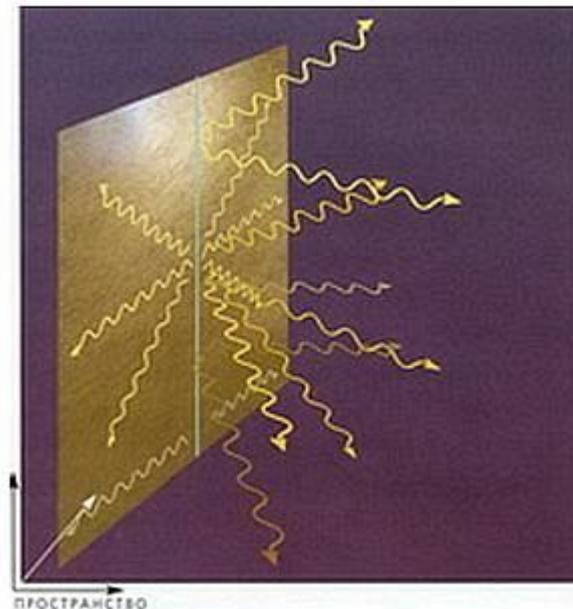


Рис. 7.8. Гравитация может распространяться в дополнительные измерения, так же как и вдоль браны, и в таком случае должна ослабевать с расстоянием быстрее, чем в четырех измерениях.

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 спадание 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).

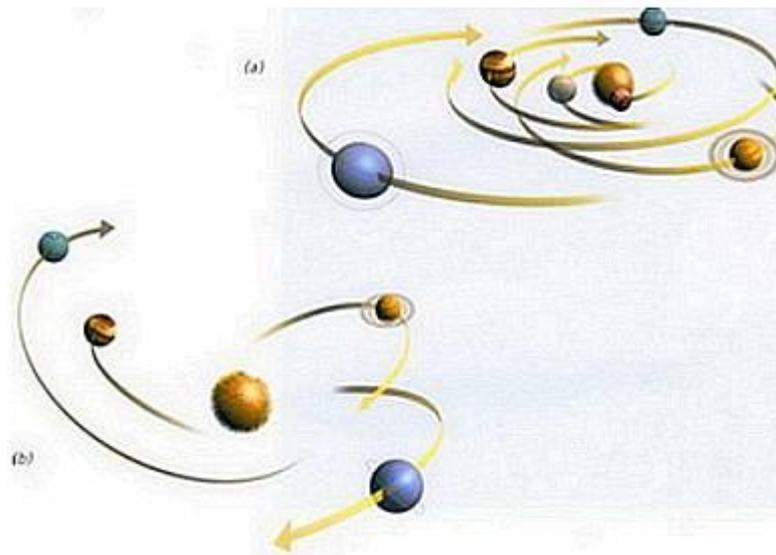


Рис. 7.9

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).

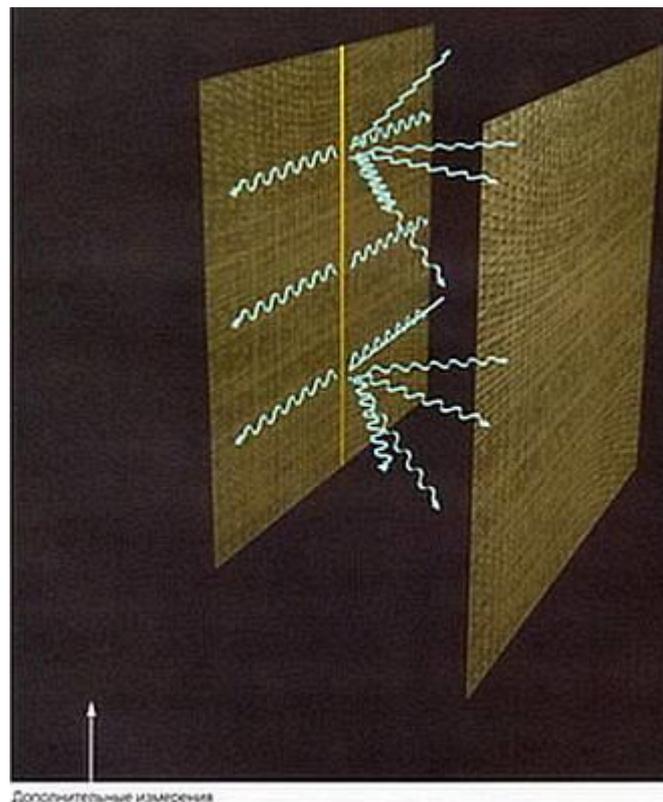


Рис. 7.10

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

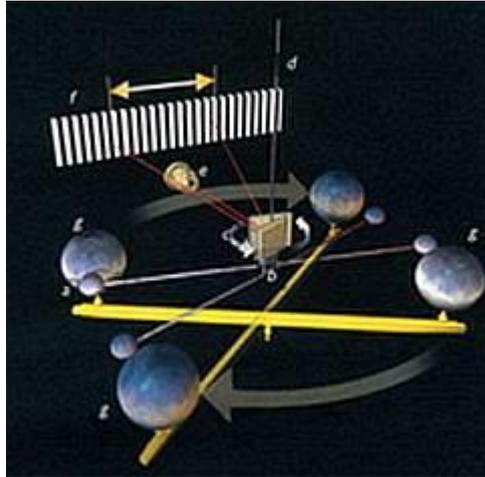


Рис. 7.11

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.

ЭКСПЕРИМЕНТ КАВЕНДИША

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

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

Если в таком мире бран мы жили бы на одной бране, то рядом имели бы другую – «теневую». Поскольку свет привязан к бранам и 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).

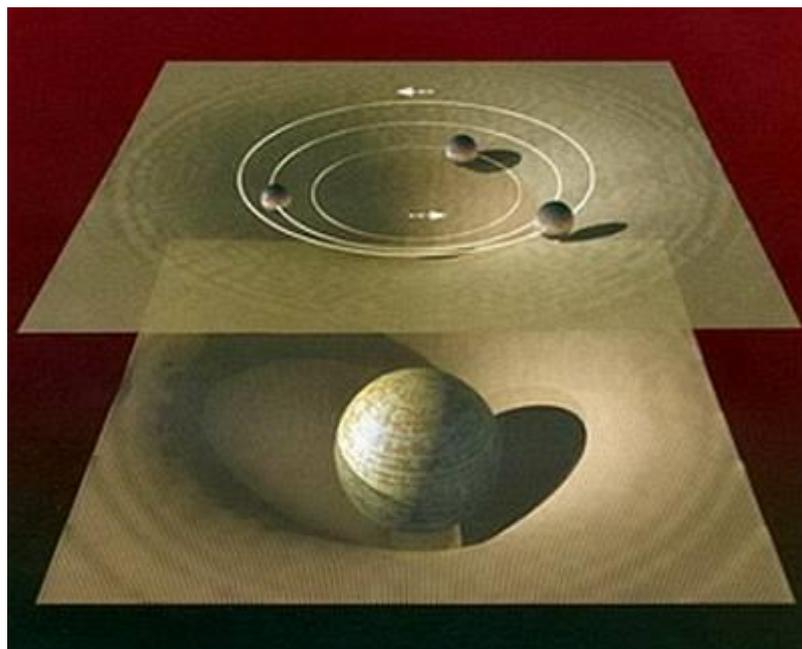


Рис. 7.12

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 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.

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