
ЭВРИКА

СТИВЕН ХОКИНГ

Краткая история времени

от большого взрыва до черных дыр



Санкт-Петербург
АМФОРА / ЗВРИКА
2001

ББК 84.4 Вл
Х 70

STEPHEN W. HAWKING
A Brief History of Time
From the Big Bang to Black Holes

Перевод с английского Н. Я. Смородинской

Дизайн Вадима Назарова
Оформление Алексея Горбачева

Публикуется с согласия издательства Writers House LLC и литературного агентства Synopsis

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

Хокинг С.
Х70 Краткая история времени: От большого взрыва до черных дыр / Пер. с англ. Н. Смородинской.— СПб.: Амфора, 2001. — 268 с.
ISBN 5-94278-091-9

© 1988 by Stephen W Hawking
© Н. Смородинская, перевод, 1990
© «Амфора», оформление, 2001

ISBN 5-94278-091-9

БЛАГОДАРНОСТИ

Книга посвящается Джейн

Я решил попробовать написать популярную книгу о пространстве и времени после того, как прочитал в 1982 г. курс Лёбовских лекций в Гарварде. Тогда уже было немало книг, посвященных ранней Вселенной и черным дырам, как очень хороших, например книга Стивена Вайнберга «Первые три минуты», так и очень плохих, которые здесь незачем называть. Но мне казалось, что ни в одной из них фактически не затрагиваются те вопросы, которые побудили меня заняться изучением космологии и квантовой теории: откуда взялась Вселенная? как и почему она возникла? придет ли ей конец, а если придет, то как? Эти вопросы интересуют всех нас. Но современная наука очень насыщена математикой, и лишь немногочисленные специалисты достаточно владеют последней, чтобы разобраться в этом. Однако основные представления о рождении и дальнейшей судьбе Вселенной можно изложить и без помощи математики так, что они станут понятны даже людям, не получившим научного образования. Это я и пытался сделать в моей книге. Читателю судить о том, насколько я преуспел.

Мне сказали, что каждая включенная в книгу формула вдвое уменьшит число покупателей. Тогда я решил вообще обходиться без формул. Правда, в конце

я все-таки написал одно уравнение — знаменитое уравнение Эйнштейна $E = mc^2$. Надеюсь, оно не отпугнет половину моих потенциальных читателей.

Если не считать того, что я заболел боковым амиотрофическим склерозом, то почти во всем остальном мне сопутствовала удача. Помощь и поддержка, которые мне оказывали моя жена Джейн и дети Роберт, Люси и Тимоти, обеспечили мне возможность вести довольно-таки нормальный образ жизни и добиться успехов в работе. Мне повезло и в том, что я выбрал теоретическую физику, ибо она вся вмещается в голове. Поэтому моя физическая немощь не стала серьезным минусом. Мои научные коллеги, все без исключения, оказывали мне всегда максимальное содействие.

На первом, «классическом» этапе моей работы моими ближайшими помощниками и сотрудниками были Роджер Пенроуз, Роберт Герок, Брендон Картер и Джордж Эллис. Я благодарен им за помощь и за совместную работу. Этот этап завершился изданием книги «Крупномасштабная структура пространства-времени», которую мы с Эллисом написали в 1973 г[1]. Я бы не советовал читающим следующие далее страницы обращаться к ней за дополнительной информацией: она перегружена математикой и тяжела для чтения. Надеюсь, что с тех пор я научился писать более доступно.

На втором, «квантовом» этапе моей работы, начавшемся в 1974 г., я в основном работал с Гари Гиббонсом, Доном Пэйджем и Джимом Хартлом. Я очень

---

[1] *Хокинг С., Эллис Дж.* Крупномасштабная структура пространства-времени. — М.: Мир, 1976.

многим им обязан, как и своим аспирантам, которые оказывали мне огромную помощь и в «физическом», и в «теоретическом» смысле этого слова. Необходимость не отставать от аспирантов была чрезвычайно важным стимулом и, как мне кажется, не позволяла мне застрять в болоте.

В работе над книгой мне очень много помогал Брайен Уитт, один из моих студентов. В 1985 г., набросав первый, примерный план книги, я заболел воспалением легких. Пришлось лечь на операцию, и после трахеотомии я перестал говорить, а тем самым почти лишился возможности общаться. Я думал, что не смогу закончить книгу. Но Брайен не только помог мне ее переработать, но и научил пользоваться компьютерной программой общения Living Center, которую мне подарил Уолт Уолтош, сотрудник фирмы Words Plus, Inc., Саннивейл (шт. Калифорния). С ее помощью я могу писать книги и статьи, а также разговаривать с людьми посредством синтезатора речи, подаренного мне другой саннивейлской фирмой Speech Plus. Дэвид Мэйсон установил на моем кресле-коляске этот синтезатор и небольшой персональный компьютер. Такая система все изменила: мне стало даже легче общаться, чем до того как я потерял голос.

Многим из тех, кто ознакомился с предварительными вариантами книги, я благодарен за советы, касающиеся того, как ее можно было бы улучшить. Так, Петер Газзарди, мой редактор издательства Bantam Books, слал мне письмо за письмом с замечаниями и вопросами по тем местам, которые, по его мнению, были плохо объяснены. Признаться, я был сильно раздражен, получив огромный список рекомендуе-

мых исправлений, но Газзарди оказался совершенно прав. Я уверен, книга стала лучше благодаря тому, что Газзарди тыкал меня носом в ошибки.

Я выражаю глубокую благодарность моим помощникам Колину Уилльямсу, Дэвиду Томасу и Рэймонду Лэфлемму, моим секретарям Джуди Фелле, Энн Ральф, Шерил Биллингтон и Сью Мэйси и моим медсестрам. Я бы ничего не смог достичь, если бы все расходы на научные исследования и необходимую медицинскую помощь не взяли на себя Гонвилл-энд-Кайюс-колледж, Совет по научным и техническим исследованиям и фонды Леверхулма, Мак-Артура, Нуффилда и Ральфа Смита. Всем им я очень благодарен.

Стивен Хокинг

20 октября 1987 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мы живем, почти ничего не понимая в устройстве мира. Не задумываемся над тем, какой механизм порождает солнечный свет, который обеспечивает наше существование, не думаем о гравитации, которая удерживает нас на Земле, не давая ей сбросить нас в пространство. Нас не интересуют атомы, из которых мы состоим и от устойчивости которых мы сами существенным образом зависим. За исключением детей (которые еще слишком мало знают, чтобы не задавать такие серьезные вопросы), мало кто ломает голову над тем, почему природа такова, какова она есть, откуда появился космос и не существовал ли он всегда? не может ли время однажды повернуть вспять, так что следствие будет предшествовать причине? есть ли непреодолимый предел человеческого познания? Бывают даже такие дети (я их встречал), которым хочется знать, как выглядит черная дыра, какова самая маленькая частичка вещества? почему мы помним прошлое и не помним будущее? если раньше и правда был хаос, то как получилось, что теперь установился видимый порядок? и почему Вселенная вообще существует?

В нашем обществе принято, что родители и учителя в ответ на эти вопросы большей частью пожимают плечами или призывают на помощь смутно сохранив-

шиеся в памяти ссылки на религиозные легенды. Некоторым не нравятся такие темы, потому что в них живо обнаруживается узость человеческого понимания.

Но развитие философии и естественных наук продвигалось вперед в основном благодаря подобным вопросам. Все больше взрослых людей проявляют к ним интерес, и ответы иногда бывают совершенно неожиданными для них. Отличаясь по масштабам как от атомов, так и от звезд, мы раздвигаем горизонты исследований, чтобы охватить как очень маленькие, так и очень большие объекты.

Весной 1974 г., примерно за два года до того, как космический аппарат «Викинг» достиг поверхности Марса, я был в Англии на конференции, организованной Лондонским королевским обществом и посвященной возможностям поиска внеземных цивилизаций. Во время перерыва на кофе я обратил внимание на гораздо более многолюдное собрание, проходившее в соседнем зале, и из любопытства вошел туда. Так я стал свидетелем давнего ритуала — приема новых членов в Королевское общество, которое является одним из старейших на планете объединений ученых. Впереди молодой человек, сидевший в инвалидном кресле, очень медленно выводил свое имя в книге, предыдущие страницы которой хранили подпись Исаака Ньютона. Когда он, наконец, кончил расписываться, зал разразился овацией. Стивен Хокинг уже тогда был легендой.

Сейчас Хокинг в Кембриджском университете занимает кафедру математики, которую когда-то занимал Ньютон, а позже П. А. М. Дирак — два знаменитых исследователя, изучавшие один — самое большое, а другой — самое маленькое. Хокинг — их достойный

преемник. Эта первая популярная книга Хокинга содержит массу полезных вещей для широкой аудитории. Книга интересна не только широтой своего содержания, она позволяет увидеть, как работает мысль ее автора. Вы найдете в ней ясные откровения о границах физики, астрономии, космологии и мужества.

Но это также книга о Боге... а может быть, об отсутствии Бога. Слово «Бог» часто появляется на ее страницах. Хокинг отправляется на поиски ответа на знаменитый вопрос Эйнштейна о том, был ли у Бога какой-нибудь выбор, когда он создавал Вселенную. Хокинг пытается, как он сам пишет, разгадать замысел Бога. Тем более неожиданным оказывается вывод (по меньшей мере временный), к которому приводят эти поиски: Вселенная без края в пространстве, без начала и конца во времени, без каких-либо дел для Создателя.

Карл Саган
Корнеллский университет
Итака, шт. Нью-Йорк

1
Наше представление о Вселенной

Как-то один известный ученый (говорят, это был Бертран Рассел) читал публичную лекцию об астрономии. Он рассказывал, как Земля обращается вокруг Солнца, а Солнце, в свою очередь, обращается вокруг центра огромного скопления звезд, которое называют нашей Галактикой. Когда лекция подошла к концу, из последних рядов зала поднялась маленькая пожилая леди и сказала: «Все, что вы нам говорили, — чепуха. На самом деле наш мир — это плоская тарелка, которая стоит на спине гигантской черепахи». Снисходительно улыбнувшись, ученый спросил: «А на чем держится черепаха?» — «Вы очень умны, молодой человек, — ответила пожилая леди. — Черепаха — на другой черепахе, та — тоже на черепахе, и так все ниже и ниже».

Такое представление о Вселенной как о бесконечной башне из черепах большинству из нас покажется смешным, но почему мы думаем, что сами знаем лучше? Что нам известно о Вселенной, и как мы это узнали? Откуда взялась Вселенная, и что с ней станется? Было ли у Вселенной начало, а если было, то что происходило *до начала*? Какова сущность времени? Кончится ли оно когда-нибудь? Достижения физики последних лет, которыми мы частично обязаны фантастической новой технике, позволяют на-

конец получить ответы хотя бы на отдельные из таких давно поставленных вопросов. Пройдет время, и эти ответы, может быть, станут столь же очевидными, как то, что Земля вращается вокруг Солнца, а может быть, столь же нелепыми, как башня из черепах. Только время (чем бы оно ни было) решит это.

Еще в 340 г. до н. э. греческий философ Аристотель в своей книге «О небе» привел два веских довода в пользу того, что Земля не плоская тарелка, а круглый шар. Во-первых, Аристотель догадался, что лунные затмения происходят тогда, когда Земля оказывается между Луной и Солнцем. Земля всегда отбрасывает на Луну круглую тень, а это может быть лишь в том случае, если Земля имеет форму шара. Будь Земля плоским диском, ее тень имела бы форму вытянутого эллипса, если только затмение не происходит всегда именно в тот момент, когда Солнце находится точно на оси диска. Во-вторых, по опыту своих путешествий греки знали, что в южных районах Полярная звезда на небе располагается ниже, чем в северных. (Поскольку Полярная звезда находится над Северным полюсом, она будет прямо над головой наблюдателя, стоящего на Северном полюсе, а человеку на экваторе покажется, что она на линии горизонта). Зная разницу в кажущемся положении Полярной звезды в Египте и Греции, Аристотель сумел даже вычислить, что длина экватора равна 400 000 стадиев. Что такое стадий, точно неизвестно, но он близок к 200 метрам, и, стало быть, оценка Аристотеля примерно в 2 раза больше значения, принятого сейчас. У греков был еще и третий довод в пользу шарообразной формы Земли: если Земля не круглая, то почему же мы сначала видим паруса

корабля, поднимающиеся над горизонтом, и только потом сам корабль?

Аристотель думал, что Земля неподвижна, а Солнце, Луна, планеты и звезды обращаются вокруг нее по круговым орбитам. Он так полагал, ибо в соответствии со своими мистическими воззрениями Землю считал центром Вселенной, а круговое движение — самым совершенным. Птолемей во II веке развил идею Аристотеля в полную космологическую модель. Земля стоит в центре, окруженная восемью сферами, несущими на себе Луну, Солнце и пять известных тогда планет: Меркурий, Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн (рис. 1.1). Сами планеты, считал Птолемей, движутся по меньшим кругам, скрепленным с соответствующими сферами. Это объясняло тот весьма сложный путь, который, как мы видим, совершают планеты. На самой последней сфере располагаются неподвижные звезды, которые, оставаясь в одном и том же положении друг относительно друга, движутся по небу все вместе как единое целое. Что лежит за последней сферой, не объяснялось, но во всяком случае это уже не было частью той Вселенной, которую наблюдает человечество.

Модель Птолемея позволяла неплохо предсказывать положение небесных тел на небосводе, но для точного предсказания ему пришлось принять, что траектория Луны в одних местах подходит к Земле в 2 раза ближе, чем в других! Это означает, что в одном положении Луна должна казаться в 2 раза большей, чем в другом! Птолемей знал об этом недостатке, но тем не менее его теория была признана, хотя и не везде. Христианская Церковь приняла Птолемееву модель Вселенной как не противоречащую Библии,

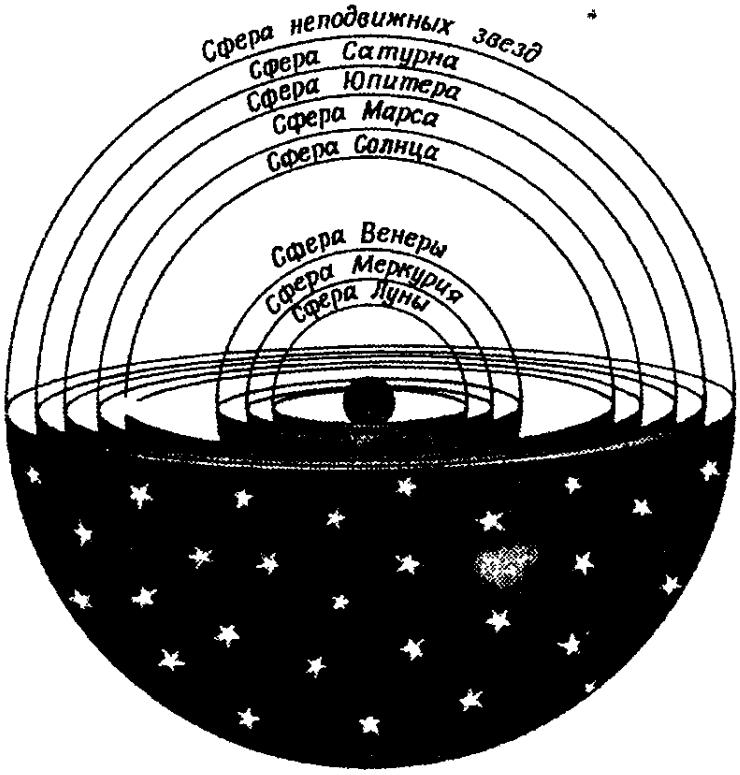


Рис. 1.1

ибо эта модель была очень хороша тем, что оставляла за пределами сферы неподвижных звезд много места для ада и рая. Однако в 1514 г. польский священник Николай Коперник предложил еще более простую модель. (Вначале, опасаясь, наверное, того, что Церковь объявит его еретиком, Коперник пропагандировал свою модель анонимно.) Его идея состояла в том, что Солнце стоит неподвижно в центре, а Земля и другие планеты обращаются вокруг него по круговым орбитам. Прошло почти столетие, прежде чем идею Коперника восприняли серьезно. Два астронома — немец Иоганн Кеплер и итальянец Галилео Галилей — публично выступили в поддержку теории Коперника, несмотря на то что предсказанные Коперником орбиты не совсем совпадали с наблюдаемыми. Теории Аристотеля—Птолемея пришел конец в 1609 г., когда Галилей начал наблюдать ночное

небо с помощью только что изобретенного телескопа. Направив телескоп на планету Юпитер, Галилей обнаружил несколько маленьких спутников, или лун, которые обращаются вокруг Юпитера. Это означало, что не все небесные тела должны обязательно обращаться непосредственно вокруг Земли, как считали Аристотель и Птолемей. (Разумеется, можно было по-прежнему считать, что Земля покоится в центре Вселенной, а лу́ны Юпитера движутся по очень сложному пути вокруг Земли, так что лишь *кажется*, будто они обращаются вокруг Юпитера. Однако теория Коперника была значительно проще.) В то же время Иоганн Кеплер модифицировал теорию Коперника, исходя из предположения, что планеты движутся не по окружностям, а по эллипсам (эллипс — это вытянутая окружность). Наконец-то теперь предсказания совпали с результатами наблюдений.

Что касается Кеплера, то его эллиптические орбиты были искусственной (ad hoc) гипотезой, и притом «неизящной», так как эллипс гораздо менее совершенная фигура, чем круг. Почти случайно обнаружив, что эллиптические орбиты хорошо согласуются с наблюдениями, Кеплер так и не сумел примирить этот факт со своей идеей о том, что планеты обращаются вокруг Солнца под действием магнитных сил. Объяснение пришло лишь гораздо позднее, в 1687 г., когда Исаак Ньютон опубликовал свою книгу «Математические начала натуральной философии». Ньютон в ней не только выдвинул теорию движения материальных тел во времени и пространстве, но и разработал сложные математические методы, необходимые для анализа движения небесных тел. Кроме того, Ньютон постулировал закон всемирного тяго-

тения, согласно которому всякое тело во Вселенной притягивается к любому другому телу с тем большей силой, чем больше массы этих тел и чем меньше расстояние между ними. Это та самая сила, которая заставляет тела падать на землю. (Рассказ о том, что Ньютона вдохновило яблоко, упавшее ему на голову, почти наверняка недостоверен. Сам Ньютон сказал об этом лишь то, что мысль о тяготении пришла, когда он сидел в «созерцательном настроении», и «поводом было падение яблока».) Далее Ньютон показал, что, согласно его закону, Луна под действием гравитационных сил движется по эллиптической орбите вокруг Земли, а Земля и планеты вращаются по эллиптическим орбитам вокруг Солнца.

Модель Коперника помогла избавиться от Птолемеевых небесных сфер, а заодно и от представления о том, что Вселенная имеет какую-то естественную границу. Поскольку «неподвижные звезды» не изменяют своего положения на небе, если не считать их кругового движения, связанного с вращением Земли вокруг своей оси, естественно было предположить, что неподвижные звезды — это объекты, подобные нашему Солнцу, только гораздо более удаленные.

Ньютон понимал, что по его теории тяготения звезды должны притягиваться друг к другу и поэтому, казалось бы, не могут оставаться совсем неподвижными. Не должны ли они упасть друг на друга, сблизившись в какой-то точке? В 1691 г. в письме Ричарду Бентли, еще одному выдающемуся мыслителю того времени, Ньютон говорил, что так действительно должно было бы произойти, если бы у нас было лишь конечное число звезд в конечной области пространства. Но, рассуждал Ньютон, если число звезд беско-

нечно и они более или менее равномерно распределены по бесконечному пространству, то этого никогда не произойдет, так как нет центральной точки, куда им нужно было бы падать.

Эти рассуждения — пример того, как легко попасть впросак, ведя разговоры о бесконечности. В бесконечной Вселенной любую точку можно считать центром, так как по обе стороны от нее число звезд бесконечно. Лишь гораздо позже поняли, что более правильный подход — взять конечную систему, в которой все звезды падают друг на друга, стремясь к центру, и посмотреть, какие будут изменения, если добавлять еще и еще звезд, распределенных приблизительно равномерно вне рассматриваемой области. По закону Ньютона дополнительные звезды в среднем никак не повлияют на первоначальные, т. е. звезды будут с той же скоростью падать в центр выделенной области. Сколько бы звезд мы ни добавили, они всегда будут стремиться к центру. В наше время известно, что бесконечная статическая модель Вселенной невозможна, если гравитационные силы всегда остаются силами взаимного притяжения.

Интересно, каким было общее состояние научной мысли до начала XX в.: никому и в голову не пришло, что Вселенная может расширяться или сжиматься. Все считали, что Вселенная либо существовала всегда в неизменном состоянии, либо была сотворена в какой-то момент времени в прошлом примерно такой, какова она сейчас. Отчасти это, может быть, объясняется склонностью людей верить в вечные истины, а также особой притягательностью той мысли, что, пусть сами они состарятся и умрут, Вселенная останется вечной и неизменной.

Даже тем ученым, которые поняли, что ньютоновская теория тяготения делает невозможной статическую Вселенную, не приходила в голову гипотеза расширяющейся Вселенной. Они попытались модифицировать теорию, сделав гравитационную силу отталкивающей на очень больших расстояниях. Это практически не меняло предсказываемого движения планет, но зато позволяло бесконечному распределению звезд оставаться в равновесии, так как притяжение близких звезд компенсировалось отталкиванием от далеких. Но сейчас мы считаем, что такое равновесие оказалось бы неустойчивым. В самом деле, если в какой-то области звезды чуть-чуть сблизятся, то силы притяжения между ними возрастут и станут больше сил отталкивания, так что звезды будут и дальше сближаться. Если же расстояние между звездами чуть-чуть увеличится, то перевесят силы отталкивания и расстояние будет нарастать.

Еще одно возражение против модели бесконечной статической Вселенной обычно приписывается немецкому философу Генриху Олберсу, который в 1823 г. опубликовал работу, посвященную этой модели. На самом деле многие современники Ньютона занимались той же задачей, и статья Олберса была даже не первой среди работ, в которых высказывались серьезные возражения. Ее лишь первой стали широко цитировать. Возражение таково: в бесконечной статической Вселенной любой луч зрения должен упираться в какую-нибудь звезду. Но тогда небо даже ночью должно ярко светиться, как Солнце. Контраргумент Олберса состоял в том, что свет, идущий к нам от далеких звезд, должен ослабляться из-за поглощения в находящемся на его пути веществе.

Но в таком случае само это вещество должно нагреться и ярко светиться, как звезды. Единственная возможность избежать вывода о ярко, как Солнце, светящемся ночном небе — предположить, что звезды сияли не всегда, а загорелись в какой-то определенный момент времени в прошлом. Тогда поглощающее вещество, возможно, еще не успело разогреться или же свет далеких звезд еще не дошел до нас. Но возникает вопрос: почему зажглись звезды?

Конечно, проблема возникновения Вселенной занимала умы людей уже очень давно. Согласно ряду ранних космогоний и иудейско-христианско-мусульманским мифам, наша Вселенная возникла в какой-то определенный и не очень отдаленный момент времени в прошлом. Одним из оснований таких верований была потребность найти «первопричину» существования Вселенной. Любое событие во Вселенной объясняют, указывая его причину, т. е. другое событие, произошедшее раньше; подобное объяснение существования самой Вселенной возможно лишь в том случае, если у нее было начало. Другое основание выдвинул Блаженный Августин[1] в книге «Град Божий». Он указал на то, что цивилизация прогрессирует, а мы помним, кто совершил то или иное деяние и кто что изобрел. Поэтому человечество, а значит, вероятно, и Вселенная, вряд ли очень долго существуют. Блаженный Августин считал приемлемой дату сотворения Вселенной, соответствующую книге «Бытия»: приблизительно 5000 год до нашей эры. (Интересно, что эта дата не так уж далека от

[1] Православная Церковь считает Августина блаженным, а Католическая — святым. — *Прим. ред.*

конца последнего ледникового периода — 10 000 лет до н. э., который археологи считают началом цивилизации.)

Аристотелю же и большинству других греческих философов не нравилась идея сотворения Вселенной, так как она связывалась с божественным вмешательством. Поэтому они считали, что люди и окружающий их мир существовали и будут существовать вечно. Довод относительно прогресса цивилизации ученые древности рассматривали и решили, что в мире периодически происходили потопы и другие катаклизмы, которые все время возвращали человечество к исходной точке цивилизации.

Вопросы о том, возникла ли Вселенная в какой-то начальный момент времени и ограничена ли она в пространстве, позднее весьма пристально рассматривал философ Иммануил Кант в своем монументальном (и очень темном) труде «Критика чистого разума», который был издан в 1781 г. Он назвал эти вопросы антиномиями (т. е. противоречиями) чистого разума, так как видел, что в равной мере нельзя ни доказать, ни опровергнуть ни тезис о необходимости начала Вселенной, ни антитезис о ее вечном существовании. Тезис Кант аргументировал тем, что если бы у Вселенной не было начала, то всякому событию предшествовал бы бесконечный период времени, а это Кант считал абсурдом. В поддержку антитезиса Кант говорил, что если бы Вселенная имела начало, то ему предшествовал бы бесконечный период времени, а тогда спрашивается, почему Вселенная вдруг возникла в тот, а не другой момент времени? На самом деле аргументы Канта фактически одинаковы и для тезиса, и для антитезиса. Он исходит из молчаливого

предположения, что время бесконечно в прошлом независимо от того, существовала или не существовала вечно Вселенная. Как мы увидим ниже, до возникновения Вселенной понятие времени лишено смысла. На это впервые указал Блаженный Августин. Когда его спрашивали, чем занимался Бог до того, как создал Вселенную, Августин никогда не отвечал в том духе, что, мол, Бог готовил ад для тех, кто задает подобные вопросы. Нет, он говорил, что время — неотъемлемое свойство созданной Богом Вселенной и поэтому до возникновения Вселенной времени не было.

Когда большинство людей верило в статическую и неизменную Вселенную, вопрос о том, имела она начало или нет, относился, в сущности, к области метафизики и теологии. Все наблюдаемые явления можно было объяснить как с помощью теории, в которой Вселенная существует вечно, так и с помощью теории, согласно которой Вселенную сотворили в какой-то определенный момент времени таким образом, чтобы все выглядело, как если бы она существовала вечно. Но в 1929 г. Эдвин Хаббл сделал эпохальное открытие: оказалось, что в какой бы части неба ни вести наблюдения, все далекие галактики быстро удаляются от нас. Иными словами, Вселенная расширяется. Это означает, что в более ранние времена все объекты были ближе друг к другу, чем сейчас. Значит, было, по-видимому, время, около десяти или двадцати тысяч миллионов лет назад, когда они все находились в одном месте, так что плотность Вселенной была бесконечно большой. Сделанное Хабблом открытие перевело вопрос о том, как возникла Вселенная, в область компетенции науки.

Наблюдения Хаббла говорили о том, что было время — так называемый большой взрыв, когда Вселенная была бесконечно малой и бесконечно плотной. При таких условиях все законы науки теряют смысл и не позволяют предсказывать будущее. Если в еще более ранние времена и происходили какие-либо события, они все равно никак не смогли бы повлиять на то, что происходит сейчас. Из-за отсутствия же наблюдаемых следствий ими можно просто пренебречь. Большой взрыв можно считать началом отсчета времени в том смысле, что более ранние времена были бы просто не определены. Подчеркнем, что такое начало отсчета времени очень сильно отличается от всего того, что предлагалось до Хаббла. Начало времени в неизменяющейся Вселенной есть нечто, что должно определяться чем-то, существующим вне Вселенной; для начала Вселенной нет физической необходимости. Сотворение Богом Вселенной можно в своем представлении относить к любому моменту времени в прошлом. Если же Вселенная расширяется, то могут существовать физические причины для того, чтобы она имела начало. Можно по-прежнему представлять себе, что именно Бог создал Вселенную — в момент большого взрыва или даже позднее (но так, как если бы произошел большой взрыв). Однако было бы абсурдно утверждать, что Вселенная возникла раньше большого взрыва. Представление о расширяющейся Вселенной не исключает создателя, но налагает ограничения на возможную дату его трудов!

Чтобы можно было говорить о сущности Вселенной и о том, было ли у нее начало и будет ли конец, нужно хорошо представлять себе, что такое научная

теория вообще. Я буду придерживаться простейшей точки зрения: теория — это теоретическая модель Вселенной или какой-нибудь ее части, дополненная набором правил, связывающих теоретические величины с нашими наблюдениями. Эта модель существует лишь у нас в голове и не имеет другой реальности (какой бы смысл мы ни вкладывали в это слово). Теория считается хорошей, если она удовлетворяет двум требованиям: во-первых, она должна точно описывать широкий класс наблюдений в рамках модели, содержащей лишь несколько произвольных элементов, и, во-вторых, теория должна давать вполне определенные предсказания относительно результатов будущих наблюдений. Например, теория Аристотеля, согласно которой все состоит из четырех элементов — земли, воздуха, огня и воды, — была достаточно простой, чтобы называться теорией, но с ее помощью нельзя было получить никаких определенных предсказаний. Теория же тяготения Ньютона исходила из еще более простой модели, в которой тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной некоторой величине, называемой их массой, и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Но теория Ньютона весьма точно предсказывает движение Солнца, Луны и планет.

Любая физическая теория всегда носит временный характер в том смысле, что является всего лишь гипотезой, которую нельзя доказать. Сколько бы раз ни констатировалось согласие теории с экспериментальными данными, нельзя быть уверенным в том, что в следующий раз эксперимент не войдет в противоречие с теорией. В то же время любую теорию можно опровергнуть, сославшись на одно-единственное наблюдение,

которое не согласуется с ее предсказаниями. Как указывал философ Карл Поппер, специалист в области философии науки, необходимым признаком хорошей теории является то, что она позволяет сделать предсказания, которые в принципе могут быть экспериментально опровергнуты. Всякий раз, когда новые эксперименты подтверждают предсказания теории, теория демонстрирует свою жизненность, и наша вера в нее крепнет. Но если хоть одно новое наблюдение не согласуется с теорией, нам приходится либо отказаться от нее, либо переделать. Такова по крайней мере логика, хотя, конечно, вы всегда вправе усомниться в компетентности того, кто проводил наблюдения.

На практике часто оказывается, что новая теория на самом деле является расширением предыдущей теории. Например, чрезвычайно точные наблюдения за планетой Меркурий выявили небольшие расхождения между ее движением и предсказаниями ньютоновской теории тяготения. Согласно общей теории относительности Эйнштейна, Меркурий должен двигаться немного иначе, чем получается в теории Ньютона. Тот факт, что предсказания Эйнштейна совпадают с результатами наблюдений, а предсказания Ньютона не совпадают, стал одним из решающих подтверждений новой теории. Правда, на практике мы до сих пор пользуемся теорией Ньютона, так как в тех случаях, с которыми мы обычно сталкиваемся, ее предсказания очень мало отличаются от предсказаний общей теории относительности. (Теория Ньютона имеет еще и то огромное преимущество, что с ней гораздо проще работать, чем с теорией Эйнштейна.)

Конечной целью науки является создание единой теории, которая описывала бы всю Вселенную. Решая

эту задачу, большинство ученых делят ее на две части. Первая часть — это законы, которые дают нам возможность узнать, как Вселенная изменяется со временем. (Зная, как выглядит Вселенная в какой-то один момент времени, мы с помощью этих законов можем узнать, что с ней произойдет в любой более поздний момент времени.) Вторая часть — проблема начального состояния Вселенной. Некоторые полагают, что наука должна заниматься только первой частью, а вопрос о том, что было вначале, считают делом метафизики и религии. Сторонники такого мнения говорят, что, поскольку Бог всемогущ, в его воле было «запустить» Вселенную как угодно. Если они правы, то у Бога была возможность сделать так, чтобы Вселенная развивалась совершенно произвольно. Бог же, по-видимому, предпочел, чтобы она развивалась весьма регулярно, по определенным законам. Но тогда столь же логично предположить, что существуют еще и законы, управляющие начальным состоянием Вселенной.

Оказывается, очень трудно сразу создавать теорию, которая описывала бы всю Вселенную. Вместо этого мы делим задачу на части и строим частные теории. Каждая из них описывает один ограниченный класс наблюдений и делает относительно него предсказания, пренебрегая влиянием всех остальных величин или представляя последние простыми наборами чисел. Возможно, что такой подход совершенно неправилен. Если все во Вселенной фундаментальным образом зависит от всего другого, то возможно, что, исследуя отдельные части задачи изолированно, нельзя приблизиться к полному ее решению. Тем не менее в прошлом наш прогресс шел именно таким путем. Классическим примером опять может служить

ньютоновская теория тяготения, согласно которой гравитационная сила, действующая между двумя телами, зависит только от одной характеристики каждого тела, а именно от его массы, но не зависит от того, из какого вещества состоят тела. Следовательно, для вычисления орбит, по которым движутся Солнце и планеты, не нужна теория их структуры и состава.

Сейчас есть две основные частные теории для описания Вселенной — общая теория относительности и квантовая механика. Обе они — результат огромных интеллектуальных усилий ученых первой половины нашего века. Общая теория относительности описывает гравитационное взаимодействие и крупномасштабную структуру Вселенной, т. е. структуру в масштабе от нескольких километров до миллиона миллиона миллиона миллиона (единица с двадцатью четырьмя нулями) километров, или до размеров наблюдаемой части Вселенной. Квантовая механика же имеет дело с явлениями в крайне малых масштабах, таких, как одна миллионная одной миллионной сантиметра. И эти две теории, к сожалению, несовместны — они не могут быть одновременно правильными. Одним из главных направлений исследований в современной физике и главной темой этой книги является поиск новой теории, которая объединила бы две предыдущие в одну — в квантовую теорию гравитации. Пока такой теории нет, и ее, может быть, еще придется долго ждать, но мы уже знаем многие из тех свойств, которыми она должна обладать. В следующих главах вы увидите, что нам уже немало известно о том, какие предсказания должны вытекать из квантовой теории гравитации.

Если вы считаете, что Вселенная развивается не произвольным образом, а подчиняется определен-

ным законам, то в конце концов вам придется объединить все частные теории в единую полную, которая будет описывать все во Вселенной. Правда, в поиски такой единой теории заложен один фундаментальный парадокс. Все сказанное выше о научных теориях предполагает, что мы являемся разумными существами, можем производить во Вселенной какие угодно наблюдения и на основе этих наблюдений делать логические заключения. В такой схеме естественно предположить, что в принципе мы могли бы еще ближе подойти к пониманию законов, которым подчиняется наша Вселенная. Но если единая теория действительно существует, то она, наверное, тоже должна каким-то образом влиять на наши действия. И тогда сама теория должна определять результат наших поисков ее же! А почему она должна заранее предопределять, что мы сделаем правильные выводы из наблюдений? Почему бы ей с таким же успехом не привести нас к неверным выводам? или же вообще ни к каким?

Я могу предложить всего лишь один ответ на эти вопросы. Он основан на дарвиновском принципе естественного отбора. Моя идея состоит в том, что в любой популяции организмов, способных к самовоспроизведению, неизбежны генетические вариации и различия в воспитании отдельных индивидуумов. Это значит, что некоторые индивидуумы более других способны делать правильные выводы об окружающем их мире и поступать в соответствии с этими выводами. У таких индивидуумов будет больше шансов выжить и дать потомство, а потому их образ мыслей и их поведение станут доминирующими. В прошлом интеллект и способность к научному открытию без-

условно обеспечивали преимущества в выживании. Правда, совсем не очевидно, что все сказанное верно и сейчас: сделанные нами научные открытия могут нас же и погубить, но даже если этого не случится, полная единая теория вряд ли сильно повлияет на наши шансы выжить. Тем не менее, коль скоро Вселенная развивается регулярным образом, можно полагать, что способности к рассуждению, которые мы приобрели в результате искусственного отбора, проявятся в поисках единой полной теории и помогут избежать неправильных выводов.

Поскольку уже существующих частных теорий вполне достаточно, чтобы делать точные предсказания во всех ситуациях, кроме самых экстремальных, поиск окончательной теории Вселенной не отвечает требованиям практической целесообразности. (Заметим, однако, что аналогичные возражения можно было бы выдвинуть против теории относительности и квантовой механики, а ведь именно эти теории произвели революцию в ядерной физике и в микроэлектронике!) Таким образом, открытие полной единой теории, может быть, не будет способствовать выживанию и даже никак не повлияет на течение нашей жизни. Но уже на заре цивилизации людям не нравились необъяснимые и не связанные между собой события, и они страстно желали понять тот порядок, который лежит в основе нашего мира. По сей день мы мечтаем узнать, почему мы здесь оказались и откуда взялись. Стремление человечества к знанию является для нас достаточным оправданием, чтобы продолжать поиск. А наша конечная цель — никак не меньше, чем полное описание Вселенной, в которой мы обитаем.

2
Пространство и время

Наши современные представления о законах движения тел восходят к Галилею и Ньютону. До них бытовала точка зрения Аристотеля, который считал, что естественным состоянием любого тела является состояние покоя и тело начинает двигаться только под действием силы или импульса. Отсюда следовало, что тяжелое тело должно падать быстрее, чем легкое, потому что его сильнее тянет к земле.

Согласно аристотелевской традиции, все законы, которые управляют Вселенной, можно вывести чисто умозрительно и нет никакой необходимости проверять их на опыте. Поэтому до Галилея никто не задумывался над тем, действительно ли тела разного веса падают с разными скоростями. Говорят, что Галилей демонстрировал ложность учения Аристотеля, бросая тела разного веса с падающей Пизанской башни. Это наверняка выдумка, но Галилей действительно делал нечто подобное: он скатывал по гладкому откосу шары разного веса. Такой эксперимент аналогичен сбрасыванию тяжелых тел с башни, но он проще для наблюдений, так как меньше скорости. Измерения Галилея показали, что скорость всякого тела увеличивается по одному и тому же закону независимо от веса тела. Например, если взять шар и пустить его вниз по наклонной плоскости с уклоном

метр на каждые десять метров, то, каким бы тяжелым ни был шар, его скорость в конце первой секунды будет один метр в секунду, в конце второй секунды — два метра в секунду и т. д. Конечно, свинцовая гиря будет падать быстрее, чем перышко, но только из-за того, что перо сильнее замедляется силой сопротивления воздуха, чем гиря. Если бросить два тела, сопротивление воздуха для которых невелико, например две свинцовые гири разного веса, то они будут падать с одинаковой скоростью.

Ньютон вывел свои законы движения, исходя из измерений, проведенных Галилеем. В экспериментах Галилея на тело, катящееся по наклонной плоскости, всегда действовала одна и та же сила (вес тела) и в результате скорость тела постоянно возрастала. Отсюда следовало, что в действительности приложенная к телу сила изменяет скорость тела, а не просто заставляет его двигаться, как думали раньше. Это еще означало, что если на тело не действует сила, оно будет двигаться по прямой с постоянной скоростью. Такую мысль впервые четко высказал Ньютон в своей книге «Математические начала», вышедшей в 1687 г. Этот закон теперь называется Первым законом Ньютона. О том, что происходит с телом, когда на него действует сила, говорится во Втором законе Ньютона. Он гласит, что тело будет ускоряться, т. е. менять свою скорость, пропорционально величине силы. (Если, например, сила возрастет в 2 раза, то и ускорение в 2 раза увеличится.) Кроме того, ускорение тем меньше, чем больше масса (т. е. количество вещества) тела. (Действуя на тело вдвое большей массы, та же сила создает вдвое меньшее ускорение.) Всем хорошо известно, как обстоит дело с автомобилем:

чем мощнее двигатель, тем больше создаваемое им ускорение, но чем тяжелее автомобиль, тем меньше ускоряет его тот же двигатель.

Кроме законов движения Ньютон открыл закон, которому подчиняется сила тяготения. Этот закон таков: всякое тело притягивает любое другое тело с силой, пропорциональной массам этих тел. Следовательно, если вдвое увеличить массу одного из тел (скажем, тела *A*), то и сила, действующая между телами, тоже увеличится в 2 раза. Мы так считаем потому, что новое тело *A* можно представить себе составленным из двух тел, масса каждого из которых равна первоначальной массе. Каждое из этих тел притягивало бы тело *B* с силой, равной первоначальной силе. Следовательно, суммарная сила, действующая между телами *A* и *B*, была бы вдвое больше этой первоначальной силы. А если бы одно из тел имело массу, скажем, вдвое, а второе — втрое больше первоначальной массы, то сила взаимодействия возросла бы в 6 раз. Теперь понятно, почему все тела падают с одинаковой скоростью: тело с удвоенным весом будет тянуть вниз удвоенная гравитационная сила, но и масса тела при этом будет в 2 раза больше. По Второму закону Ньютона эти два эффекта компенсируют друг друга, и ускорение будет во всех случаях одинаковым.

Закон тяготения Ньютона говорит, что чем дальше тела друг от друга, тем меньше сила их взаимодействия. Согласно этому закону, гравитационная сила притяжения звезды составляет ровно четверть силы притяжения такой же звезды, но находящейся на вдвое меньшем расстоянии. Закон Ньютона позволяет с большой точностью предсказать орбиты Земли,

Луны и планет. Если бы закон всемирного тяготения был иным и сила гравитационного притяжения уменьшалась быстрее, чем по закону Ньютона, то орбиты планет были бы не эллипсами, а спиралями, сходящимися к Солнцу. Если же гравитационное притяжение убывало бы с расстоянием медленнее, то притяжение удаленных звезд оказалось бы сильнее притяжения Земли.

Представления Аристотеля существенно отличались от представлений Галилея и Ньютона тем, что Аристотель считал состояние покоя неким предпочтительным состоянием, в котором всегда должно оказываться тело, если на него не действует сила или импульс. Аристотель, в частности, считал, что Земля покоится. Из законов Ньютона же следует, что единого эталона покоя не существует. Вы можете на равных основаниях утверждать, что тело *A* находится в покое, а тело *B* движется относительно тела *A* с постоянной скоростью или же что тело *B*, наоборот, покоится, а тело *A* движется. Если, например, забыть на время о вращении нашей планеты вокруг оси и о ее движении вокруг Солнца, то можно сказать, что земля покоится, а поезд несется на север со скоростью девяносто километров в час или же что поезд стоит на месте, а земля под ним убегает на юг со скоростью 90 километров в час. Если бы в этом поезде кто-нибудь экспериментировал с движущимися телами, то оказалось бы, что все законы Ньютона выполняются. Например, играя в поезде в настольный теннис, вы обнаружили бы, что траектория шарика подчиняется законам Ньютона, как если бы вы играли на неподвижном столе, и вы не могли бы сказать, что именно движется — поезд или земля.

Отсутствие абсолютного эталона покоя означает, что невозможно определить, произошли ли некие два события в одной и той же точке пространства, если известно, что они имели место в разные моменты времени. Пусть, например, наш теннисный шарик в движущемся поезде отскакивает от стола вертикально вверх и, падая вниз, ударяется через секунду о стол в той же точке. Тому, кто стоит у железнодорожного полотна, показалось бы, что точки соприкосновения шарика со столом разделены расстоянием около сорока метров, которое прошел поезд за время между подскоками. Следовательно, отсутствие абсолютного состояния покоя означает, что никакому событию нельзя приписать абсолютного положения в пространстве, как это полагал Аристотель. Положение событий в пространстве и расстояния между ними должны быть разными для наблюдателя, едущего в поезде, и для наблюдателя, который стоит рядом с проходящим поездом, и нет никаких оснований считать, что положения, фиксируемые одним из этих наблюдателей, более предпочтительны, чем положения, фиксируемые другим.

Ньютона сильно беспокоило отсутствие абсолютного положения в пространстве или, как его называли, абсолютного пространства, потому что это противоречило его идее абсолютного Бога. И он фактически отказался принять отсутствие абсолютного пространства, несмотря на то что такое отсутствие вытекало из законов, открытых им самим. Многие резко критиковали Ньютона за его иррациональное упорство, и в частности епископ Беркли — философ, считавший, что все материальные объекты, а также пространство и время — иллюзия. (Узнав о таких воззрениях Беркли,

знаменитый д-р Джонсон воскликнул: «Я опровергаю это вот как!» — и так стукнул ногой по большому камню, что чуть не потерял равновесие.)

И Аристотель, и Ньютон верили в абсолютное время. Иными словами, они считали, что временной интервал между двумя событиями можно однозначно измерить и что результат будет одинаков независимо от того, кто производит измерения, лишь бы у измеряющего были правильные часы. Время было полностью отделено от пространства и считалось не зависящим от него. Такова была точка зрения большинства, точка зрения здравого смысла. Но нам пришлось изменить свои представления о пространстве и времени. Представления, основанные на «здравом смысле», относятся к сравнительно медленным объектам (яблоко, планета), но они оказываются совершенно неуместными, когда скорости становятся близкими к скорости света.

То, что свет распространяется с конечной, хотя и очень большой скоростью, установил в 1676 г. датский астроном Оле Христенсен Рёмер. Он обнаружил, что моменты прохождения спутников Юпитера за его диском следуют один за другим не через равные интервалы, как должно быть, если спутники вращаются вокруг Юпитера с постоянной скоростью. При вращении Земли и Юпитера вокруг Солнца расстояние между этими двумя планетами изменяется. Рёмер заметил, что затмения лун Юпитера тем больше запаздывают, чем дальше мы от него находимся. Он объяснил это тем, что свет от спутников идет до нас дольше, когда мы находимся дальше. Однако Рёмер не очень точно измерял изменения расстояния от Земли до Юпитера, и поэтому полученное им значение

скорости света оказалось равным 140 000 миль/с, тогда как современное значение составляет 186 000 миль/с[1]. Тем не менее достижение Рёмера было выдающимся, ибо он не только доказал, что свет распространяется с конечной скоростью, но и измерил ее, причем все это за одиннадцать лет до выхода в свет книги Ньютона «Математические начала».

Настоящей теории распространения света не существовало до 1865 г., когда английский физик Джеймс Кларк Максвелл сумел объединить две частные теории, с помощью которых тогда описывали электрические и магнитные силы. Согласно уравнениям Максвелла, в электромагнитном поле, составленном из двух полей, могут существовать волноподобные возмущения, которые распространяются с постоянной скоростью, как волны на поверхности пруда. Если длина волны (т. е. расстояние между гребнями двух соседних волн) составляет метр или больше, то мы имеем дело с радиоволнами. Более короткие волны называются волнами сверхвысокочастотного диапазона (если их длина — порядка сантиметра) и волнами инфракрасного диапазона (до десяти тысячных сантиметра). Длина волны видимого света составляет всего лишь сорок—восемьдесят миллионных долей сантиметра. Еще короче волны ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений.

Теория Максвелла предсказывала, что радиоволны и свет должны распространяться с некоторой фиксированной скоростью. Но поскольку теория Ньютона покончила с представлением об абсолютном покое,

---

[1] 1 миля = 1,609 км. Современное значение скорости света равно 299 792 458 м/с. — *Прим. перев.*

теперь, говоря о фиксированной скорости света, нужно было указать, относительно чего измеряется эта фиксированная скорость. В связи с этим было постулировано существование некой субстанции, названной «эфиром», которой наполнено все, даже «пустое» пространство. Световые волны распространяются в эфире так же, как звуковые в воздухе, и, следовательно, их скорость — это скорость относительно эфира. Наблюдатели, с разными скоростями движущиеся относительно эфира, должны видеть, что свет идет к ним с разной скоростью, но скорость света относительно эфира должна оставаться при этом неизменной. В частности, коль скоро Земля движется в эфире по своей орбите вокруг Солнца, скорость света, измеренная в направлении движения Земли (при движении в сторону источника света), должна превышать скорость света, измеренную под прямым углом к направлению движения (т. е. когда мы не движемся к источнику). В 1887 г. Альберт Майкельсон (впоследствии ставший первым американцем, удостоенным Нобелевской премии по физике) и Эдвард Морли поставили в Кливлендской школе прикладных наук очень точный эксперимент. Майкельсон и Морли сравнивали значение скорости света, измеренной в направлении движения Земли, с ее значением, измеренным в перпендикулярном направлении. К своему огромному удивлению, они обнаружили, что оба значения совершенно одинаковы!

С 1887 по 1905 г. был сделан ряд попыток (наиболее известная из которых принадлежит датскому физику Хендрику Лоренцу) объяснить результат эксперимента Майкельсона и Морли тем, что все движущиеся в эфире объекты сокращаются в размерах,

а все часы замедляют свой ход. Но в 1905 г. никому доселе не известный служащий Швейцарского патентного бюро по имени Альберт Эйнштейн опубликовал ставшую потом знаменитой работу, в которой было показано, что никакого эфира не нужно, если отказаться от понятия абсолютного времени. Через несколько недель ту же точку зрения высказал один из ведущих французских математиков Анри Пуанкаре. Аргументы, выдвинутые Эйнштейном, были ближе к физике, чем аргументы Пуанкаре, который подошел к этой задаче как к математической. Об Эйнштейне обычно говорят как о создателе новой теории, но и имя Пуанкаре связывают с разработкой важной ее части.

Фундаментальный постулат этой теории относительности, как стали называть новую теорию, состоял в том, что законы науки должны быть одинаковыми для всех свободно движущихся наблюдателей независимо от скорости их движения. Этот постулат был справедлив для законов движения Ньютона, но теперь он был распространен на теорию Максвелла и на скорость света; скорость света, измеренная любыми наблюдателями, должна быть одинакова независимо от того, с какой скоростью движутся сами наблюдатели. Из этого простого принципа вытекает ряд замечательных следствий. Самые известные из них — это, наверное, эквивалентность массы и энергии, нашедшая свое выражение в знаменитом уравнении Эйнштейна $E = mc^2$ (где E — энергия, m — масса, а c — скорость света), и закон, согласно которому ничто не может двигаться быстрее света. В силу эквивалентности массы и энергии энергия, которой обладает движущийся объект, должна теперь добавляться

к его массе. Другими словами, чем больше энергия, тем труднее увеличить скорость. Правда, этот эффект существенен лишь при скоростях, близких к скорости света. Если, например, скорость какого-нибудь объекта составляет 10% скорости света, то его масса лишь на 0,5% больше нормальной, тогда как при скорости, равной 90% скорости света, масса уже в 2 раза превышает нормальную. По мере того как скорость объекта приближается к скорости света, масса растет все быстрее, так что для дальнейшего ускорения требуется все больше и больше энергии. На самом деле скорость объекта никогда не может достичь скорости света, так как тогда его масса стала бы бесконечно большой, а поскольку масса эквивалентна энергии, для достижения такой скорости потребовалась бы бесконечно большая энергия. Таким образом, любой нормальный объект в силу принципа относительности навсегда обречен двигаться со скоростью, не превышающей скорости света. Только свет и другие волны, не обладающие «собственной» массой, могут двигаться со скоростью света.

Другое замечательное следствие из постулата относительности — революция в наших представлениях о пространстве и времени. По теории Ньютона, если световой импульс послан из одной точки в другую, то время его прохождения, измеренное разными наблюдателями, будет одинаковым (поскольку время абсолютно), но пройденный им путь может оказаться разным у разных наблюдателей (так как пространство не является абсолютным). И поскольку скорость света есть пройденное светом расстояние, деленное на время, разные наблюдатели будут получать разные скорости света. В теории относи-

тельности же все наблюдатели *должны быть* согласны в том, с какой скоростью распространяется свет. И коль скоро у них нет согласия в вопросе о расстоянии, пройденном светом, у них не должно быть согласия и в том, сколько времени шел свет. (Время прохождения — это пройденное светом расстояние, относительно которого нет согласия у наблюдателей, деленное на скорость света, относительно которой все согласны.) Иными словами, теория относительности покончила с понятием абсолютного времени! Оказалось, что у каждого наблюдателя должен быть свой масштаб времени, измеряемого с помощью имеющихся у него часов, и что показания одинаковых часов, находящихся у разных наблюдателей, не обязательно согласуются.

Всякий наблюдатель может определить, где и когда произошло какое-нибудь событие, методом радиолокации, послав световой импульс или импульс радиоизлучения. Часть посланного сигнала в конце пути отразится назад, и наблюдатель измерит время возврата эхо-сигнала. Временем события будет середина интервала между посылкой сигнала и его возвращением: расстояние до события равно половине времени, затраченного на прохождение туда и обратно, умноженной на скорость света. (Под событием здесь понимается нечто, происходящее в определенной точке пространства в определенный момент времени.) Все сказанное поясняется пространственно-временной диаграммой, представленной на рис. 2.1. При изложенном методе наблюдатели, перемещающиеся относительно друг друга, припишут одному и тому же событию разное время и положение в пространстве. Ни одно из измерений, произведенных

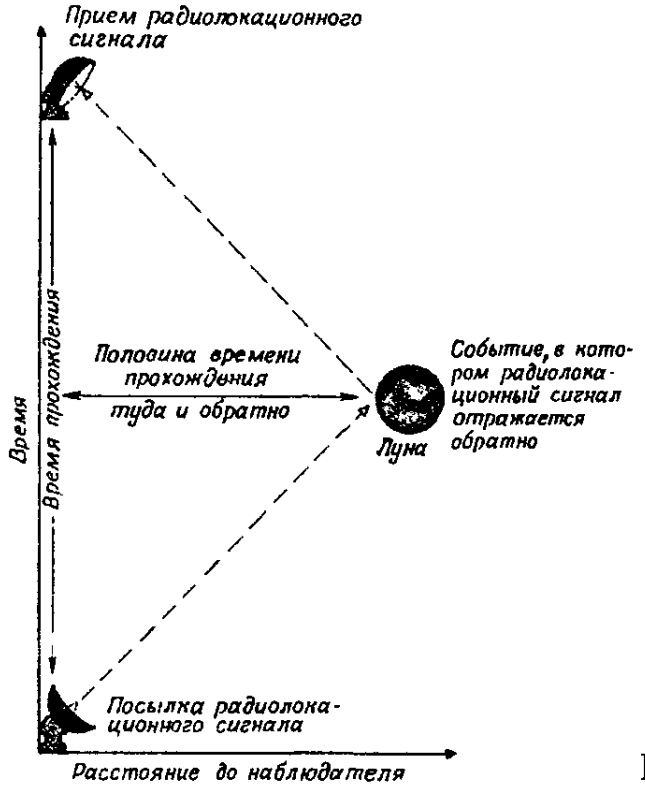


Рис. 2.1

разными наблюдателями, не будет правильнее других, но все они будут связаны между собой. Каждый наблюдатель может точно вычислить, какое время и какое положение в пространстве припишет событию любой другой наблюдатель, если известна скорость второго наблюдателя относительно первого.

Для точного определения расстояний сейчас пользуются именно таким методом, потому что время мы умеем измерять точнее, чем длину. Даже метр определяется как расстояние, которое свет проходит за время 0,000000003335640952 секунды, измеренное при помощи цезиевых часов. (Само это число соответствует историческому определению метра как расстояния между двумя отметками на специальном платиновом стержне, хранящемся в Париже.) Мы можем пользоваться и более удобной новой единицей длины, которая называется световой секун-

дой. Это просто расстояние, которое свет проходит за одну секунду. В теории относительности расстояние теперь определено через время и скорость света, откуда автоматически следует, что, измеряя скорость света, каждый наблюдатель получит один и тот же результат (по определению 1 метр за 0,000000003335640952 секунды.) Теперь не нужно вводить эфир, присутствие которого, кстати, как показал опыт Майкельсона—Морли, и невозможно обнаружить. Однако теория относительности вынуждает нас к фундаментальной смене представлений о пространстве и времени. Нам приходится принять, что время не отделено полностью от пространства и не независимо от него, но вместе с ним образует единый объект, который называется пространством-временем.

Из повседневного опыта мы знаем, что положение точки в пространстве можно задать тремя числами — ее координатами. Можно, например, сказать, что некая точка в комнате находится в двух метрах от одной стены, в метре — от другой и в полутора метрах от пола. А можно также задать ее положение, указав широту, долготу и высоту над уровнем моря. Вы можете пользоваться любыми тремя подходящими координатами, хотя они всегда имеют лишь ограниченную область применимости. Никто не станет, задавая положение Луны, указывать расстояние в километрах на север и на запад от площади Пикадилли и высоту над уровнем моря. Вместо этого можно указать расстояние до Солнца, расстояние до плоскости, в которой лежат орбиты планет, и угол между прямой, соединяющей Луну с Солнцем, и прямой, соединяющей Солнце с какой-нибудь близкой звездой, ска-

жем, с альфой Центавра. Правда, и эти координаты вряд ли подходят для задания положения Солнца в нашей Галактике или положения нашей Галактики среди окружающих нас других галактик. Но можно всю Вселенную разбить на перекрывающиеся «куски» и для каждого «куска» ввести свою систему координат, чтобы задавать в нем положение точки.

Событие — это нечто, происходящее в определенной точке пространства и в определенный момент времени. Следовательно, событие можно характеризовать четырьмя числами, или координатами. Выбор координат будет опять произвольным: можно взять любые три четко определенные координаты и любую меру времени. В теории относительности нет реального различия между пространственными и временны́ми координатами, как нет различия между двумя любыми пространственными координатами. Можно перейти к новой системе координат, в которой, скажем, первая пространственная координата будет комбинацией первой и второй старых пространственных координат. Например, вместо того чтобы задавать положение точки на поверхности Земли, измеряя в километрах расстояние до нее к северу и к западу от площади Пикадилли, можно было бы откладывать расстояние от той же площади Пикадилли, но к северо-востоку и к северо-западу. Аналогичным образом в теории относительности можно ввести новую временну́ю координату, которая была бы равна сумме старого времени (измеренного в секундах) и расстояния (в световых секундах) к северу от Пикадилли.

Четыре координаты какого-либо события можно рассматривать как координаты, определяющие поло-

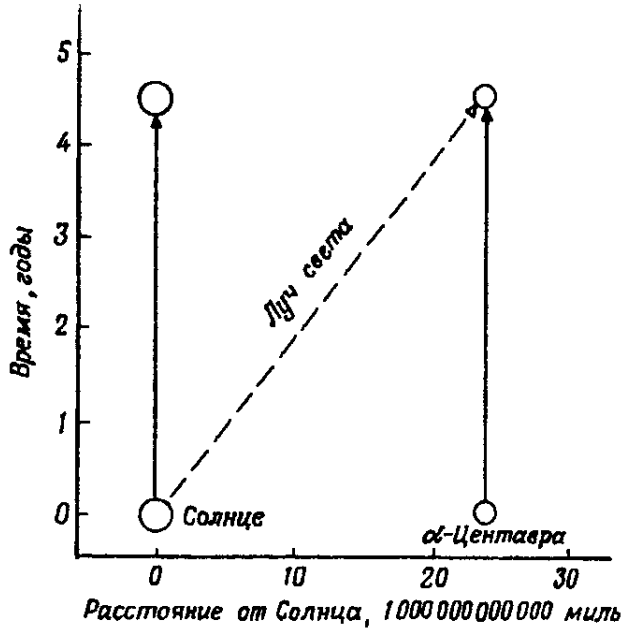


Рис. 2.2

жение этого события в четырехмерном пространстве, которое называется пространством-временем. Четырехмерное пространство представить себе невозможно. Лично я с трудом представляю себе даже трехмерное пространство! Но нетрудно изображать графически двумерные пространства, например, поверхность Земли. (Поверхность Земли двумерна, потому что положение любой точки можно задать двумя координатами — широтой и долготой.) На диаграммах, которыми я буду, как правило, пользоваться, ось времени направлена вверх, а одна из пространственных осей горизонтальна. Два других пространственных измерения либо будут отсутствовать, либо же одно из них я буду иногда изображать в перспективе. (Такие диаграммы, как диаграмма рис. 2.1, называются пространственно-временны́ми диаграммами.) Например, на рис. 2.2 ось времени направлена вверх и отсчет на ней ведется в годах, а расстояние от Солнца до звезды альфа Центавра отложено по горизонтальной оси и измеряется в милях. Траектории Солнца и альфы

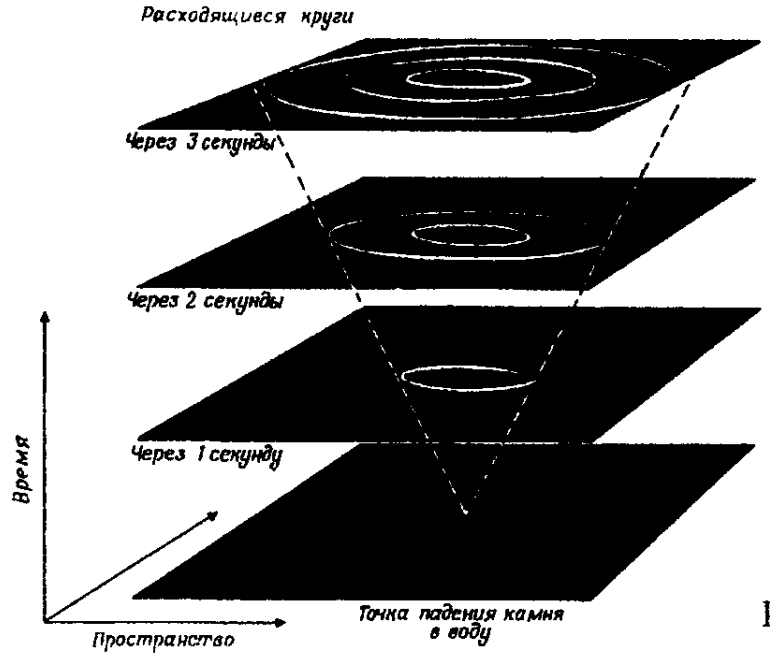


Рис. 2.3

Центавра, возникающие при их перемещении в пространстве-времени, показаны на диаграмме вертикальными линиями: первая — слева, а вторая — справа. Луч света от Солнца распространяется по диагонали, и он доходит от Солнца до альфы Центавра за четыре года.

Мы видели, что уравнения Максвелла предсказывают постоянство скорости света независимо от скорости источника и эти предсказания подтверждаются точными измерениями. Отсюда следует, что световой импульс, испущенный в некоторый момент времени из некоторой точки пространства, с течением времени будет распространяться во все стороны, превращаясь в световую сферу, размеры и положение которой зависят от скорости источника. Через одну миллионную долю секунды свет образует сферу радиусом 300 метров; через две миллионные доли секунды радиус сферы увеличится до 600 метров и т. д. Картина будет напоминать волны на воде, расходящиеся по поверхности пруда от брошенного

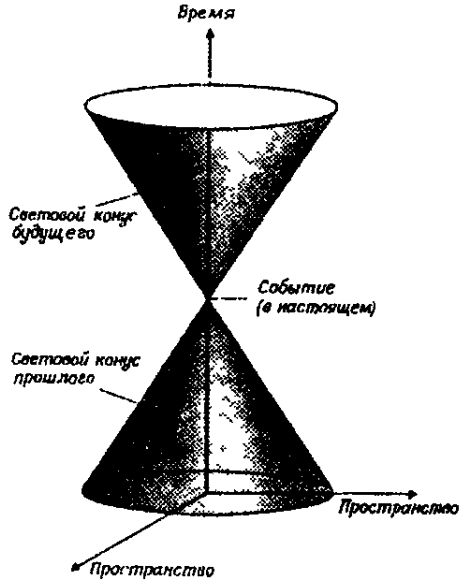


Рис. 2.4

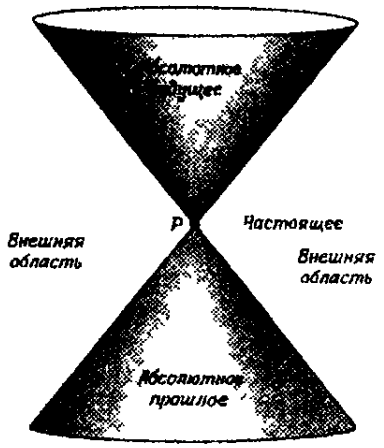


Рис. 2.5

камня. Эти волны расходятся, как круг, расширяющийся со временем. Если представить себе трехмерную модель, два измерения которой на поверхности пруда, а одно — ось времени, то в такой модели расходящийся по воде круг будет «следом» конуса с вершиной, находившейся в момент падения камня в той точке на поверхности пруда, в которой камень коснулся воды (рис. 2.3). Точно так же свет, распространяясь из некоего события в четырехмерном пространстве-времени, образует в нем трехмерный конус. Этот конус называется световым конусом будущего для данного события. Можно нарисовать и другой конус, который называется световым конусом прошлого и представляет множество событий, из которых световой импульс может попасть в точку, соответствующую данному событию (рис. 2.4).

Световые конусы прошлого и будущего для данного события *P* делят пространство-время на три области (рис. 2.5). Абсолютное будущее данного события — это область, заключенная внутри светового

конуса будущего события *P*. Это совокупность всех событий, на которые в принципе может повлиять то, что происходит в точке *P*. События, лежащие вне светового конуса события *P*, недостижимы для сигналов, идущих из точки *P*, так как ничто не может двигаться быстрее света. Следовательно, на них никак не сказывается происходящее в точке *P*. Абсолютное прошлое событие *P* лежит внутри светового конуса прошлого. Это множество всех событий, сигналы от которых, распространяющиеся со скоростью света или с меньшей скоростью, могут попасть в точку *P*. Таким образом, в конусе прошлого лежит множество всех событий, которые могут влиять на событие в точке *P*. Зная, что происходит в какой-то момент времени всюду в той области пространства, которая ограничена световым конусом прошлого события *P*, можно предсказать, что должно произойти в самой точке *P*. Область пространства, не лежащую внутри световых конусов прошлого и будущего, мы будем называть внешней. События, принадлежащие внешней области, не могут ни сами влиять на события в точке *P*, ни оказаться под влиянием происходящих в *P* событий. Если, например, Солнце прямо сейчас вдруг перестанет светить, то в настоящий момент это никак не повлияет на земную жизнь, так как мы все еще будем находиться в области, внешней по отношению к той точке, в которой Солнце потухло (рис. 2.6), а узнаем обо всем лишь через восемь минут — время, за которое свет от Солнца достигает Земли. Только тогда происходящие на Земле события попадут в световой конус будущего той точки, в которой Солнце потухло. По той же причине мы не знаем, что в данный момент происходит далеко во

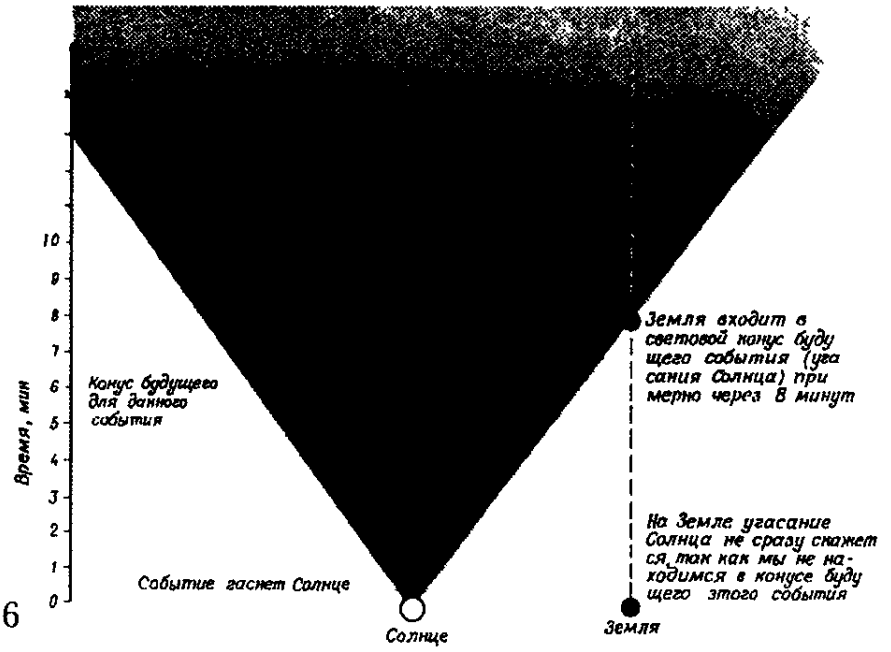


Рис. 2.6

Вселенной: дошедший до нас свет далеких галактик был испущен миллион лет назад, а свет от самого далекого наблюдаемого объекта шел к нам 8 тысяч миллионов лет. Это значит, что, всматриваясь во Вселенную, мы видим ее в прошлом.

Если пренебречь гравитационными эффектами, как это сделали в 1905 г. Эйнштейн и Пуанкаре, то мы придем к так называемой специальной (или частной) теории относительности. Для каждого события в пространстве-времени мы можем построить световой конус (представляющий собой множество всех возможных путей, по которым распространяется свет, испущенный в рассматриваемой точке), а поскольку скорость света одинакова для любого события и в любом направлении, все световые конусы будут одинаковы и ориентированы в одном направлении. Кроме того, эта теория говорит нам, что ничто не может двигаться быстрее света. Это означает, что траектория любого объекта во времени и в пространстве должна представляться линией, лежащей

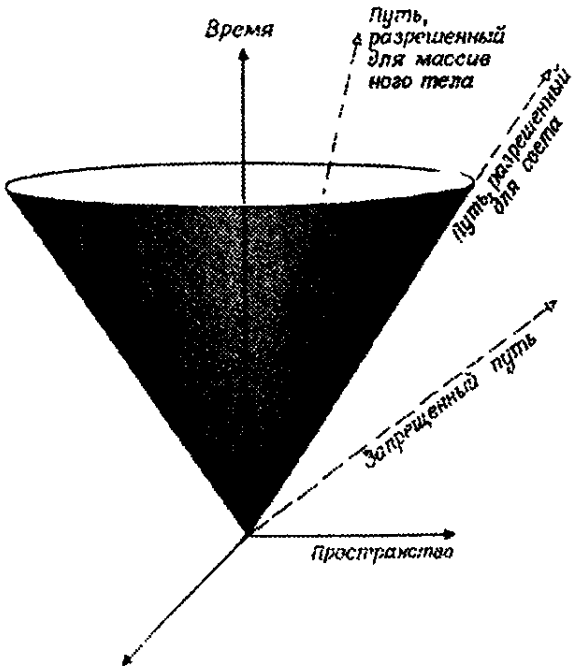


Рис. 2.7

внутри световых конусов для всех событий на ней (рис. 2.7).

Специальная теория относительности позволила объяснить постоянство скорости света для всех наблюдателей (установленное в опыте Майкельсона и Морли) и правильно описывала, что происходит при движении со скоростями, близкими к скорости света. Однако новая теория противоречила ньютоновской теории гравитации, согласно которой объекты притягиваются друг к другу с силой, зависящей от расстояния между ними. Последнее означает, что, если сдвинуть один из объектов, сила, действующая на другой, изменится мгновенно. Иначе говоря, скорость распространения гравитационных эффектов должна быть бесконечной, а не равной (или меньшей) скорости света, как того требовала теория относительности. С 1908 по 1914 г. Эйнштейн предпринял ряд безуспешных попыток построить такую модель гравитации, которая согласовалась бы со специальной теорией относительности. Наконец в 1915 г.

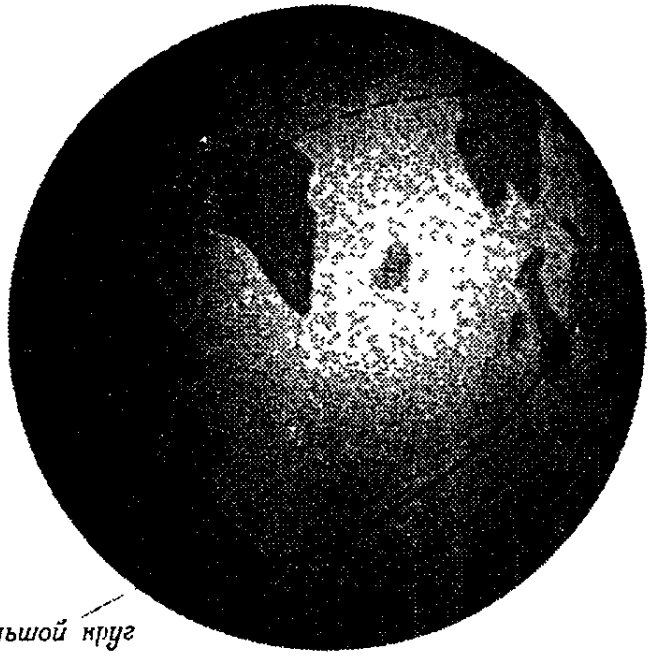


Рис. 2 8

он опубликовал теорию, которая сейчас называется общей теорией относительности.

Эйнштейн высказал предположение революционного характера: гравитация — это не обычная сила, а следствие того, что пространство-время не является плоским, как считалось раньше; оно искривлено распределенными в нем массой и энергией. Такие тела, как Земля, вовсе не принуждаются двигаться по искривленным орбитам гравитационной силой; они движутся по линиям, которые в искривленном пространстве более всего соответствуют прямым в обычном пространстве и называются геодезическими. Геодезическая — это самый короткий (или самый длинный) путь между двумя соседними точками. Например, поверхность Земли есть искривленное двумерное пространство. Геодезическая на Земле называется большим кругом и является самым коротким путем между двумя точками (рис. 2.8). Поскольку самый короткий путь между двумя аэропортами — по геодезической, диспетчеры всегда задают пилотам

именно такой маршрут. Согласно общей теории относительности, тела всегда перемещаются по прямым в четырехмерном пространстве-времени, но мы видим, что в нашем трехмерном пространстве они движутся по искривленным траекториям. (Понаблюдайте за самолетом над холмистой местностью. Сам он летит по прямой в трехмерном пространстве, а его тень перемещается по кривой на двумерной поверхности Земли.)

Масса Солнца так искривляет пространство-время, что, хотя Земля движется по прямой в четырехмерном пространстве, мы видим, что в нашем трехмерном пространстве она движется по круговой орбите. Орбиты планет, предсказываемые общей теорией относительности, почти совпадают с предсказаниями ньютоновской теории тяготения. Однако в случае Меркурия, который, будучи ближайшей к Солнцу планетой, испытывает самое сильное действие гравитации и имеет довольно вытянутую орбиту, общая теория относительности предсказывает, что большая ось эллипса должна поворачиваться вокруг Солнца примерно на один градус в десять тысяч лет. Несмотря на его малость, этот эффект был замечен еще до 1915 г. и рассматривался как одно из подтверждений теории Эйнштейна. В последние годы радиолокационным методом были измерены еще меньшие отклонения орбит других планет от предсказаний Ньютона, и они согласуются с предсказаниями общей теории относительности.

Лучи света тоже должны следовать геодезическим в пространстве-времени. Искривленность пространства означает, что свет уже не распространяется прямолинейно. Таким образом, согласно общей теории

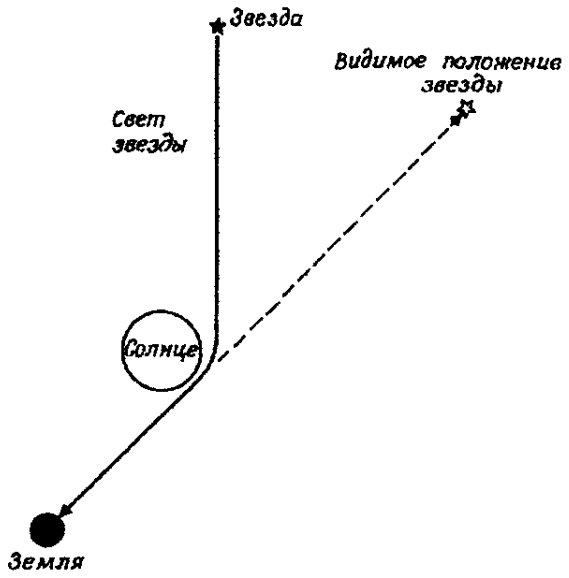


Рис. 2.9

относительности, луч света должен изгибаться в гравитационных полях, и, например, световые конусы точек, находящихся вблизи Солнца, должны быть немного деформированы под действием массы Солнца. Это значит, что луч света от далекой звезды, проходящий рядом с Солнцем, должен отклониться на небольшой угол, и наблюдатель, находящийся на Земле, увидит эту звезду в другой точке (рис. 2.9). Конечно, если бы свет от данной звезды всегда проходил рядом с Солнцем, мы не могли бы сказать, отклоняется ли луч света или же звезда действительно находится там, где мы ее видим. Но вследствие обращения Земли все новые звезды заходят за солнечный диск, и их свет отклоняется. В результате их видимое положение относительно остальных звезд меняется.

В нормальных условиях этот эффект очень труден для наблюдения, так как яркий солнечный свет не позволяет видеть звезды, находящиеся на небе рядом с Солнцем. Но такая возможность появляется во время солнечного затмения, когда Луна перекрывает солнечный свет. В 1915 г. никто не смог сразу прове-

рить предсказанное Эйнштейном отклонение света, потому что шла Первая мировая война. Лишь в 1919 г. английская экспедиция в Западной Африке, наблюдавшая там солнечное затмение, показала, что свет действительно отклоняется Солнцем так, как и предсказывала теория. То, что английские ученые доказали правильность теории, родиной которой была Германия, приветствовалось как еще один великий акт примирения обеих стран после войны. Но, хотя это выглядит иронично, проведенный позднее анализ фотографий, полученных этой экспедицией, показал ошибки измерения того же порядка, что и измеряемый эффект. Результат англичан был либо чистым везением, либо тем нередким в науке случаем, когда получают то, что хотелось получить. Правда, отклонение света Солнцем было впоследствии точно подтверждено целым рядом наблюдений.

Еще одно предсказание общей теории относительности состоит в том, что вблизи массивного тела типа Земли время должно течь медленнее. Это следует из того, что должно выполняться определенное соотношение между энергией света и его частотой (т. е. числом световых волн в секунду): чем больше энергия, тем выше частота. Если свет распространяется вверх в гравитационном поле Земли, то он теряет энергию, а потому его частота уменьшается. (Это означает, что увеличивается интервал времени между гребнями двух соседних волн.) Наблюдателю, расположенному на большой высоте, должно казаться, что внизу все происходит медленнее. Это предсказание было проверено в 1962 г. с помощью двух очень точных часов, расположенных: одни на самом верху водонапорной башни, а вторые — у ее подножья.

Оказалось, что нижние часы, которые были ближе к Земле, в точном соответствии с общей теорией относительности шли медленнее. Разница в ходе часов на разной высоте над поверхностью Земли приобрела сейчас огромное практическое значение в связи с появлением очень точных навигационных систем, работающих на сигналах со спутников. Если не принимать во внимание предсказаний общей теории относительности, то координаты будут рассчитаны с ошибкой в несколько километров!

Законы движения Ньютона покончили с абсолютным положением в пространстве. Теория относительности освободила нас от абсолютного времени. Возьмем пару близнецов. Предположим, что один из них отправился жить на вершину горы, а другой остался на уровне моря. Тогда первый состарится быстрее, чем второй, и поэтому при встрече один из них будет выглядеть старше другого. Правда, разница в возрасте была бы совсем мала, но она сильно увеличилась бы, если бы один из близнецов отправился в долгое путешествие на космическом корабле со скоростью, близкой к скорости света. По возвращении он оказался бы значительно моложе своего брата, который оставался на Земле. Это так называемый парадокс близнецов, но он парадокс лишь для того, кто в глубине души верит в абсолютное время. В общей теории относительности нет единого абсолютного времени; каждый индивидуум имеет свой собственный масштаб времени, зависящий от того, где этот индивидуум находится и как он движется.

До 1915 г. пространство и время воспринимались как некая жесткая арена для событий, на которую все происходящее на ней никак не влияет. Так обстояло

дело даже в специальной теории относительности. Тела двигались, силы притягивали и отталкивали, но время и пространство просто оставались самими собой, их это не касалось. И было естественно думать, что пространство и время бесконечны и вечны.

В общей же теории относительности ситуация совершенно иная. Пространство и время теперь динамические величины: когда движется тело или действует сила, это изменяет кривизну пространства и времени, а структура пространства-времени в свою очередь влияет на то, как движутся тела и действуют силы. Пространство и время не только влияют на все, что происходит во Вселенной, но и сами изменяются под влиянием всего в ней происходящего. Как без представлений о пространстве и времени нельзя говорить о событиях во Вселенной, так в общей теории относительности стало бессмысленным говорить о пространстве и времени за пределами Вселенной.

В последующие десятилетия новому пониманию пространства и времени предстояло произвести переворот в наших взглядах на Вселенную. Старое представление о почти не меняющейся Вселенной, которая, может быть, всегда существовала и будет существовать вечно, сменилось картиной динамической, расширяющейся Вселенной, которая, по-видимому, возникла когда-то в прошлом и, возможно, закончит свое существование когда-то в будущем. Эта революция в нашем сознании (ей будет посвящена следующая глава) явилась отправной точкой моих исследований в теоретической физике. Мы с Роджером Пенроузом показали, что, согласно общей теории относительности Эйнштейна, Вселенная должна иметь начало, а может быть, и конец.

3
Расширяющаяся Вселенная

Если в ясную безлунную ночь посмотреть на небо, то, скорее всего, самыми яркими объектами, которые вы увидите, будут планеты Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Кроме того, вы увидите огромное количество звезд, похожих на наше Солнце, но находящихся гораздо дальше от нас. При обращении Земли вокруг Солнца некоторые из этих «неподвижных» звезд чуть-чуть меняют свое положение относительно друг друга, т. е. на самом деле они вовсе не неподвижны! Дело в том, что они несколько ближе к нам, чем другие. Поскольку же Земля вращается вокруг Солнца, близкие звезды видны все время в разных точках фона более удаленных звезд. Благодаря этому можно непосредственно измерить расстояние от нас до этих звезд: чем они ближе, тем сильнее заметно их перемещение. Самая близкая звезда, называемая Проксимой Центавра, находится от нас на расстоянии приблизительно четырех световых лет (т. е. свет от нее идет до Земли около четырех лет), или около 37 миллионов километров. Большинство звезд, видимых невооруженным глазом, удалены от нас на несколько сотен световых лет. Сравните это с расстоянием до нашего Солнца, составляющим всего восемь световых минут! Видимые звезды рассыпаны по всему ночному небу, но особенно густо в той полосе, которую

мы называем Млечным Путем. Еще в 1750 г. некоторые астрономы высказывали мысль, что существование Млечного Пути объясняется тем, что бóльшая часть видимых звезд образует одну дискообразную конфигурацию — пример того, что сейчас называется спиральной галактикой. Лишь через несколько десятилетий астроном Уильям Гершель подтвердил это предположение, выполнив колоссальную работу по составлению каталога положений огромного количества звезд и расстояний до них. Но даже после этого представление о спиральных галактиках было принято всеми лишь в начале нашего века.

Современная картина Вселенной возникла только в 1924 г., когда американский астроном Эдвин Хаббл показал, что наша Галактика не единственная. На самом деле существует много других галактик, разделенных огромными областями пустого пространства. Для доказательства Хабблу требовалось определить расстояния до этих галактик, которые настолько велики, что, в отличие от положений близких звезд, видимые положения галактик действительно не меняются. Поэтому для измерения расстояний Хаббл был вынужден прибегнуть к косвенным методам. Видимая яркость звезды зависит от двух факторов: от того, какое количество света излучает звезда (ее светимости), и от того, где она находится. Яркость близких звезд и расстояние до них мы можем измерить; следовательно, мы можем вычислить и их светимость. И наоборот, зная светимость звезд в других галактиках, мы могли бы вычислить расстояние до них, измерив их видимую яркость. Хаббл заметил, что светимость некоторых типов звезд всегда одна и та же, когда они находятся достаточно близко для того,

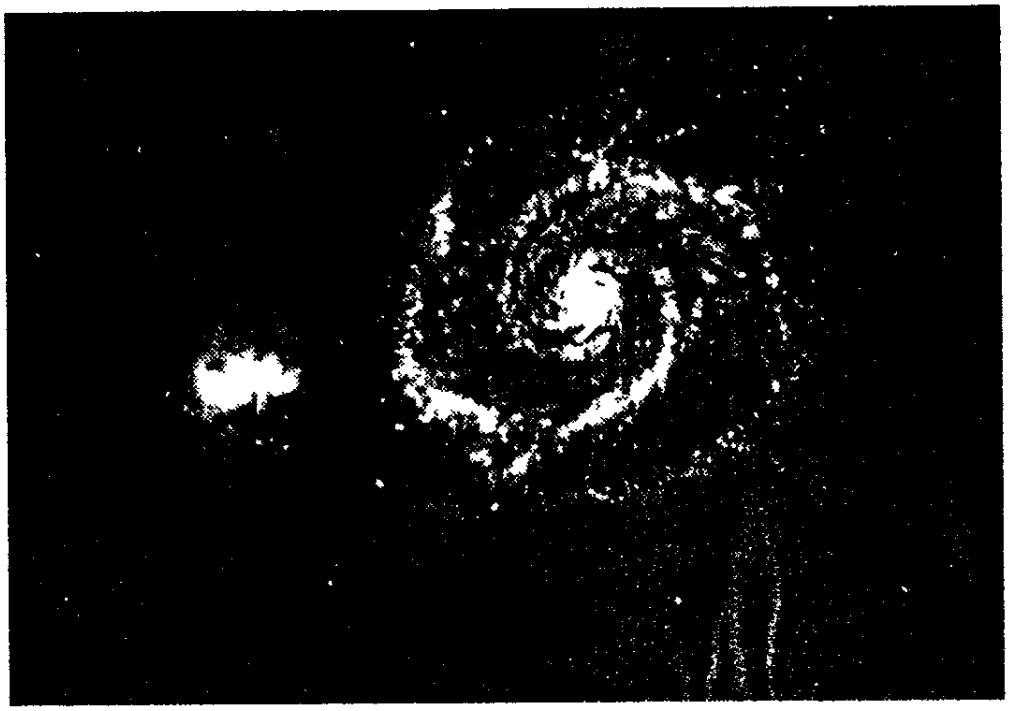


Рис. 3.1

чтобы можно было производить измерения. Следовательно, рассуждал Хаббл, если такие звезды обнаружатся в другой галактике, то, предположив у них такую же светимость, мы сумеем вычислить расстояние до этой галактики. Если подобные расчеты для нескольких звезд одной и той же галактики дадут один и тот же результат, то полученную оценку расстояния можно считать надежной.

Таким путем Хаббл рассчитал расстояния до девяти разных галактик. Теперь известно, что наша Галактика — одна из нескольких сотен тысяч миллионов галактик, которые можно наблюдать в современные телескопы, а каждая из этих галактик в свою очередь содержит сотни тысяч миллионов звезд. На рис. 3.1 показано, какой увидел бы нашу Галактику наблюдатель, живущий в какой-нибудь другой галактике. Наша Галактика имеет около ста тысяч световых лет

в поперечнике. Она медленно вращается, а звезды в ее спиральных рукавах каждые несколько сотен миллионов лет делают примерно один оборот вокруг ее центра. Наше Солнце представляет собой обычную желтую звезду средней величины, расположенную на внутренней стороне одного из спиральных рукавов. Какой же огромный путь мы прошли от Аристотеля и Птолемея, когда Земля считалась центром Вселенной!

Звезды находятся так далеко от нас, что кажутся просто светящимися точками в небе. Мы не различаем ни их размеров, ни формы. Как же можно говорить о разных типах звезд? Для подавляющего большинства звезд существует только одно характерное свойство, которое можно наблюдать — это цвет идущего от них света. Ньютон открыл, что, проходя через трехгранный кусок стекла, называемый призмой, солнечный свет разлагается, как в радуге, на цветовые компоненты (спектр). Настроив телескоп на какую-нибудь отдельную звезду или галактику, можно аналогичным образом разложить в спектр свет, испускаемый этой звездой или галактикой. Разные звезды имеют разные спектры, но относительная яркость разных цветов всегда в точности такая же, как в свете, который излучает какой-нибудь раскаленный докрасна предмет. (Свет, излучаемый раскаленным докрасна непрозрачным предметом, имеет очень характерный спектр, зависящий только от температуры предмета — тепловой спектр. Поэтому мы можем определить температуру звезды по спектру излучаемого ею света.) Кроме того, мы обнаружим, что некоторые очень специфические цвета вообще отсутствуют в спектрах звезд, причем отсутствующие цвета

разные для разных звезд. Поскольку, как мы знаем, каждый химический элемент поглощает свой определенный набор характерных цветов, мы можем сравнить их с теми цветами, которых нет в спектре звезды, и таким образом точно определить, какие элементы присутствуют в ее атмосфере.

В 20-х годах, когда астрономы начали исследование спектров звезд других галактик, обнаружилось нечто еще более странное: в нашей собственной Галактике оказались те же самые характерные наборы отсутствующих цветов, что и у звезд, но все они были сдвинуты на одну и ту же величину к красному концу спектра. Чтобы понять смысл сказанного, следует сначала разобраться с эффектом Доплера. Как мы уже знаем, видимый свет — это колебания, или волны электромагнитного поля. Частота (число волн в одну секунду) световых колебаний чрезвычайно высока — от четырехсот до семисот миллионов миллионов волн в секунду. Человеческий глаз воспринимает свет разных частот как разные цвета, причем самые низкие частоты соответствуют красному концу спектра, а самые высокие — фиолетовому. Представим себе источник света, расположенный на фиксированном расстоянии от нас (например, звезду), излучающий с постоянной частотой световые волны. Очевидно, что частота приходящих волн будет такой же, как та, с которой они излучаются (пусть гравитационное поле галактики невелико и его влияние несущественно). Предположим теперь, что источник начинает двигаться в нашу сторону. При испускании следующей волны источник окажется ближе к нам, а потому время, за которое гребень этой волны до нас дойдет, будет меньше, чем в случае неподвижной

звезды. Стало быть, время между гребнями двух пришедших волн будет меньше, а число волн, принимаемых нами за одну секунду (т. е. частота), будет больше, чем когда звезда была неподвижна. При удалении же источника частота приходящих волн будет меньше. Это означает, что спектры удаляющихся звезд будут сдвинуты к красному концу (красное смещение), а спектры приближающихся звезд должны испытывать фиолетовое смещение. Такое соотношение между скоростью и частотой называется эффектом Доплера, и этот эффект обычен даже в нашей повседневной жизни. Прислушайтесь к тому, как идет по шоссе машина: когда она приближается, звук двигателя выше (т. е. выше частота испускаемых им звуковых волн), а когда, проехав мимо, машина начинает удаляться, звук становится ниже. Световые волны и радиоволны ведут себя аналогичным образом. Эффектом Доплера пользуется полиция, определяя издалека скорость движения автомашин по частоте радиосигналов, отражающихся от них. Доказав, что существуют другие галактики, Хаббл все последующие годы посвятил составлению каталогов расстояний до этих галактик и наблюдению их спектров. В то время большинство ученых считали, что движение галактик происходит случайным образом и поэтому спектров, смещенных в красную сторону, должно наблюдаться столько же, сколько и смещенных в фиолетовую. Каково же было удивление, когда у большей части галактик обнаружилось красное смещение спектров, т. е. оказалось, что почти все галактики удаляются от нас! Еще более удивительным было открытие, опубликованное Хабблом в 1929 г.: Хаббл обнаружил, что даже величина красного

смещения не случайна, а прямо пропорциональна расстоянию от нас до галактики. Иными словами, чем дальше находится галактика, тем быстрее она удаляется! А это означало, что Вселенная не может быть статической, как думали раньше, что на самом деле она непрерывно расширяется и расстояния между галактиками все время растут.

Открытие расширяющейся Вселенной было одним из великих интеллектуальных переворотов двадцатого века. Задним числом мы можем лишь удивляться тому, что эта идея не пришла никому в голову раньше. Ньютон и другие ученые должны были бы сообразить, что статическая Вселенная вскоре обязательно начала бы сжиматься под действием гравитации. Но предположим, что Вселенная, наоборот, расширяется. Если бы расширение происходило достаточно медленно, то под действием гравитационной силы оно в конце концов прекратилось бы и перешло в сжатие. Однако если бы скорость расширения превышала некоторое критическое значение, то гравитационного взаимодействия не хватило бы, чтобы остановить расширение, и оно продолжалось бы вечно. Все это немного напоминает ситуацию, возникающую, когда с поверхности Земли запускают вверх ракету. Если скорость ракеты не очень велика, то из-за гравитации она в конце концов остановится и начнет падать обратно. Если же скорость ракеты больше некоторой критической (около одиннадцати километров в секунду), то гравитационная сила не сможет ее вернуть, и ракета будет вечно продолжать свое движение от Земли. Расширение Вселенной могло быть предсказано на основе ньютоновской теории тяготения в XIX, XVIII и даже в конце XVII века. Однако

вера в статическую Вселенную была столь велика, что жила в умах еще в начале нашего века. Даже Эйнштейн, разрабатывая в 1915 г. общую теорию относительности, был уверен в статичности Вселенной. Чтобы не вступать в противоречие со статичностью, Эйнштейн модифицировал свою теорию, введя в уравнения так называемую космологическую постоянную. Он ввел новую «антигравитационную» силу, которая в отличие от других сил не порождалась каким-либо источником, а была заложена в саму структуру пространства-времени. Эйнштейн утверждал, что пространство-время само по себе всегда расширяется и этим расширением точно уравновешивается притяжение всей остальной материи во Вселенной, так что в результате Вселенная оказывается статической. По-видимому, лишь один человек полностью поверил в общую теорию относительности. пока Эйнштейн и другие физики думали над тем, как обойти нестатичность Вселенной, предсказываемую этой теорией, русский физик и математик А. А. Фридман, наоборот, занялся ее объяснением.

Фридман сделал два очень простых исходных предположения: во-первых, Вселенная выглядит одинаково, в каком бы направлении мы ее ни наблюдали, и во-вторых, это утверждение должно оставаться справедливым и в том случае, если бы мы производили наблюдения из какого-нибудь другого места. Не прибегая ни к каким другим предположениям, Фридман показал, что Вселенная не должна быть статической. В 1922 г., за несколько лет до открытия Хаббла, Фридман в точности предсказал его результат!

Предположение об одинаковости Вселенной во всех направлениях на самом деле, конечно, не выполня-

ется. Как мы, например, уже знаем, другие звезды в нашей Галактике образуют четко выделяющуюся светлую полосу, которая идет по всему небу ночью — Млечный Путь. Но если говорить о далеких галактиках, то их число во всех направлениях примерно одинаково. Следовательно, Вселенная действительно «примерно» одинакова во всех направлениях — при наблюдении в масштабе, большом по сравнению с расстоянием между галактиками, когда отбрасываются мелкомасштабные различия.

Долгое время это было единственным обоснованием гипотезы Фридмана как «грубого» приближения к реальной Вселенной. Но потом по некоей случайности выяснилось, что гипотеза Фридмана и в самом деле дает удивительно точное описание нашей Вселенной.

В 1965 г. два американских физика, Арно Пензиас и Роберт Вильсон, работавших на фирме Bell Laboratories в шт. Нью-Джерси, испытывали очень чувствительный «микроволновый», т. е. сверхвысокочастотный (СВЧ), детектор. (Микроволны — это то же, что и световые волны, но их частота всего лишь десять тысяч миллионов волн в секунду.) Пензиас и Вильсон заметили, что уровень шума, регистрируемого их детектором, выше, чем должно быть. Этот шум не был направленным, приходящим с какой-то определенной стороны. Сначала названные исследователи обнаружили в детекторе птичий помет и пытались объяснить эффект другими причинами подобного рода, но потом все такие «факторы» были исключены. Они знали, что любой шум, приходящий из атмосферы, всегда сильнее не тогда, когда детектор направлен прямо вверх, а когда он наклонен, потому

что лучи света, идущие из-за горизонта, проходят через значительно более толстые слои атмосферы, чем лучи, попадающие в детектор прямо сверху. «Лишний» же шум одинаков, куда бы ни направлять детектор. Следовательно, источник шума должен находиться за пределами атмосферы. Шум был одинаковым и днем, и ночью, и вообще в течение года, несмотря на то что Земля вращается вокруг своей оси и продолжает свое вращение вокруг Солнца. Это означало, что источник излучения находится за пределами Солнечной системы и даже *за пределами* нашей Галактики, ибо в противном случае интенсивность излучения изменялась бы, поскольку в связи с движением Земли детектор меняет свою ориентацию. Как мы знаем, по пути к нам излучение проходит почти через всю наблюдаемую Вселенную. Коль скоро же оно одинаково во всех направлениях, то, значит, и сама Вселенная одинакова во всех направлениях, по крайней мере в крупном масштабе. Теперь нам известно, что, в каком бы направлении мы ни производили наблюдения, этот шум изменяется не больше, чем на одну десятитысячную. Так Пензиас и Вильсон, ничего не подозревая, дали удивительно точное подтверждение первого предположения Фридмана.

Приблизительно в это же время два американских физика из расположенного по соседству Принстонского университета, Боб Дикке и Джим Пиблс, тоже занимались исследованием микроволн. Они проверяли предположение Джорджа Гамова (бывшего ученика А. А. Фридмана) о том, что ранняя Вселенная была очень горячей, плотной и раскаленной добела. Дикке и Пиблс высказали ту мысль, что мы можем

видеть свечение ранней Вселенной, ибо свет, испущенный очень далекими ее областями, мог бы дойти до нас только сейчас. Но из-за расширения Вселенной красное смещение светового спектра должно быть так велико, что дошедший до нас свет будет уже микроволновым (СВЧ) излучением. Дикке и Пиблс готовились к поиску такого излучения, когда Пензиас и Вильсон, узнав о работе Дикке и Пиблса, сообразили, что они его уже нашли. За этот эксперимент Пензиас и Вильсон были удостоены Нобелевской премии 1978 г. (что было не совсем справедливо, если вспомнить о Дикке и Пиблсе, не говоря уже о Гамове!).

Правда, на первый взгляд, тот факт, что Вселенная кажется нам одинаковой во всех направлениях, может говорить о какой-то выделенности нашего местоположения во Вселенной. В частности, раз мы видим, что все остальные галактики удаляются от нас, значит, мы находимся в центре Вселенной. Но есть и другое объяснение: Вселенная будет выглядеть одинаково во всех направлениях и в том случае, если смотреть на нее из какой-нибудь другой галактики. Это, как мы знаем, вторая гипотеза Фридмана. У нас нет научных доводов ни за, ни против этого предположения, и мы приняли его, так сказать, из скромности: было бы крайне странно, если бы Вселенная казалась одинаковой во всех направлениях только вокруг нас, а в других ее точках этого не было! В модели Фридмана все галактики удаляются друг от друга. Это вроде бы как надутый шарик, на который нанесены точки, если его все больше надувать. Расстояние между любыми двумя точками увеличивается, но ни одну из них нельзя назвать центром расши-

рения. Притом чем больше расстояние между точками, тем быстрее они удаляются друг от друга. Но и в модели Фридмана скорость, с которой любые две галактики удаляются друг от друга, пропорциональна расстоянию между ними. Таким образом, модель Фридмана предсказывает, что красное смещение галактики должно быть прямо пропорционально ее удаленности от нас, в точном соответствии с открытием Хаббла. Несмотря на успех этой модели и на согласие ее предсказаний с наблюдениями Хаббла, работа Фридмана оставалась неизвестной на Западе, и лишь в 1935 г. американский физик Говард Робертсон и английский математик Артур Уолкер предложили сходные модели в связи с открытием Хаббла.

Сам Фридман рассматривал только одну модель, но можно указать три разные модели, для которых выполняются оба фундаментальных предположения Фридмана. В модели первого типа (открытой самим Фридманом) Вселенная расширяется достаточно медленно для того, чтобы в силу гравитационного притяжения между различными галактиками расширение Вселенной замедлялось и в конце концов прекращалось. После этого галактики начинают приближаться друг к другу, и Вселенная начинает сжиматься. На рис. 3.2 показано, как меняется со временем расстояние между двумя соседними галактиками. Оно возрастает от нуля до некоего максимума, а потом опять падает до нуля. В модели второго типа расширение Вселенной происходит так быстро, что гравитационное притяжение хоть и замедляет расширение, не может его остановить. На рис. 3.3 показано, как изменяется в этой модели расстояние между галактиками. Кривая выходит из нуля, а в конце концов галактики

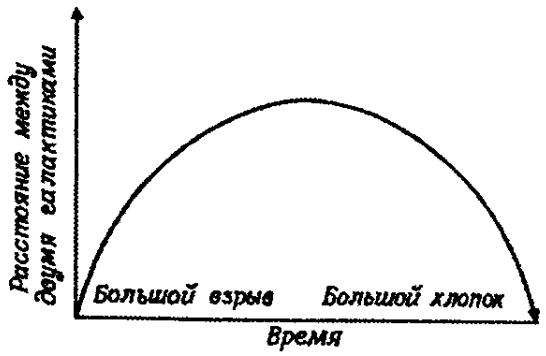


Рис. 3.2

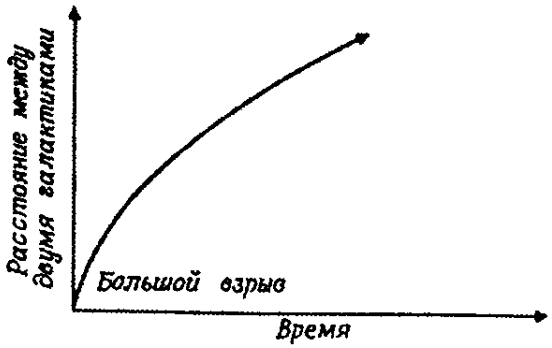


Рис. 3.3

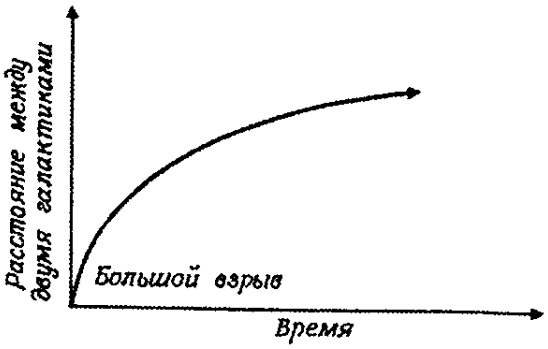


Рис. 3 4

удаляются друг от друга с постоянной скоростью. Есть, наконец, и модель третьего типа, в которой скорость расширения Вселенной только-только достаточна для того, чтобы избежать сжатия до нуля (коллапса). В этом случае расстояние между галактиками тоже сначала равно нулю (рис. 3.4), а потом все время возрастает. Правда, галактики «разбегаются» все с меньшей и меньшей скоростью, но она никогда не падает до нуля.

Модель Фридмана первого типа удивительна тем, что в ней Вселенная не бесконечна в пространстве,

хотя пространство не имеет границ. Гравитация настолько сильна, что пространство, искривляясь, замыкается с самим собой, уподобляясь земной поверхности. Ведь, перемещаясь в определенном направлении по поверхности Земли, вы никогда не натолкнетесь на абсолютно непреодолимую преграду, не вывалитесь через край и в конце концов вернетесь в ту же самую точку, откуда вышли. В первой модели Фридмана пространство такое же, но только вместо двух измерений, поверхность Земли имеет три измерения. Четвертое измерение, время, тоже имеет конечную протяженность, но оно подобно отрезку прямой, имеющему начало и конец. Потом мы увидим, что если общую теорию относительности объединить с квантово-механическим принципом неопределенности, то окажется, что и пространство, и время могут быть конечными, не имея при этом ни краев, ни границ.

Мысль о том, что можно обойти вокруг Вселенной и вернуться в то же место, годится для научной фантастики, но не имеет практического значения, ибо, как можно показать, Вселенная успеет сжаться до нуля до окончания обхода. Чтобы вернуться в исходную точку до наступления конца Вселенной, пришлось бы передвигаться со скоростью, превышающей скорость света, а это невозможно!

В первой модели Фридмана (в которой Вселенная расширяется и сжимается) пространство искривляется, замыкаясь само на себя, как поверхность Земли. Поэтому размеры его конечны. Во второй же модели, в которой Вселенная расширяется бесконечно, пространство искривлено иначе, как поверхность седла. Таким образом, во втором случае пространство бес-

конечно. Наконец, в третьей модели Фридмана (с критической скоростью расширения) пространство плоское (и, следовательно, тоже бесконечное).

Но какая же из моделей Фридмана годится для нашей Вселенной? Перестанет ли Вселенная наконец расширяться и начнет сжиматься или же будет расширяться вечно? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно знать нынешнюю скорость расширения Вселенной и ее среднюю плотность. Если плотность меньше некоторого критического значения, зависящего от скорости расширения, то гравитационное притяжение будет слишком мало, чтобы остановить расширение. Если же плотность больше критической, то в какой-то момент в будущем из-за гравитации расширение Вселенной прекратится и начнется сжатие.

Сегодняшнюю скорость расширения Вселенной можно определить, измеряя (по эффекту Доплера) скорости удаления от нас других галактик. Такие измерения можно выполнить очень точно. Но расстояния до других галактик нам плохо известны, потому что их нельзя измерить непосредственно. Мы знаем лишь, что Вселенная расширяется за каждую тысячу миллионов лет на 5–10%. Однако неопределенность в современном значении средней плотности Вселенной еще больше. Если сложить массы всех наблюдаемых звезд в нашей и других галактиках, то даже при самой низкой оценке скорости расширения сумма окажется меньше одной сотой той плотности, которая необходима для того, чтобы расширение Вселенной прекратилось. Однако и в нашей, и в других галактиках должно быть много темной материи, которую нельзя видеть непосредственно, но о сущес-

твовании которой мы узнаем по тому, как ее гравитационное притяжение влияет на орбиты звезд в галактиках. Кроме того, галактики в основном наблюдаются в виде скоплений, и мы можем аналогичным образом сделать вывод о наличии еще большего количества межгалактической темной материи внутри этих скоплений, влияющего на движение галактик. Сложив массу всей темной материи, мы получим лишь одну десятую того количества, которое необходимо для прекращения расширения. Но нельзя исключить возможность существования и какой-то другой формы материи, распределенной равномерно по всей Вселенной и еще не зарегистрированной, которая могла бы довести среднюю плотность Вселенной до критического значения, необходимого, чтобы остановить расширение. Таким образом, имеющиеся данные говорят о том, что Вселенная, вероятно, будет расширяться вечно. Единственное, в чем можно быть совершенно уверенным, так это в том, что если сжатие Вселенной все-таки произойдет, то никак не раньше, чем через десять тысяч миллионов лет, ибо по крайней мере столько времени она уже расширяется. Но это не должно нас слишком сильно тревожить: к тому времени, если мы не переселимся за пределы Солнечной системы, человечества давно уже не будет — оно угаснет вместе с Солнцем!

Все варианты модели Фридмана имеют то общее, что в какой-то момент времени в прошлом (десять—двадцать тысяч миллионов лет назад) расстояние между соседними галактиками должно было равняться нулю. В этот момент, который называется большим взрывом, плотность Вселенной и кривизна пространства-времени должны были быть бесконечными.

Поскольку математики реально не умеют обращаться с бесконечно большими величинами, это означает, что, согласно общей теории относительности (на которой основаны решения Фридмана), во Вселенной должна быть точка, в которой сама эта теория неприменима. Такая точка в математике называется особой (сингулярной). Все наши научные теории основаны на предположении, что пространство-время гладкое и почти плоское, а потому все эти теории неверны в сингулярной точке большого взрыва, в которой кривизна пространства-времени бесконечна. Следовательно, даже если бы перед большим взрывом происходили какие-нибудь события, по ним нельзя было бы спрогнозировать будущее, так как в точке большого взрыва возможности предсказания свелись бы к нулю. Точно так же, зная только то, что произошло после большого взрыва (а мы знаем только это), мы не сможем узнать, что происходило до него. События, которые произошли до большого взрыва, не могут иметь никаких последствий, касающихся нас, и поэтому не должны фигурировать в научной модели Вселенной. Следовательно, нужно исключить их из модели и считать началом отсчета времени момент большого взрыва.

Мысль о том, что у времени было начало, многим не нравится, возможно, тем, что в ней есть намек на вмешательство божественных сил. (В то же время за модель большого взрыва ухватилась Католическая Церковь и в 1951 г. официально провозгласила, что модель большого взрыва согласуется с Библией.) В связи с этим известно несколько попыток обойтись без большого взрыва. Наибольшую поддержку получила модель стационарной Вселенной. Ее авторами

в 1948 г. были Х. Бонди и Т. Гоулд, бежавшие из оккупированной нацистами Австрии, и англичанин Ф. Хойл, который во время войны работал с ними над проблемой радиолокации. Их идея состояла в том, что по мере разбегания галактик на освободившихся местах из нового непрерывно рождающегося вещества все время образуются новые галактики. Следовательно, Вселенная должна выглядеть примерно одинаково во все моменты времени и во всех точках пространства. Конечно, для непрерывного «творения» вещества требовалась некоторая модификация теории относительности, но нужная скорость творения оказывалась столь малой (одна частица на кубический километр в год), что не возникало никаких противоречий с экспериментом. Стационарная модель — это пример хорошей научной терии в смысле критериев главы 1: она простая и дает определенные предсказания, которые можно проверять путем наблюдений. Одно из ее предсказаний таково: должно быть постоянным число галактик и других аналогичных объектов в любом заданном объеме пространства независимо от того, когда и где во Вселенной производятся наблюдения. В конце 50-х—начале 60-х годов астрономы из Кембриджского университета под руководством М. Райла (который во время войны вместе с Бонди, Гоулдом и Хойлом тоже занимался разработкой радиолокации) составили каталог источников радиоволн, приходящих из внешнего пространства. Эта кембриджская группа показала, что большая часть этих радиоисточников должна находиться вне нашей Галактики (многие источники можно было отождествить даже с другими галактиками) и, кроме того, что слабых источников гораздо

больше, чем сильных. Слабые источники интерпретировались как более удаленные, а сильные — как те, что находятся ближе. Далее, оказалось, что число обычных источников в единице объема в удаленных областях больше, чем вблизи. Это могло означать, что мы находимся в центре огромной области Вселенной, в которой меньше источников, чем в других местах. Но, возможно, было и другое объяснение: в прошлом, когда радиоволны начали свой путь к нам, источников было больше, чем сейчас. Оба эти объяснения противоречат предсказаниям теории стационарной Вселенной. Кроме того, микроволновое излучение, обнаруженное в 1965 г. Пензиасом и Вильсоном, тоже указывало на большую плотность Вселенной в прошлом, и поэтому от модели стационарной Вселенной пришлось отказаться.

В 1963 г. два советских физика, Е. М. Лифшиц и И. М. Халатников, сделали еще одну попытку исключить большой взрыв, а с ним и начало времени. Лифшиц и Халатников высказали предположение, что большой взрыв — особенность лишь моделей Фридмана, которые в конце концов дают лишь приближенное описание реальной Вселенной. Не исключено, что из всех моделей, в какой-то мере описывающих существующую Вселенную, сингулярность в точке большого взрыва возникает только в моделях Фридмана. Согласно Фридману, все галактики удаляются в прямом направлении друг от друга, и поэтому все они находились в одном месте. Однако в реально существующей Вселенной галактики никогда не расходятся точно по прямой: обычно у них есть еще и небольшие составляющие скорости, направленные под углом. Поэтому на самом деле галактикам

не нужно находиться точно в одном месте — достаточно, чтобы они были расположены очень близко друг к другу. Тогда нынешняя расширяющаяся Вселенная могла возникнуть не в сингулярной точке большого взрыва, а на какой-нибудь более ранней фазе сжатия; может быть, при сжатии Вселенной столкнулись друг с другом не все частицы. Какая-то доля их могла пролететь мимо друг друга и снова разойтись в разные стороны, в результате чего и происходит наблюдаемое сейчас расширение Вселенной. Как тогда определить, был ли началом Вселенной большой взрыв? Лифшиц и Халатников занялись изучением моделей, которые в общих чертах были бы похожи на модели Фридмана, но отличались от фридмановских тем, что в них учитывались нерегулярности и случайный характер реальных скоростей галактик во Вселенной. В результате Лифшиц и Халатников показали, что в таких моделях большой взрыв мог быть началом Вселенной даже в том случае, если галактики не всегда разбегаются по прямой, но это могло выполняться лишь для очень ограниченного круга моделей, в которых движение галактик происходит определенным образом. Поскольку же моделей фридмановского типа, не содержащих большой взрыв, бесконечно больше, чем тех, которые содержат такую сингулярность, Лифшиц и Халатников утверждали, что на самом деле большого взрыва не было. Однако позднее они нашли гораздо более общий класс моделей фридмановского типа, которые содержат сингулярности и в которых вовсе не требуется, чтобы галактики двигались каким-то особым образом. Поэтому в 1970 г. Лифшиц и Халатников отказались от своей теории.

Тем не менее их работа имела очень важное значение, ибо показала, что если верна общая теория относительности, то Вселенная *могла* иметь особую точку, большой взрыв. Но эта работа не давала ответа на главный вопрос: следует ли из общей теории относительности, что у Вселенной *должно было* быть начало времени — большой взрыв? Ответ на этот вопрос был получен при совершенно другом подходе, предложенном в 1965 г. английским математиком и физиком Роджером Пенроузом. Исходя из поведения световых конусов в общей теории относительности и того, что гравитационные силы всегда являются силами притяжения, Пенроуз показал, что когда звезда сжимается под действием собственных сил гравитации, она ограничивается областью, поверхность которой в конце концов сжимается до нуля. А раз поверхность этой области сжимается до нуля, то же самое должно происходить и с ее объемом. Все вещество звезды будет сжато в нулевом объеме, так что ее плотность и кривизна пространства-времени станут бесконечными. Иными словами, возникнет сингулярность в некоей области пространства-времени, называемая черной дырой.

На первый взгляд, эта теорема Пенроуза относится только к звездам: в ней ничего не говорится о том, испытала ли вся Вселенная в прошлом большой взрыв. В то время, когда Пенроуз доказал свою теорему, я, будучи аспирантом, отчаянно искал какую-нибудь задачу, чтобы защитить диссертацию. За два года до этого врачи поставили мне диагноз «боковой амиотрофический склероз», или моторная болезнь нейронов, и дали понять, что я протяну не больше одного-двух лет. При таких обстоятельствах не было особого

смысла работать над диссертацией, ибо я не надеялся дожить до ее завершения. Но прошло два года, а хуже мне не стало. Мои дела шли прекрасно, и я был помолвлен с очаровательной девушкой по имени Джейн Уайлд. Для женитьбы мне требовалась работа, а чтобы ее получить, нужна была докторская степень.

В 1965 г. я прочитал о теореме Пенроуза, согласно которой любое тело в процессе гравитационного коллапса должно в конце концов сжаться в сингулярную точку. Вскоре я понял, что если в теореме Пенроуза изменить направление времени на обратное, так, чтобы сжатие перешло в расширение, то эта теорема тоже будет верна, коль скоро Вселенная сейчас хотя бы грубо приближенно описывается в крупном масштабе моделью Фридмана. По теореме Пенроуза конечным состоянием любой коллапсирующей звезды *должна быть* сингулярность; при обращении времени эта теорема утверждает, что в любой модели фридмановского типа начальным состоянием расширяющейся Вселенной тоже должна быть сингулярность. По соображениям технического характера в теорему Пенроуза было введено в качестве условия требование, чтобы Вселенная была бесконечна в пространстве. Поэтому на основании этой теоремы я мог доказать лишь, что сингулярность должна существовать, если расширение Вселенной происходит достаточно быстро, чтобы не началось повторное сжатие (ибо только такие фридмановские модели бесконечны в пространстве).

Потом я несколько лет разрабатывал новый математический аппарат, который позволил бы устранить это и другие технические условия из теоремы о необходимости сингулярности. В итоге в 1970 г. мы

с Пенроузом написали совместную статью, в которой наконец доказали, что сингулярная точка большого взрыва должна существовать, опираясь только на то, что верна общая теория относительности и что во Вселенной содержится столько вещества, сколько мы видим. Наша работа вызвала массу возражений, частично со стороны советских ученых, которые из-за приверженности марксистской философии верили в научный детерминизм, а частично и со стороны тех, кто не принимал саму идею сингулярностей как нарушающую красоту теории Эйнштейна. Но с математической теоремой не очень поспоришь, и поэтому, когда работа была закончена, ее приняли, и сейчас почти все считают, что Вселенная возникла в особой точке большого взрыва. По иронии судьбы мои представления изменились, и теперь я пытаюсь убедить физиков в том, что на самом деле при зарождении Вселенной никакой особой точки не было. В следующих главах я покажу, что при учете квантовых эффектов сингулярность может исчезнуть.

В этой главе мы видели, как менее чем за полстолетия изменились представления людей о природе, формировавшиеся не одну тысячу лет. Начало этим изменениям положили открытое Хаббардом расширение Вселенной и сознание незначительности нашей собственной планеты среди огромных просторов Вселенной. По мере того как множились экспериментальные и теоретические результаты, становилось все более ясно, что у Вселенной должно быть начало во времени. Наконец в 1970 г. мы с Пенроузом доказали это, исходя из общей теории относительности Эйнштейна. Из нашего доказательства следовало, что общая теория относительности пред-

ставляет собой неполную теорию; в ней нет ответа на вопрос, как возникла Вселенная, потому что, согласно теории относительности, все физические теории, в их числе и она сама, нарушаются в точке возникновения Вселенной. Однако общая теория относительности и не претендует на роль полной теории: теоремы о сингулярности на самом деле утверждают лишь, что на некоей очень ранней стадии развития размеры Вселенной были очень малы, настолько, что тогда могли быть весьма существенными мелкомасштабные эффекты, которыми занимается уже другая величайшая теория XX века — квантовая механика. Итак, в начале 70-х годов нам пришлось в своих исследованиях Вселенной переключиться с теории чрезвычайно большого на теорию крайне малого. Этой теории, квантовой механике, будет посвящена следующая глава, а затем мы перейдем к обсуждению того, как эти две частные теории можно было бы объединить в единую квантовую теорию гравитации.

4
Принцип неопределенности

Под влиянием успеха научных теорий, особенно ньютоновской теории тяготения, у французского ученого Пьера Лапласа в начале XIX в. выработался взгляд на Вселенную как на полностью детерминированный объект. Лаплас полагал, что должен существовать набор научных законов, которые позволяли бы предсказать все, что может произойти во Вселенной, если только известно полное описание ее состояния в какой-то момент времени. Например, если бы мы знали положения Солнца и планет, отвечающие какому-то моменту времени, то с помощью законов Ньютона мы могли бы вычислить, в каком состоянии оказалась бы Солнечная система в любой другой момент времени. В данном случае детерминизм довольно очевиден, но Лаплас пошел дальше, утверждая, что существуют аналогичные законы для всего, в том числе и для поведения человека.

Доктрина научного детерминизма встретила сильное сопротивление со стороны многих, почувствовавших, что этим ограничивается свободное вмешательство Бога в наш мир; тем не менее эта идея оставалась обычной научной гипотезой еще в самом начале нашего века. Одним из первых указаний на необходимость отказа от детерминизма стали результаты расчетов двух английских физиков, Джона Рэлея и Джеймса

Джинса, из которых следовало, что горячий объект типа звезды должен все время излучать бесконечно большую энергию. Согласно известным тогда законам, горячее тело должно в равной мере излучать электромагнитные волны всех частот (например, радиоволны, видимый свет, рентгеновское излучение). Это означает, что должно излучаться одинаковое количество энергии и в виде волн с частотами от одного до двух миллионов миллионов волн в секунду, и в виде волн, частоты которых находятся в интервале от двух до трех миллионов миллионов волн в секунду. А поскольку разных частот бесконечно много, полная излучаемая энергия должна быть бесконечной.

Чтобы избавиться от этого явно абсурдного вывода, немецкий ученый Макс Планк в 1900 г. принял гипотезу, согласно которой свет, рентгеновские лучи и другие волны не могут испускаться с произвольной интенсивностью, а должны испускаться только некими порциями, которые Планк назвал квантами. Кроме того, Планк предположил, что каждый квант излучения несет определенное количество энергии, которое тем больше, чем выше частота волн. Таким образом, при достаточно высокой частоте энергия одного кванта может превышать имеющееся количество энергии и, следовательно, высокочастотное излучение окажется подавленным, а интенсивность, с которой тело теряет энергию, будет конечной.

Гипотеза квантов прекрасно согласовалась с наблюдаемыми значениями интенсивности излучения горячих тел, но что она означает для детерминизма, было неясно до 1926 г., когда другой немецкий ученый, Вернер Гейзенберг, сформулировал знаменитый принцип неопределенности. Чтобы предсказать,

каким будет положение и скорость частицы, нужно уметь производить точные измерения ее положения и скорости в настоящий момент. Очевидно, что для этого надо направить на частицу свет. Часть световых волн на ней рассеется, и таким образом мы определим положение частицы в пространстве. Однако точность этого измерения будет не выше, чем расстояние между гребнями двух соседних волн, и поэтому для точного измерения положения частицы необходим коротковолновый свет. Согласно же гипотезе Планка, свет невозможно использовать произвольно малыми порциями, и не бывает меньшей порции, чем один квант. Этот квант света внесет возмущение в движение частицы и непредсказуемо изменит ее скорость. Кроме того, чем точнее измеряется положение, тем короче должны быть длины световых волн, а следовательно, тем больше будет энергия одного кванта. Это значит, что возмущение скорости частицы станет больше. Иными словами, чем точнее вы пытаетесь измерить положение частицы, тем менее точными будут измерения ее скорости, и наоборот. Гейзенберг показал, что неопределенность в положении частицы, умноженная на неопределенность в ее скорости и на ее массу, не может быть меньше некоторого числа, которое называется сейчас постоянной Планка. Это число не зависит ни от способа, которым измеряется положение или скорость частицы, ни от типа этой частицы, т. е. принцип неопределенности Гейзенберга является фундаментальным, обязательным свойством нашего мира.

Принцип неопределенности имеет далеко идущие следствия, относящиеся к нашему восприятию окружающего мира. Даже по прошествии более пятидеся-

ти лет многие философы так окончательно и не согласились с ними, и эти следствия до сих пор остаются предметом споров. Принцип неопределенности означал конец мечтам Лапласа о научной теории, которая давала бы полностью детерминированную модель Вселенной: в самом деле, как можно точно предсказывать будущее, не умея даже в настоящий момент производить точные измерения состояния Вселенной! Конечно, мы можем себе представлять, что существует некий набор законов, полностью определяющий события для какого-то сверхъестественного существа, которое способно наблюдать современное состояние Вселенной, никак не возмущая ее. Однако такие модели Вселенной не представляют интереса для нас — простых смертных. Лучше, пожалуй, воспользовавшись тем принципом «экономии», который называется принципом «бритвы Оккама»[1], взять и вырезать все положения теории, которые не поддаются наблюдению. Приняв такой подход, Вернер Гейзенберг, Эрвин Шредингер и Поль Дирак в 20-х годах нашего века пересмотрели механику и пришли к новой теории — квантовой механике, в основу которой был положен принцип неопределенности. В квантовой механике частицы больше не имеют таких определенных и не зависящих друг от друга характеристик, как положение в пространстве и скорость, недоступных для наблюдения. Вместо этого они характеризуются квантовым состоянием, которое представляет собой некую комбинацию положения и скорости.

[1] У. Оккам (1285–1349) — английский философ Суть принципа «бритвы Оккама»: понятия, не поддающиеся проверке в опыте, должны быть удалены из науки. — *Прим. ред.*

Квантовая механика, вообще говоря, не предсказывает, что наблюдение должно иметь какой-то единственный определенный результат. Наоборот, она предсказывает некий ряд разных результатов и дает вероятность каждого из них. Это значит, что, выполнив одно и то же измерение для многих одинаковых систем, начальные состояния которых совпадают, мы бы обнаружили, что в одном числе случаев результат измерения равен А, в другом — Б и т. д. Мы можем предсказать, в скольких примерно случаях результат будет равняться А и Б, но определить результат каждого конкретного измерения невозможно. Таким образом, квантовая механика вносит в науку неизбежный элемент непредсказуемости или случайности. Эйнштейн выступил очень резко против этой концепции, несмотря на ту огромную роль, которую сам сыграл в ее развитии. За огромный вклад в квантовую теорию Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия. Но он никогда не мог согласиться с тем, что Вселенной управляет случай. Все чувства Эйнштейна нашли свое выражение в его знаменитом высказывании: «Бог не играет в кости». Однако большинство остальных ученых были склонны принять квантовую механику, потому что она прекрасно согласовалась с экспериментом. Квантовая механика в самом деле является выдающейся теорией и лежит в основе почти всей современной науки и техники. Принципы квантовой механики положены в основу работы полупроводниковых и интегральных схем, которые являются важнейшей частью таких электронных устройств, как телевизоры и электронно-вычислительные машины. На квантовой механике зиждется современная химия и биология. Единственные

области физики, которые пока не используют должным образом квантовую механику, — это теория гравитации и теория крупномасштабной структуры Вселенной.

Несмотря на то что световое излучение состоит из волн, тем не менее, согласно гипотезе Планка, свет в каком-то смысле ведет себя так, как будто он образован частицами: излучение и поглощение света происходит только в виде порций, или квантов. Принцип же неопределенности Гейзенберга говорит о том, что частицы в каком-то смысле ведут себя как волны: они не имеют определенного положения в пространстве, а «размазаны» по нему с некоторым распределением вероятности. В квантово-механической теории используется совершенно новый математический аппарат, который уже не описывает сам реальный мир на основе представлений о частицах и волнах; эти понятия можно теперь относить только к результатам наблюдений в этом мире. Таким образом, в квантовой механике возникает частично-волновой дуализм: в одних случаях частицы удобно считать волнами, а в других лучше считать волны частицами. Из этого следует один важный вывод: мы можем наблюдать так называемую интерференцию между двумя волнами-частицами. Гребни волн одной из них могут, например, совпадать со впадинами другой. Тогда две волны гасят друг друга, а не усиливают, суммируясь, как можно было бы ожидать, в более высокие волны (рис. 4.1). Всем известный пример интерференции света — переливающиеся разными цветами радуги мыльные пузыри. Это явление возникает в результате отражения света от двух поверхностей тонкой пленки воды, которая образует пузырь. Белый свет

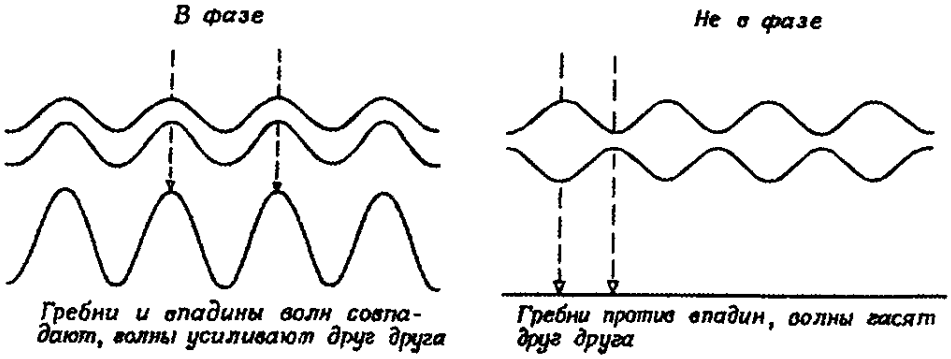


Рис. 4 1

содержит всевозможные длины волн, отвечающие разным цветам. Гребни некоторых волн, отраженных от одной из поверхностей мыльной пленки, совпадают со впадинами волн той же длины, отраженных от второй поверхности пузыря. Тогда в отраженном свете будут отсутствовать цвета, соответствующие этим длинам волн, и отраженный свет окажется разноцветным.

Итак, благодаря возникшему в квантовой механике дуализму частицы тоже могут испытывать интерференцию. Широко известный пример такой интерференции частиц — опыт с двумя щелями в экране (рис. 4.2). Рассмотрим экран, в котором прорезаны две узкие параллельные щели. По одну сторону от экрана со щелями помещен источник света какого-то определенного цвета (т. е. определенной длины волны). Свет в основном попадает на поверхность экрана, но небольшая его часть пройдет сквозь щели. Далее представим себе экран для наблюдения, установленный по другую от источника света сторону экрана со щелями. Тогда в любую точку экрана для наблюдения будут попадать световые волны из обеих щелей. Но расстояние, пройденное светом через

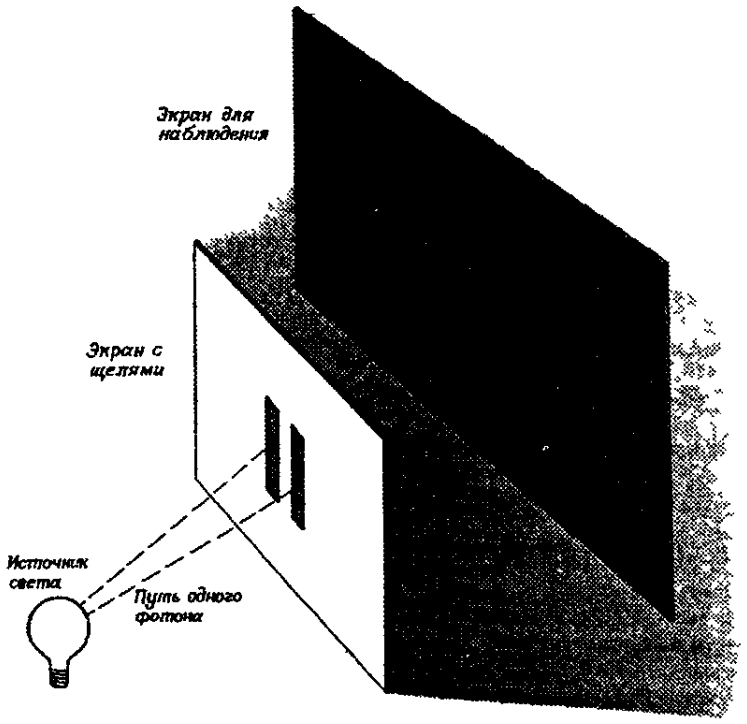


Рис. 4 2

щели от источника до экрана, будет, вообще говоря, разным. Это означает, что волны, прошедшие через щели, попадут на экран в разной фазе: в одних местах они будут ослаблять друг друга, а в других — усиливать. В результате на экране получится характерная картина, составленная из темных и светлых полос.

Удивительно, что в точности такие же полосы возникают при замене источника света источником частиц, скажем, электронов, вылетающих с определенной скоростью (это означает, что им соответствуют волны определенной длины). Описанное явление тем более странно, что при наличии только одной щели никакие полосы не возникают и на экране появляется просто однородное распределение электронов. Можно было бы предположить, что еще одна щель просто увеличит число электронов, попадающих в каждую точку экрана, но на самом деле из-за интерференции число этих электронов в некоторых мес-

тах, наоборот, уменьшается. Если пропускать через щели по одному электрону за раз, то можно было бы ожидать, что каждый из них пройдет либо через одну щель, либо через другую, т. е. будет вести себя так, как будто та щель, через которую он прошел, единственная, и тогда на экране должно возникнуть однородное распределение. Однако на самом деле полосы появляются даже в том случае, когда электроны выпускаются по одному. Следовательно, каждый электрон должен проходить сразу через *обе* щели!

Явление интерференции частиц стало решающим для нашего понимания структуры атомов, тех мельчайших «кирпичиков», которые рассматриваются в химии и биологии и из которых построены мы сами и все вокруг нас. В начале века считалось, что атомы подобны Солнечной системе: электроны (частицы, несущие отрицательный электрический заряд), как планеты вокруг Солнца, вращаются вокруг расположенного в центре ядра, заряженного положительно. Предполагалось, что электроны удерживаются на орбитах силами притяжения между положительными и отрицательными зарядами аналогично тому, как гравитационное притяжение между Солнцем и планетами не дает планетам уйти с орбит. Это объяснение наталкивалось на следующую трудность: до появления квантовой механики законы механики и электричества предсказывали, что электроны должны терять энергию, а из-за этого двигаться по спирали к центру атома и падать на ядро. Это означало бы, что атомы, а с ними, конечно, и вся материя должны быстро сколлапсировать в состояние с очень высокой плотностью. Частное решение этой проблемы нашел в 1913 г. датский ученый Нильс Бор. Бор постулиро-

вал, что электроны могут двигаться не по любым орбитам, а только по тем, которые лежат на некоторых определенных расстояниях от центрального ядра. Если бы было сделано и предположение о том, что на каждой такой орбите могут находиться только один или два электрона, то проблема коллапса атома была бы решена, потому что тогда электроны, двигаясь по спирали к центру, могли бы лишь заполнить орбиты с минимальными радиусами и энергиями.

Эта модель прекрасно объясняла строение простейшего атома — атома водорода, у которого вокруг ядра вращается всего один электрон. Было, однако, непонятно, как тот же подход распространить на более сложные атомы. Кроме того, предположение об ограниченном числе разрешенных орбит выглядело весьма произвольным. Эту трудность разрешила новая теория — квантовая механика. Оказалось, что электрон, вращающийся вокруг ядра, можно представить себе как волну, длина которой зависит от ее скорости. Вдоль некоторых орбит укладывается целое (а не дробное) число длин волн электрона. При движении по этим орбитам гребни волн окажутся в одном и том же месте на каждом витке, и поэтому волны будут складываться; такие орбиты относятся к боровским разрешенным орбитам. А для тех орбит, вдоль которых не укладывается целое число длин волн электрона, каждый гребень по мере обращения электронов рано или поздно скомпенсируется впадиной; такие орбиты не будут разрешенными.

Американский ученый Ричард Фейнман придумал красивый способ, который дает возможность наглядно представить себе дуализм волна—частица. Фейнман ввел так называемое суммирование по траекто-

риям. В этом подходе в отличие от классической, неквантовой теории нет предположения о том, что частица должна иметь одну-единственную траекторию в пространстве-времени, а наоборот, считается, что частица может перемещаться из А в Б по любому возможному пути. С каждой траекторией связаны два числа: одно из них описывает размеры волны, а другое отвечает ее положению в цикле (гребень или впадина). Чтобы определить вероятности перехода из А в Б, надо сложить волны для всех этих траекторий. Если сравнить между собой несколько соседних траекторий, то их фазы, или положения в цикле, будут сильно различаться. Это значит, что волны, соответствующие таким траекториям, будут почти полностью гасить друг друга. Однако для некоторых семейств соседних траекторий фазы при переходе от траектории к траектории будут мало меняться, и соответствующие им волны не скомпенсируют друг друга. Такие траектории относятся к боровским разрешенным орбитам.

Основываясь на таких представлениях, записанных в конкретном математическом виде, можно было по сравнительно простой схеме вычислить разрешенные орбиты для более сложных атомов и даже для молекул, состоящих из нескольких атомов, которые держатся вместе за счет электронов, чьи орбиты охватывают больше одного ядра. Поскольку строение молекул и происходящие между ними реакции являются основой всей химии и всей биологии, квантовая механика в принципе позволяет предсказать все, что мы видим вокруг себя, с точностью, которую допускает принцип неопределенности. (Правда, на практике расчеты систем, содержащих много электронов,

оказываются настолько сложными, что произвести их просто невозможно.)

Крупномасштабная структура Вселенной, по-видимому, подчиняется общей теории относительности Эйнштейна. Эта теория называется классической, потому что в ней не учитывается квантово-механический принцип неопределенности, который необходимо учитывать для согласования с другими теориями. Мы же не вступаем в противоречие с результатами наблюдений из-за того, что все гравитационные поля, с которыми обычно приходится иметь дело, являются очень слабыми. Однако, согласно теоремам о сингулярности, о которых говорилось выше, гравитационное поле должно становиться очень сильным по крайней мере в двух ситуациях: в случае черных дыр и в случае большого взрыва. В таких сильных полях должны быть существенными квантовые эффекты. Следовательно, классическая общая теория относительности, предсказав точки, в которых плотность становится бесконечной, в каком-то смысле сама предрекла свое поражение в точности так же, как классическая (т. е. неквантовая) механика обрекла себя на провал заключением о том, что атомы должны коллапсировать, пока их плотность не станет бесконечной. У нас еще нет полной теории, в которой общая теория относительности была бы непротиворечиво объединена с квантовой механикой, но зато мы знаем кое-какие свойства будущей теории. О том, что вытекает из этих свойств в отношении черных дыр и большого взрыва, мы поговорим в последующих главах. А сейчас займемся самыми последними попытками объединения наших представлений обо всех других силах природы в одну, единую квантовую теорию.

5
Элементарные частицы и силы в природе

Аристотель считал, что вещество во Вселенной состоит из четырех основных элементов — земли, воздуха, огня и воды, на которые действуют две силы: сила тяжести, влекущая землю и воду вниз, и сила легкости, под действием которой огонь и воздух стремятся вверх. Такой подход к строению Вселенной, когда все делится на вещество и силы, сохраняется и по сей день.

По Аристотелю, вещество непрерывно, т. е. любой кусок вещества можно бесконечно дробить на все меньшие и меньшие кусочки, так и не дойдя до такой крошечной крупинки, которая дальше бы уже не делилась. Однако некоторые другие греческие философы, например Демокрит, придерживались мнения, что материя по своей природе имеет зернистую структуру и все в мире состоит из большого числа разных атомов (греческое слово «атом» означает неделимый). Проходили века, но спор продолжался без всяких реальных доказательств, которые подтверждали бы правоту той или другой стороны. Наконец, в 1803 г. английский химик и физик Джон Дальтон показал, что тот факт, что химические вещества всегда соединяются в определенных пропорциях, можно объяснить, предположив, что атомы объединяются в группы, которые называются молекулами. Однако

до начала нашего века спор между двумя школами так и не был решен в пользу атомистов. В разрешение этого спора очень важный вклад внес Эйнштейн. В своей статье, написанной в 1905 г., за несколько недель до знаменитой работы о специальной теории относительности, Эйнштейн указал на то, что явление, носящее название броуновского движения, — нерегулярное, хаотическое движение мельчайших частичек, взвешенных в воде, — можно объяснить ударами атомов жидкости об эти частички.

К тому времени уже имелись некоторые основания подумывать о том, что и атомы тоже не неделимы. Несколькими годами раньше Дж. Дж. Томсон из Тринити-колледжа в Кембридже открыл новую частицу материи — электрон, масса которого меньше одной тысячной массы самого легкого атома. Экспериментальная установка Томсона немного напоминала современный телевизионный кинескоп. Раскаленная докрасна металлическая нить служила источником электронов. Поскольку электроны заряжены отрицательно, они ускорялись в электрическом поле и двигались в сторону экрана, покрытого слоем люминофора. Когда электроны падали на экран, на нем возникали вспышки света. Вскоре стало понятно, что эти электроны должны вылетать из атомов, и в 1911 г. английский физик Эрнст Резерфорд наконец доказал, что атомы вещества действительно обладают внутренней структурой: они состоят из крошечного положительно заряженного ядра и вращающихся вокруг него электронов. Резерфорд пришел к этому выводу, изучая, как отклоняются α-частицы (положительно заряженные частицы, испускаемые атомами радиоактивных веществ) при столкновении с атомами.

Вначале думали, что ядро атома состоит из электронов и положительно заряженных частиц, которые назвали протонами (от греческого слово «протос» — первичный), потому что протоны считались теми фундаментальными блоками, из которых состоит материя. Однако в 1932 г. Джеймс Чедвик, коллега Резерфорда по Кембриджскому университету, обнаружил, что в ядре имеются еще и другие частицы — нейтроны, масса которых почти равна массе протона, но которые не заряжены. За это открытие Чедвик был удостоен Нобелевской премии и выбран главой Конвилл-энд-Кайус-колледжа Кембриджского университета (колледж, в котором я сейчас работаю). Потом ему пришлось отказаться от этого поста из-за разногласий с сотрудниками. В колледже постоянно происходили ожесточенные споры, которые начались с тех пор, как после войны группа вернувшейся молодежи проголосовала против того, чтобы старые сотрудники оставались на своих должностях, которые они уже много лет занимали. Все это происходило еще до меня; я начал работать в колледже в 1965 г. и застал самый конец борьбы, когда другой глава колледжа, нобелевский лауреат Невилл Мотт, вынужден был тоже уйти в отставку.

Еще лет двадцать назад протоны и нейтроны считались «элементарными» частицами, но эксперименты по взаимодействию протонов и электронов, движущихся с большими скоростями, с протонами показали, что на самом деле протоны состоят из еще более мелких частиц. Мюррей Гелл-Манн, теоретик из Калифорнийского технологического института, назвал эти частицы кварками. В 1969 г. за исследование кварков Гелл-Манн был удостоен Нобелевской

премии. Название «кварк» взято из заумной стихотворной строки Джеймса Джойса: «Три кварка для мастера Марка!». По идее, слово quark должно произноситься так же, как слово quart (куорт), в которой буква *t* на конце заменена буквой *k*, но обычно его произносят так, что оно рифмуется со словом lark.

Известно несколько разновидностей кварков: предполагают, что существует по крайней мере шесть «ароматов», которым отвечают *u*-кварк, *d*-кварк, странный кварк, очарованный кварк, *b*-кварк и *t*-кварк. Кварк каждого «аромата» может быть еще и трех «цветов» — красного, зеленого и синего. (Следует подчеркнуть, что это просто обозначения, так как размер кварков значительно меньше длины волны видимого света и поэтому цвета в обычном смысле слова у них нет. Дело просто в том, что современным физикам нравится придумывать названия новых частиц и явлений, не ограничивая больше свою фантазию греческим алфавитом!) Протон и нейтрон состоят из трех кварков разных «цветов». В протоне содержится два *u*-кварка и один *d*-кварк, в нейтроне — два *d*-кварка и один *u*-кварк. Частицы можно строить и из других кварков (странного, очарованного, *b* и *t*), но все эти кварки обладают гораздо большей массой и очень быстро распадаются на протоны и нейтроны.

Мы уже знаем, что ни атомы, ни находящиеся внутри атома протоны с нейтронами не являются неделимыми, а потому возникает вопрос: что же такое настоящие элементарные частицы — те исходные кирпичи, из которых все состоит? Поскольку длины световых волн существенно больше размеров атома, у нас нет надежды «увидеть» составные части атома обычным способом. Для этой цели необходимы зна-

чительно меньшие длины волн. В предыдущей главе мы узнали, что, согласно квантовой механике, все частицы на самом деле являются еще и волнами и чем выше энергия частицы, тем меньше соответствующая длина волны. Таким образом, наш ответ на поставленный вопрос зависит от того, насколько высока энергия частиц, имеющихся в нашем распоряжении, потому что ею определяется насколько мал масштаб тех длин, которые мы сможем наблюдать. Единицы, в которых обычно измеряется энергия частиц, называются электронвольтами. (Томсон в своих экспериментах для ускорения электронов использовал электрическое поле. Электронвольт — это энергия, которую приобретает электрон в электрическом поле величиной 1 вольт.) В XIX в., когда умели использовать только частицы с энергиями в несколько электронвольт, выделяющимися в химических реакциях типа горения, атомы считались самыми мелкими частями материи. В экспериментах Резерфорда энергии α-частиц составляли миллионы электронвольт. Затем мы научились с помощью электромагнитных полей разгонять частицы сначала до энергий в миллионы, а потом и в тысячи миллионов электронвольт. Так мы узнали, что частицы, которые двадцать лет назад считались элементарными, на самом деле состоят из меньших частиц. А что если при переходе к еще более высоким энергиям окажется, что и эти меньшие частицы в свою очередь состоят из еще меньших? Конечно, это вполне вероятная ситуация, но у нас сейчас есть некоторые теоретические основания считать, что мы уже владеем или почти владеем сведениями об исходных «кирпичиках», из которых построено все в природе.

Все, что есть во Вселенной, в том числе свет и гравитацию, можно описывать, исходя из представления о частицах, с учетом частично-волнового дуализма, о котором мы говорили в предыдущей главе. Частицы же имеют некую вращательную характеристику — спин[1]. Представим себе частицы в виде маленьких волчков, вращающихся вокруг своей оси. Правда, такая картина может ввести в заблуждение, потому что в квантовой механике частицы не имеют вполне определенной оси вращения. На самом деле спин частицы дает нам сведения о том, как выглядит эта частица, если смотреть на нее с разных сторон. Частица со спином 0 похожа на точку: она выглядит со всех сторон одинаково (рис. 5.1, I). Частицу со спином 1 можно сравнить со стрелой: с разных сторон она выглядит по-разному (рис. 5.1, II) и принимает тот же вид лишь после полного оборота на 360°. Частицу со спином 2 можно сравнить со стрелой, заточенной с обеих сторон: любое ее положение повторяется после полуоборота (180°). Аналогичным образом частица с более высоким спином возвращается в первоначальное состояние при повороте на еще меньшую часть полного оборота. Это все довольно очевидно, а удивительно другое — существуют частицы, которые после полного оборота не принимают прежний вид: их нужно дважды полностью повернуть! Говорят, что такие частицы обладают спином 1/2.

Все известные частицы во Вселенной можно разделить на две группы: частицы со спином 1/2, из которых состоит вещество во Вселенной, и частицы со спином 0, 1 и 2, которые, как мы увидим, создают

[1] *Spin* — вращаться, крутиться (*англ.*). — *Прим. перев.*

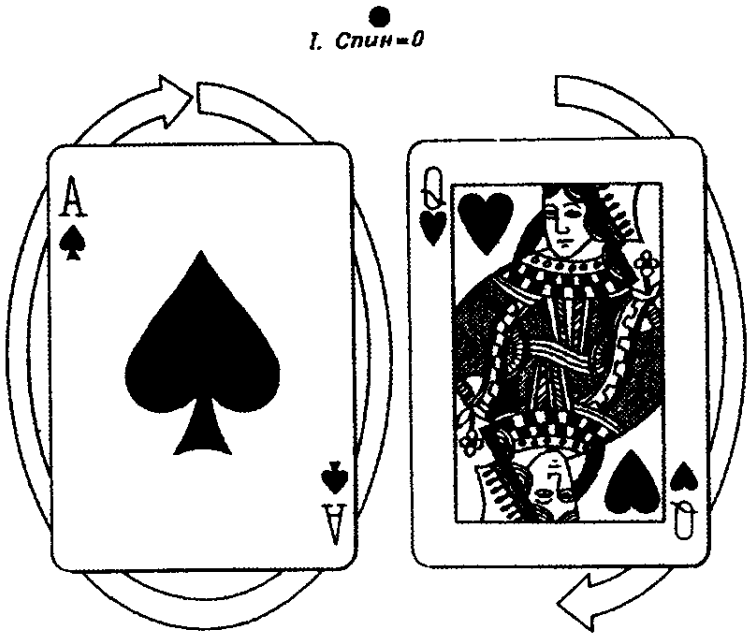


Рис. 5.1

силы, действующие между частицами вещества. Частицы вещества подчиняются так называемому принципу запрета Паули, открытому в 1925 г. австрийским физиком Вольфгангом Паули. В 1945 г. Паули за свое открытие был удостоен Нобелевской премии. Он являл собой идеальный пример физика-теоретика: говорят, что одно его присутствие в городе нарушало ход всех экспериментов! Принцип Паули гласит, что две одинаковые частицы не могут существовать в одном и том же состоянии, т. е. не могут иметь координаты и скорости, одинаковые с той точностью, которая задается принципом неопределенности. Принцип Паули имеет крайне важное значение, так как он позволил объяснить, почему под действием сил, создаваемых частицами со спином 0, 1, 2, частицы материи не коллапсируют в состояние с очень высокой плотностью: если частицы вещества имеют очень близкие значения координат, то их скорости должны быть разными, и, следовательно, они

не смогут долго находиться в точках с этими координатами. Если бы в сотворении мира не участвовал принцип Паули, кварки не могли бы объединиться в отдельные, четко определенные частицы — протоны и нейтроны, которые в свою очередь не смогли бы, объединившись с электронами, образовать отдельные, четко определенные атомы. Без принципа Паули все эти частицы сколлапсировали бы и превратились в более или менее однородное и плотное «желе».

Правильное представление об электроне и других частицах со спином 1/2 отсутствовало до 1928 г., когда Поль Дирак предложил теорию для описания этих частиц. Впоследствии Дирак получил кафедру математики в Кембридже (которую в свое время занимал Ньютон и которую сейчас занимаю я). Теория Дирака была первой теорией такого рода, которая согласовалась и с квантовой механикой, и со специальной теорией относительности. В ней давалось математическое объяснение того, почему спин электрона равен 1/2, т. е. почему при однократном полном обороте электрона он не принимает прежний вид, а при двукратном принимает. Теория Дирака предсказывала также, что у электрона должен быть партнер — антиэлектрон, или, иначе, позитрон. Открытие позитрона в 1932 г. подтвердило теорию Дирака, и в 1933 г. он получил Нобелевскую премию по физике. Сейчас мы знаем, что каждой частице соответствует античастица, с которой она может аннигилировать. (В случае частиц, обеспечивающих взаимодействие, частица и античастица — одно и то же.) Могли бы существовать целые антислова и антилюди, состоящие из античастиц. Но встретив антисебя, не вздумайте поздороваться с ним за руку! Возникнет ослепительная

вспышка света, и вы оба исчезнете. Чрезвычайно важен вопрос, почему вокруг нас гораздо больше частиц, чем античастиц. Мы к нему еще вернемся в этой главе.

В квантовой механике предполагается, что все силы, или взаимодействия, между частицами вещества переносятся частицами с целочисленным спином, равным 0, 1 или 2. Частица вещества, например электрон или кварк, испускает частицу, которая является переносчиком взаимодействия. В результате отдачи скорость частицы вещества меняется. Затем частица-переносчик налетает на другую частицу вещества и поглощается ею. Это соударение изменяет скорость второй частицы, как будто между этими двумя частицами вещества действует сила.

Частицы-переносчики взаимодействия обладают одним важным свойством: они не подчиняются принципу запрета Паули. Это означает отсутствие ограничений для числа обмениваемых частиц, так что возникающая сила взаимодействия может оказаться большой. Но если масса частиц-переносчиков велика, то на больших расстояниях их рождение и обмен будут затруднены. Таким образом, переносимые ими силы будут короткодействующими. Если же частицы-переносчики не будут обладать собственной массой, возникнут дальнодействующие силы. Частицы-переносчики, которыми обмениваются частицы вещества, называются виртуальными, потому что в отличие от реальных их нельзя непосредственно зарегистрировать при помощи детектора частиц. Однако мы знаем, что виртуальные частицы существуют, потому что они создают эффекты, поддающиеся измерению: благодаря виртуальным частицам

возникают силы, действующие между частицами вещества. При некоторых условиях частицы со спинами 0, 1, 2 существуют и как реальные; тогда их можно непосредственно зарегистрировать. С точки зрения классической физики такие частицы встречаются нам в виде волн, скажем световых или гравитационных. Они иногда испускаются при взаимодействии частиц вещества, протекающем за счет обмена частицами-переносчиками взаимодействия. (Например, электрическая сила взаимного отталкивания между двумя электронами возникает за счет обмена виртуальными фотонами, которые нельзя непосредственно зарегистрировать. Но если электроны пролетают друг мимо друга, то возможно испускание реальных фотонов, которые будут зарегистрированы как световые волны.)

Частицы-переносчики можно разделить на четыре типа в зависимости от величины переносимого ими взаимодействия и от того, с какими частицами они взаимодействовали. Подчеркнем, что такое разделение совершенно искусственно; это схема, удобная для разработки частных теорий, ничего более серьезного в ней, вероятно, нет. Большинство физиков надеется, что в конце концов удастся создать единую теорию, в которой все четыре силы оказались бы разновидностями одной и той же силы. Многие даже видят в этом главную цель современной физики. Недавно увенчались успехом попытки объединения трех сил. В этой главе я еще собираюсь о них рассказать. О том, как обстоит дело с включением в такое объединение гравитации, мы поговорим немного позже.

Итак, первая разновидность сил — гравитационная сила. Гравитационные силы носят универсальный

характер. Это означает, что всякая частица находится под действием гравитационной силы, величина которой зависит от массы или энергии частицы. Гравитация гораздо слабее каждой из оставшихся трех сил. Это очень слабая сила, которую мы вообще не заметили бы, если бы не два ее специфических свойства: гравитационные силы действуют на больших расстояниях и всегда являются силами притяжения. Следовательно, очень слабые гравитационные силы взаимодействия отдельных частиц в двух телах большого размера, таких, например, как Земля и Солнце, могут в сумме дать очень большую силу. Три остальных вида взаимодействия либо действуют только на малых расстояниях, либо являются то отталкивающими, то притягивающими, что приводит в общем к компенсации. В квантово-механическом подходе к гравитационному полю считается, что гравитационная сила, действующая между двумя частицами материи, переносится частицей со спином 2, которая называется гравитоном. Гравитон не обладает собственной массой, и поэтому переносимая им сила является дальнодействующей. Гравитационное взаимодействие между Солнцем и Землей объясняется тем, что частицы, из которых состоят Земля и Солнце, обмениваются гравитонами. Несмотря на то что в обмене участвуют лишь виртуальные частицы, создаваемый ими эффект безусловно поддается измерению, потому что этот эффект — вращение Земли вокруг Солнца! Реальные гравитоны распространяются в виде волн, которые в классической физике называются гравитационными, но они очень слабые, и их так трудно зарегистрировать, что пока это никому не удалось сделать.

Следующий тип взаимодействия создается электромагнитными силами, которые действуют между электрически заряженными частицами, как, например, электроны и кварки, но не отвечают за взаимодействие таких незаряженных частиц, как гравитоны. Электромагнитные взаимодействия гораздо сильнее гравитационных: электромагнитная сила, действующая между двумя электронами, примерно в миллион миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов (1 с сорока двумя нулями) раз больше гравитационной силы. Но существуют два вида электрического заряда — положительный и отрицательный. Между двумя положительными зарядами так же, как и между двумя отрицательными, действует сила отталкивания, а между положительным и отрицательным зарядами — сила притяжения. В больших телах, например в Земле или Солнце, содержание положительных и отрицательных зарядов почти одинаково, и, следовательно, силы притяжения и отталкивания почти компенсируют друг друга, и остается очень малая чисто электромагнитная сила. Однако в малых масштабах атомов и молекул электромагнитные силы доминируют. Под действием электромагнитного притяжения между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженными протонами в ядре электроны в атоме вращаются вокруг ядра в точности так же, как под действием гравитационного притяжения Земля вращается вокруг Солнца. Электромагнитное притяжение описывается как результат обмена большим числом виртуальных безмассовых частиц со спином 1, которые называются фотонами. Как и в случае гравитонов, фотоны, осуществляющие обмен, являются виртуальными,

но при переходе фотона с одной разрешенной орбиты на другую, расположенную ближе к ядру, освобождается энергия, и в результате испускается реальный фотон, который при подходящей длине волны можно наблюдать человеческим глазом как видимый свет, или же с помощью какого-нибудь детектора фотонов, например фотопленки. Аналогичным образом при соударении реального фотона с атомом может произойти переход электрона с одной орбиты на другую, более далекую от ядра. Этот переход происходит за счет энергии фотона, который поглощается атомом.

Взаимодействие третьего типа называется слабым взаимодействием. Оно отвечает за радиоактивность и существует между всеми частицами вещества со спином 1/2, но в нем не участвуют частицы со спином 0, 1, 2 — фотоны и гравитоны. До 1967 г. свойства слабых сил были плохо изучены, а в 1967 г. Абдус Салам, теоретик из Лондонского Империал-колледжа, и Стивен Вайнберг из Гарвардского университета одновременно предложили теорию, которая объединяла слабое взаимодействие с электромагнитным аналогично тому, как на сто лет раньше Максвелл объединил электричество и магнетизм. Вайнберг и Салам высказали предположение о том, что в дополнение к фотону существуют еще три частицы со спином 1, которые все вместе называются тяжелыми векторными бозонами и являются переносчиками слабого взаимодействия. Эти бозоны были обозначены символами W^+, W^- и Z^0, масса каждого из них составляла 100 ГэВ (ГэВ означает гигаэлектронвольт, т. е. тысяча миллионов электронвольт). Теория Вайнберга—Салама обладает свойством так называемого спонтанного нарушения симметрии. Оно означает,

что частицы, совершенно разные при низких энергиях, при высоких энергиях оказываются на самом деле одной и той же частицей, но находящейся в разных состояниях. Это в каком-то смысле похоже на поведение шарика при игре в рулетку. При всех высоких энергиях (т. е. при быстром вращении колеса) шарик ведет себя всегда почти одинаково — безостановочно вращается. Но когда колесо замедлится, энергия шарика уменьшается, и в конце концов он проваливается в одну из тридцати семи канавок, имеющихся на колесе. Иными словами, при низких энергиях шарик может существовать в тридцати семи состояниях. Если бы мы почему-либо могли наблюдать шарик только при низких энергиях, то считали бы, что существует тридцать семь разных типов шариков!

Теория Вайнберга—Салама предсказывала, что при энергиях, значительно превышающих 100 ГэВ, три новые частицы и фотон должны вести себя одинаково, а при более низких энергиях частиц, т. е. в большинстве обычных ситуаций, эта «симметрия» должна нарушаться. Массы W^+-, W^-- и Z^0-бозонов предсказывались большими, чтобы создаваемые ими силы имели очень малый радиус действия. Когда Вайнберг и Салам выдвинули свою теорию, им мало кто верил, а на маломощных ускорителях тех времен невозможно было достичь энергии в 100 ГэВ, необходимой для рождения реальных W^+-, W^-- и Z^0-частиц. Однако лет через десять предсказания, полученные в этой теории при низких энергиях, настолько хорошо подтвердились экспериментально, что Вайнбергу и Саламу была присуждена Нобелевская премия 1979 г. совместно с Шелдоном Глэшоу (тоже из Гарварда),

который предложил похожую единую теорию электромагнитных и слабых ядерных взаимодействий. Комитет по Нобелевским премиям был избавлен от неприятностей, которые могли бы возникнуть, если бы оказалось, что он совершил ошибку сделанным в 1983 г. в ЦЕРНе открытием трех массивных партнеров фотона с правильными значениями массы и другими предсказанными характеристиками. Карло Руббиа, возглавивший группу из нескольких сотен физиков, которым принадлежало это открытие, получил Нобелевскую премию 1984 г., присужденную ему совместно с инженером ЦЕРНа Симоном Ван дер Меером, автором проекта накопителя античастиц, использованного в эксперименте. (В наше время чрезвычайно трудно оставить свой след в экспериментальной физике, разве что вы уже на вершине!)

Сильное ядерное взаимодействие представляет собой взаимодействие четвертого типа, которое удерживает кварки внутри протона и нейтрона, а протоны и нейтроны внутри атомного ядра. Переносчиком сильного взаимодействия считается еще одна частица со спином 1, которая называется глюоном. Глюоны взаимодействуют только с кварками и с другими глюонами. У сильного взаимодействия есть одно необычайное свойство — оно обладает конфайнментом[1]. Конфайнмент состоит в том, что частицы всегда удерживаются в бесцветных комбинациях. Один кварк не может существовать сам по себе, потому что тогда он должен был бы иметь цвет (красный, зеленый или синий). Поэтому красный кварк должен быть соединен с зеленым и синим посредством глюонной

[1] *Confinement* — ограничение, удержание (*англ.*). — *Прим. ред.*

«струи» (красный + зеленый + синий = белый). Такой триплет оказывается протоном или нейтроном. Существует и другая возможность, когда кварк и антикварк объединяются в пару (красный + антикрасный, или зеленый + антизеленый, или синий + антисиний = белый). Такие комбинации входят в состав частиц, называемых мезонами. Эти частицы нестабильны, потому что кварк и антикварк могут аннигилировать друг с другом, образуя электроны и другие частицы. Аналогичным образом, один глюон не может существовать сам по себе из-за конфайнмента, потому что глюоны тоже обладают цветом. Следовательно, глюоны должны группироваться таким образом, чтобы их цвета в сумме давали белый цвет. Описанная группа глюонов образует нестабильную частицу — глюбол.

Мы не можем наблюдать отдельный кварк или глюон из-за конфайнмента. Не означает ли это, что само представление о кварках и глюонах как о частицах несколько метафизично? Нет, потому что сильное взаимодействие характеризуется еще одним свойством, которое называется асимптотической свободой. Благодаря этому свойству понятие кварков и глюонов становится вполне определенным. При обычных энергиях сильное взаимодействие действительно является сильным и плотно прижимает кварки друг к другу. Но, как показывают эксперименты на мощных ускорителях, при высоких энергиях сильное взаимодействие заметно ослабевает и кварки и глюоны начинают вести себя почти как свободные частицы. На рис. 5.2 представлен фотоснимок столкновения протона и антипротона высокой энергии. Мы видим, что несколько почти свободных кварков, родивших-

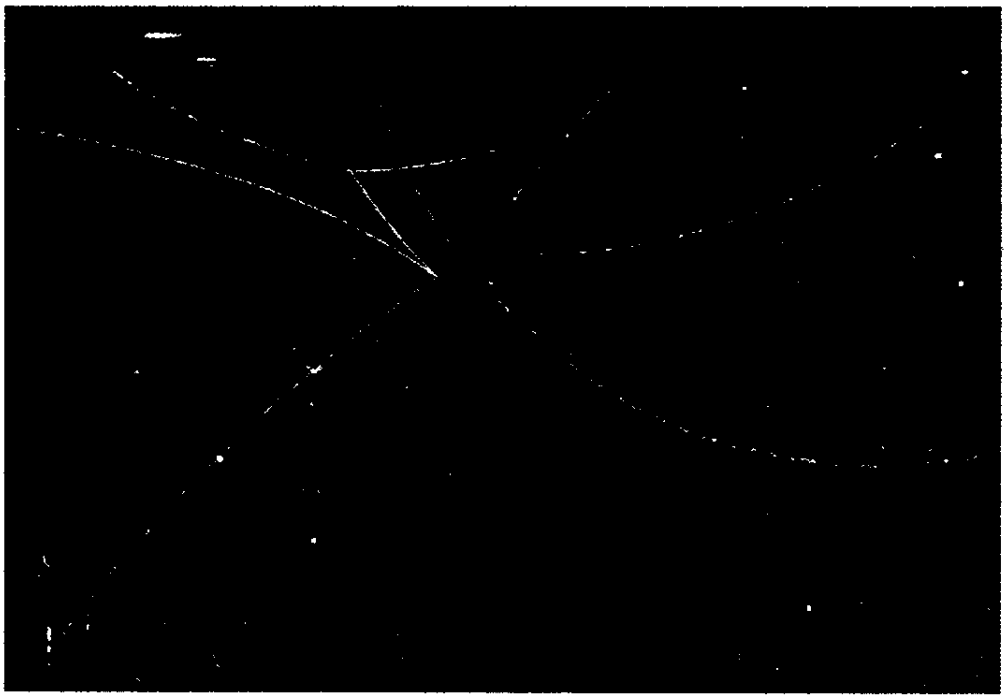


Рис. 5.2

ся в результате взаимодействия, образовали «струи» треков, которые видны на фотографии.

Итогом успешного объединения электромагнитного и слабого взаимодействий стали попытки соединить эти два вида взаимодействий с сильным взаимодействием, чтобы в результате получилась так называемая теория великого объединения. В этом названии есть некоторое преувеличение: во-первых, теории великого объединения не такие уж великие, а во-вторых, они не объединяют полностью все взаимодействия, потому что в них не входит гравитация. Кроме того, все эти теории на самом деле неполны, потому что содержат параметры, которые нельзя предсказать теоретически и которые надо вычислять, сравнивая теоретические и экспериментальные результаты. Тем не менее такие теории могут стать шагом к полной теории объединения, охватывающей

все взаимодействия. Основная идея построения теорий великого объединения состоит в следующем: как уже говорилось, сильные взаимодействия при высоких энергиях становятся слабее, чем при низких. В то же время электромагнитные и слабые силы асимптотически не свободны, и при высоких энергиях они растут. Тогда при каком-то очень большом значении энергии — при энергии великого объединения — эти три силы могли бы сравняться между собой и стать просто разновидностями одной и той же силы. Теории великого объединения предсказывают, что при этой энергии разные частицы вещества со спином 1/2, такие, как кварки и электроны, тоже перестали бы различаться, что было бы еще одним шагом к объединению.

Значение энергии великого объединения не очень хорошо известно, но оно должно составлять по меньшей мере тысячу миллионов миллионов ГэВ. В ускорителях современного поколения сталкиваются частицы с энергиями около 100 ГэВ, а в будущих проектах эта величина должна возрасти до нескольких тысяч ГэВ. Но для ускорения частиц до энергии великого объединения нужен ускоритель размером с Солнечную систему. Маловероятно, чтобы в нынешней экономической ситуации кто-нибудь решился ее финансировать. Вот почему невозможна непосредственная экспериментальная проверка теорий великого объединения. Но здесь, как и в случае электрослабой единой теории, существуют низкоэнергетические следствия, которые можно проверить.

Самое интересное из таких следствий то, что протоны, составляющие большую часть массы обычного вещества, могут спонтанно распадаться на более легкие

частицы, такие, как антиэлектроны. Причина в том, что при энергии великого объединения нет существенной разницы между кварком и антиэлектроном. Три кварка внутри протона обычно не обладают достаточным количеством энергии для превращения в антиэлектроны, но один из кварков может совершенно случайно получить однажды энергию, достаточную для этого превращения, потому что в силу принципа неопределенности невозможно точно зафиксировать энергию кварков внутри протона. Тогда протон должен распасться, но вероятность того, что кварк будет иметь достаточную энергию, столь мала, что ждать этого придется по крайней мере миллион миллионов миллионов миллионов миллионов (1 с тридцатью нулями) лет, что гораздо больше времени, прошедшего с момента большого взрыва, которое не превышает десяти тысяч миллионов лет или что-то около того (1 с десятью нулями). Отсюда напрашивается вывод, что возможность спонтанного распада протона нельзя экспериментально проверить. Можно, однако, увеличить вероятность наблюдения распада протона, изучая очень большое число протонов. (Наблюдая, например, 1 с тридцатью одним нулем протонов в течение года, можно надеяться обнаружить, согласно одной из простейших теорий великого объединения, более одного распада протона.)

Несколько таких экспериментов уже выполнено, но они не дали определенных сведений о распадах протона или нейтрона. Один из экспериментов, в котором использовалось восемь тысяч тонн воды, проводился в соляной шахте штата Огайо (для того, чтобы исключить космические помехи, которые можно принять за распад протона). Поскольку в течение

всего эксперимента не было зарегистрировано ни одного распада протона, можно вычислить, что время жизни протона должно быть больше, чем десять миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов (1 с тридцатью одним нулем) лет. Этот результат превышает предсказания простейшей теории великого объединения, но есть и более сложные теории, дающие более высокую оценку. Для их проверки потребуются еще более точные эксперименты с еще большими количествами вещества.

Несмотря на трудности наблюдения распада протона, не исключено, что само наше существование есть следствие обратного процесса — образования протонов или, еще проще, кварков на самой начальной стадии, когда кварков было не больше, чем антикварков. Такая картина начала Вселенной представляется наиболее естественной. Земное вещество в основном состоит из протонов и нейтронов, которые в свою очередь состоят из кварков, но в нем нет ни антипротонов, ни антинейтронов, состоящих из антикварков, если не считать те несколько штук, которые были получены на больших ускорителях. Эксперименты с космическими лучами подтверждают, что то же самое справедливо и для всего вещества в нашей Галактике: в нем нет ни антипротонов, ни антинейтронов, за исключением того небольшого количества античастиц, которое возникает в результате рождения пар частица—античастица в соударениях частиц при высоких энергиях. Если бы в нашей Галактике были большие участки антивещества, то можно было бы ожидать сильного излучения на границах раздела вещества и антивещества, где возникало бы множество соударений частиц и античастиц, которые,

аннигилируя, испускали бы излучение высокой энергии.

У нас нет прямых указаний на то, состоит ли вещество других галактик из протонов и нейтронов или из антипротонов и антинейтронов, но оно должно состоять из частиц одного типа: в пределах одной галактики не может быть смеси частиц и античастиц, потому что в результате их аннигиляции испускалось бы мощное излучение. Поэтому мы считаем, что все галактики состоят из кварков, а не из антикварков; вряд ли одни галактики состояли из вещества, а другие — из антивещества.

Но почему кварков должно быть настолько больше, чем антикварков? Почему число их не одинаково? Нам очень повезло, что это так, потому что если бы кварков и антикварков было поровну, то почти все кварки и антикварки проаннигилировали бы друг с другом в ранней Вселенной, наполнив ее излучением, но едва ли оставив хоть какое-нибудь вещество. Не было бы ни галактик, ни звезд, ни планет, на которых могла бы развиваться человеческая жизнь. С помощью теорий великого объединения можно объяснить, почему во Вселенной кварков должно быть сейчас больше, чем антикварков, даже в том случае, если в самом начале их было поровну. Как мы уже знаем, в теориях великого объединения при высоких энергиях кварки могут превращаться в антиэлектроны. Возможны и обратные процессы, когда антикварки превращаются в электроны, а электроны и антиэлектроны — в антикварки и кварки. Когда-то на очень ранней стадии развития Вселенной она была такой горячей, что энергии частиц было достаточно для подобных превращений. Но почему же в резуль-

тате кварков стало больше, чем антикварков? Причина кроется в том, что законы физики не совсем одинаковы для частиц и античастиц.

До 1956 г. считалось, что законы физики инвариантны относительно трех преобразований симметрии — *C*, *P* и *T*. Симметрия *C* означает, что все законы одинаковы для частиц и античастиц. Симметрия *P* означает, что законы физики одинаковы для любого явления и для его зеркального отражения (зеркальным отражением частицы, вращающейся по часовой стрелке, будет частица, вращающаяся против часовой стрелки). Наконец, смысл симметрии *T* состоит в том, что при изменении направления движения всех частиц и античастиц на обратное система вернется в то состояние, в котором она находилась раньше; иными словами, законы одинаковы при движении во времени вперед или назад.

В 1956 г. два американских физика, Тзундао Ли и Чженьнин Янг, высказали предположение, что слабое взаимодействие на самом деле не инвариантно относительно *P*-преобразований. Иными словами, в результате слабого взаимодействия развитие Вселенной может пойти иначе, чем развитие ее зеркального изображения. В том же году Цзиньсян Ву, коллега Ли и Янга, сумела доказать, что их предположение правильно. Расположив в магнитном поле ядра радиоактивных атомов так, чтобы их спины были направлены одинаково, она показала, что электронов вылетает больше в одном направлении, чем в другом. В следующем году Ли и Янг за свое открытие были удостоены Нобелевской премии. Оказалось, что слабые взаимодействия не подчиняются и симметрии *C*. Это означает, что Вселенная, состоя-

щая из античастиц, будет вести себя иначе, чем наша Вселенная. Всем, однако, казалось, что слабое взаимодействие должно все-таки подчиняться комбинированной симметрии *CP*, т. е. развитие Вселенной должно происходить так же, как и развитие ее зеркального отражения, если, отразив ее в зеркале, мы еще каждую частицу заменим античастицей! Но в 1964 г. еще два американца, Джеймс Кронин и Вел Фитч, обнаружили, что в распаде частиц, которые называются *K*-мезонами, нарушается даже *CP*-симметрия. В результате в 1980 г. Кронин и Фитч получили за свою работу Нобелевскую премию. (Какое огромное количество премий присуждено за работы, в которых показано, что Вселенная не так проста, как нам кажется!)

Существует математическая теорема, в которой утверждается, что любая теория, подчиняющаяся квантовой механике и теории относительности, должна всегда быть инвариантна относительно комбинированной симметрии *CPT*. Другими словами, поведение Вселенной не изменится, если заменить частицы античастицами, отразить все в зеркале и еще изменить направление времени на обратное. Но Кронин и Фитч показали, что если заменить частицы античастицами и произвести зеркальное отражение, но при этом не изменять направление времени на обратное, то Вселенная будет вести себя *по-другому*. Следовательно, при обращении времени законы физики должны измениться, т. е. они не инвариантны относительно симметрии *T*.

Понятно, что в ранней Вселенной нарушалась симметрия *T*: когда время течет вперед, Вселенная расширяется, а если бы время пошло назад, то Вселенная

начала бы сжиматься. А поскольку существуют силы, не инвариантные относительно симметрии T, то отсюда следует, что по мере расширения Вселенной под действием этих сил антиэлектроны должны превращаться в кварки чаще, чем электроны в антикварки. Затем, когда Вселенная расширялась и охлаждалась, антикварки и кварки должны были аннигилировать, но поскольку кварков оказалось бы больше, чем антикварков, кварки остались бы в небольшом избытке. И они-то и есть те самые кварки, из которых состоит сегодняшнее вещество, которое мы видим и из которого сотворены мы сами. Таким образом, само наше существование можно рассматривать как подтверждение теорий великого объединения, правда, только как качественное подтверждение. Неопределенности происходят из-за того, что мы не можем предсказать, ни сколько кварков останется после аннигиляции, ни даже будут ли оставшиеся частицы кварками или антикварками. (Правда, если бы в излишке остались антикварки, мы бы просто переименовали их в кварки, а кварки — в антикварки).

Теории великого объединения не включают в себя гравитационное взаимодействие. Это не столь уж существенно, потому что гравитационные силы так малы, что их влиянием можно просто пренебречь, когда мы имеем дело с элементарными частицами или атомами. Однако тот факт, что гравитационные силы являются дальнодействующими, да еще и всегда силами притяжения, означает, что результаты их воздействия всегда суммируются. Следовательно, если имеется достаточное количество частиц вещества, то гравитационные силы могут стать больше всех остальных

сил. Вот почему эволюция Вселенной определяется именно гравитацией. Даже в случае объектов размером со звезду гравитационное притяжение может перевесить все остальные силы и привести к коллапсу звезды. В 70-х годах я занимался исследованием черных дыр, которые могут возникнуть в результате такого звездного коллапса, и окружающих их сильных гравитационных полей. Именно в ходе этой работы у меня появились первые догадки о том, как квантовая механика и общая теория относительности могут влиять друг на друга — первые проблески формы той квантовой теории гравитации, которую еще предстоит разработать.

6
Черные дыры

Термин «черная дыра» появился совсем недавно. Его ввел в обиход в 1969 г. американский ученый Джон Уилер как метафорическое выражение представления, возникшего по крайней мере 200 лет назад, когда существовали две теории света: в первой, которой придерживался Ньютон, считалось, что свет состоит из частиц; согласно же второй теории, свет — это волны. Сейчас мы знаем, что на самом деле обе они правильны. В силу принципа частично-волнового дуализма квантовой механики свет может рассматриваться и как частицы, и как волны. В теории, в которой свет — волны, было непонятно, как будет действовать на него гравитация. Если же свет — поток частиц, то можно считать, что гравитация действует на них так же, как на пушечные ядра, ракеты и планеты. Сначала ученые думали, что частицы света перемещаются с бесконечной скоростью и поэтому гравитация не может их замедлить, но когда Рёмер установил, что скорость света конечна, стало ясно, что влияние гравитации может оказаться существенным.

Исходя из этого, Джон Мичел, преподаватель из Кембриджа, в 1783 г. представил в журнал «Философские труды Лондонского Королевского общества»[1] свою

[1] Philosophical Transactions of the Royal Society of London.

работу, в которой он указывал на то, что достаточно массивная и компактная звезда должна иметь столь сильное гравитационное поле, что свет не сможет выйти за его пределы: любой луч света, испущенный поверхностью такой звезды, не успев отойти от нее, будет втянут обратно ее гравитационным притяжением. Мичел считал, что таких звезд может быть очень много. Несмотря на то что их нельзя увидеть, так как их свет не может до нас дойти, мы тем не менее должны ощущать их гравитационное притяжение. Подобные объекты называют сейчас черными дырами, и этот термин отражает их суть: темные бездны в космическом пространстве. Через несколько лет после Мичела и французский ученый Лаплас высказал, по-видимому, независимо от него аналогичное предположение. Небезынтересно, что Лаплас включил его лишь в первое и второе издания своей книги «Система мира», но исключил из более поздних изданий, сочтя, наверное, черные дыры бредовой идеей. (К тому же в XIX в. корпускулярная теория света потеряла популярность. Стало казаться, что все явления можно объяснить с помощью волновой теории, а в ней воздействие гравитационных сил на свет вовсе не было очевидным.)

На самом деле свет нельзя рассматривать как пушечные ядра в теории тяготения Ньютона, потому что скорость света фиксирована. (Пушечное ядро, вылетевшее вверх с поверхности Земли, из-за гравитации будет замедлять полет и в конце концов остановится, а потом начнет падать. Фотон же должен продолжать движение вверх с постоянной скоростью. Как же тогда ньютоновская гравитация может воздействовать на свет?) Последовательная теория

взаимодействия света и гравитации отсутствовала до 1915 г., когда Эйнштейн предложил общую теорию относительности. Но даже после этого прошло немало времени, пока стало наконец ясно, какие выводы следуют из теории Эйнштейна относительно массивных звезд.

Чтобы понять, как возникает черная дыра, надо вспомнить о том, каков жизненный цикл звезды. Звезда образуется, когда большое количество газа (в основном водорода) начинает сжиматься силами собственного гравитационного притяжения. В процессе сжатия атомы газа все чаще и чаще сталкиваются друг с другом, двигаясь со все большими и большими скоростями. В результате газ разогревается и в конце концов становится таким горячим, что атомы водорода, вместо того чтобы отскакивать друг от друга, будут сливаться, образуя гелий. Тепло, выделяющееся в этой реакции, которая напоминает управляемый взрыв водородной бомбы, и вызывает свечение звезды. Из-за дополнительного тепла давление газа возрастает до тех пор, пока не уравновесит гравитационное притяжение, после чего газ перестает сжиматься. Это немного напоминает надутый резиновый шарик, в котором устанавливается равновесие между давлением воздуха внутри, заставляющим шарик раздуваться, и натяжением резины, под действием которого шарик сжимается. Подобно шарику, звезды будут долго оставаться в стабильном состоянии, в котором выделяющимся в ядерных реакциях теплом уравновешивается гравитационное притяжение. Но в конце концов у звезды кончится водород и другие виды ядерного топлива. Как ни парадоксально, но чем больше начальный запас топлива

у звезды, тем быстрее оно истощается, потому что для компенсации гравитационного притяжения звезде надо тем сильнее разогреться, чем больше ее масса. А чем горячее звезда, тем быстрее расходуется ее топливо. Запаса топлива на Солнце хватит примерно на пять тысяч миллионов лет, но более тяжелые звезды израсходуют свое топливо всего за сто миллионов лет, т. е. за время, гораздо меньшее возраста Вселенной. Израсходовав топливо, звезда начинает охлаждаться и сжиматься, а вот что с ней происходит потом, стало понятно только в конце 20-х годов нашего века.

В 1928 г. Субраманьян Чандрасекар, аспирант из Индии, отправился по морю в Англию, в Кембридж, чтобы пройти там курс обучения у крупнейшего специалиста в области общей теории относительности Артура Эддингтона. (Говорят, в начале 20-х годов один журналист сказал Эддингтону, что он слышал, будто в мире всего три человека понимают общую теорию относительности. Эддингтон, помолчав, сказал: «Я думаю — кто же третий?») Во время своего путешествия из Индии Чандрасекар вычислил, какой величины должна быть звезда, чтобы, израсходовав целиком свое топливо, она все же могла бы противостоять воздействию собственных гравитационных сил. Чандрасекар рассуждал так. Когда звезда уменьшается, частицы вещества очень сильно сближаются друг с другом, и в силу принципа запрета (исключения) Паули их скорости должны все больше различаться. Следовательно, частицы стремятся разойтись и звезда расширяется. Таким образом, радиус звезды может удерживаться постоянным благодаря равновесию между гравитационным притяжением и возникающим

в силу принципа Паули отталкиванием, точь-в-точь как на более ранней стадии развития звезды гравитационные силы уравновешивались ее тепловым расширением.

Однако Чандрасекар понимал, что отталкивание, обусловленное принципом Паули, не беспредельно. Согласно теории относительности, максимальная разница скоростей частиц вещества в звезде равна скорости света. Это значит, что, когда звезда становится достаточно плотной, отталкивание, обусловленное принципом Паули, должно стать меньше, чем гравитационное притяжение. Чандрасекар рассчитал, что если масса холодной звезды более чем в полтора раза превышает массу Солнца, то эта звезда не сможет противостоять собственной гравитации. (Данное значение массы сейчас называют пределом Чандрасекара.) Приблизительно в то же время аналогичное открытие сделал советский физик Л. Д. Ландау.

Выводы Чандрасекара и Ландау имели важные следствия относительно судьбы звезд с большой массой. Если масса звезды меньше предела Чандрасекара, то она в конце концов может перестать сокращаться, превратившись в белого карлика — одно из возможных конечных состояний звезды. Белый карлик имеет в радиусе несколько тысяч километров, плотность — сотни тонн на кубический сантиметр и удерживается в равновесии благодаря отталкиванию электронов в его веществе, отталкиванию, которое возникает из-за принципа Паули. На небе видно немало белых карликов. Одним из первых был открыт белый карлик, вращающийся вокруг Сириуса — самой яркой звезды на ночном небе.

Ландау показал, что звезда может оказаться и в другом конечном состоянии, предельная масса которого равна одной-двум массам Солнца, а размеры даже меньше, чем у белого карлика. Эти звезды тоже должны существовать благодаря возникающему из-за принципа Паули отталкиванию, но не между электронами, а между протонами и нейтронами. Поэтому такие звезды получили название нейтронных звезд. Их радиус не больше нескольких десятков километров, а плотность — сотни миллионов тонн на кубический сантиметр. Когда Ландау предсказал нейтронные звезды, наблюдать их никто не умел, а реальная возможность их наблюдения появилась значительно позже.

Если масса звезды превышает предел Чандрасекара, то, когда ее топливо кончается, возникают большие сложности. Чтобы избежать катастрофического гравитационного коллапса, звезда может взорваться или каким-то образом выбросить из себя часть вещества, чтобы масса стала меньше предельной. Трудно, однако, поверить, что так происходит со всеми звездами независимо от их размеров. Как звезда узнает, что ей пора терять вес? А даже если бы каждой звезде удалось потерять в весе настолько, чтобы избежать коллапса, то что произошло бы, если бы мы увеличили массу белого карлика или нейтронной звезды так, чтобы она превысила бы предел? Может быть, тогда произошел бы коллапс и плотность звезды стала бесконечной? Эддингтон был так этим поражен, что отказался верить результату Чандрасекара. Он считал просто невозможным, чтобы звезда сколлапсировала в точку. Такой позиции придерживалось большинство ученых: сам Эйнштейн заявил

в своей статье, что звезды не могут сжиматься до нулевых размеров. Враждебное отношение ученых, в особенности Эддингтона, который был первым учителем Чандрасекара и главным авторитетом в исследовании строения звезд, вынудили Чандрасекара оставить работу в прежнем направлении и переключиться на другие задачи астрономии, такие, как движение звездных скоплений. Однако Нобелевская премия 1983 г. была, по крайней мере частично, присуждена Чандрасекару за ранние работы, связанные с предельной массой холодных звезд.

Он показал, что если масса звезды превышает предел Чандрасекара, то принцип запрета не может остановить ее коллапс, а задачу о том, что должно произойти с такой звездой согласно общей теории относительности, первым решил в 1939 г. молодой американский физик Роберт Оппенгеймер. Но из результатов Оппенгеймера следовало, что с помощью существовавших тогда телескопов нельзя наблюдать ни один из предсказанных эффектов. Потом началась Вторая мировая война, и сам Оппенгеймер вплотную занялся разработкой атомной бомбы. После войны о гравитационном коллапсе совершенно забыли, потому что большинство ученых было увлечено изучением явлений атомных и ядерных масштабов. Но в шестидесятых годах, благодаря новейшей технике, число астрономических наблюдений сильно возросло, а их область значительно расширилась, что вызвало возрождение интереса к астрономии и космологии. Результаты Оппенгеймера были заново открыты и развиты далее многими физиками.

В итоге, благодаря Оппенгеймеру, мы имеем сейчас следующую картину. Из-за гравитационного поля

звезды лучи света в пространстве-времени отклоняются от тех траекторий, по которым они перемещались бы в отсутствие звезды. Световые конусы, вдоль поверхности которых распространяются испущенные из их вершин световые лучи, около поверхности звезды немного наклоняются внутрь. Это проявляется в наблюдаемом во время солнечного затмения искривлении световых лучей, идущих от удаленных звезд. По мере сжатия звезды увеличивается гравитационное поле на ее поверхности и световые конусы наклоняются еще сильнее. Поэтому световым лучам, испущенным звездой, становится все труднее выйти за пределы гравитационного поля звезды, и удаленному наблюдателю ее свечение будет казаться тусклым и более красным. В конце концов, когда в ходе сжатия радиус звезды достигнет некоторого критического значения, гравитационное поле у ее поверхности станет очень сильным, и тогда световые конусы настолько повернутся внутрь, что свет не сможет больше выйти наружу (рис. 6.1). По теории относительности ничто не может двигаться быстрее света; а раз свет не может выйти наружу, то и никакой другой объект не сможет выйти, т. е. все будет втягиваться назад гравитационным полем. Это значит, что существует некое множество событий, т. е. некая область пространства-времени, из которой невозможно выйти наружу и достичь удаленного наблюдателя. Такая область называется сейчас черной дырой. Границу черной дыры называют горизонтом событий. Она совпадает с путями тех световых лучей, которые первыми из всех теряют возможность выйти за пределы черной дыры.

Чтобы понять, что вы увидели бы, если бы наблюдали за образованием черной дыры при коллапсе

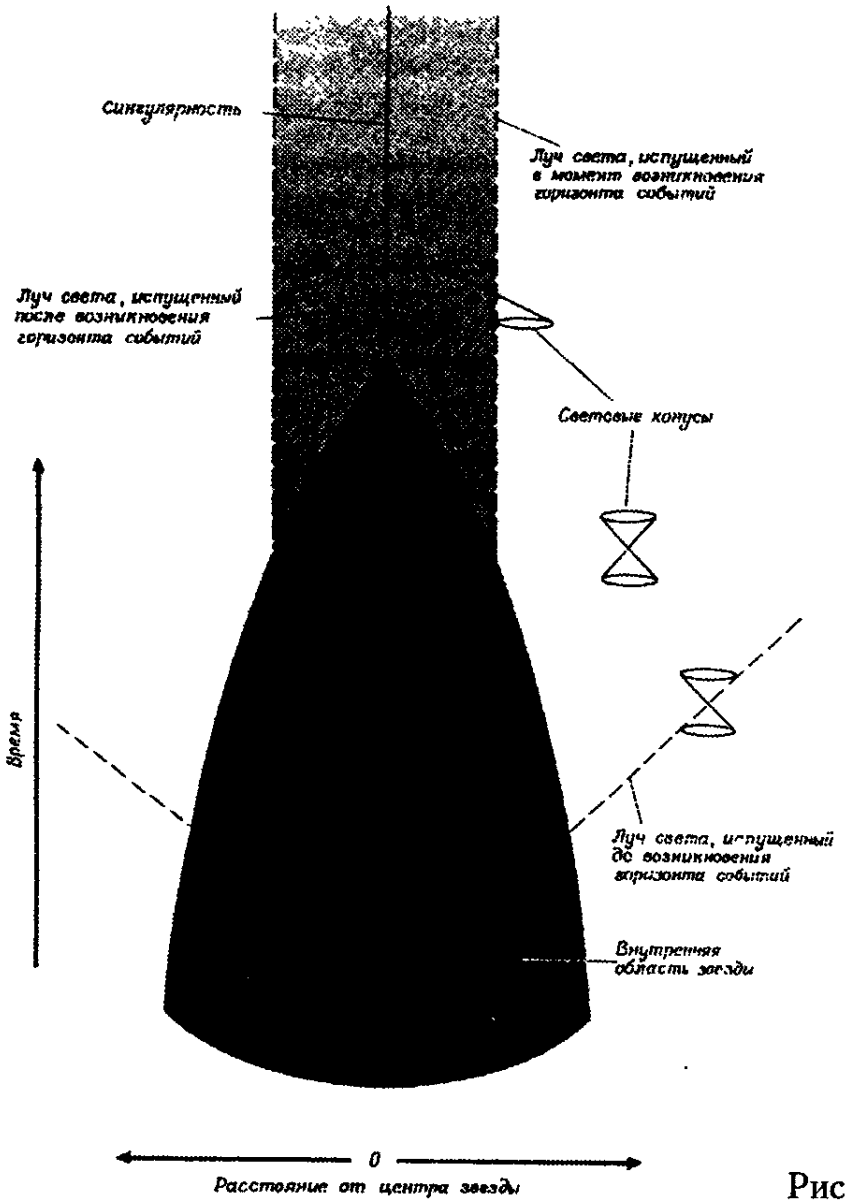


Рис. 6.1

звезды, надо вспомнить, что в теории относительности отсутствует абсолютное время и у каждого наблюдателя своя мера времени. Из-за того что звезда имеет гравитационное поле, для наблюдателя на звезде время будет не таким, как для удаленного наблюдателя. Предположим, что какой-нибудь отважный астронавт находится на поверхности коллапсирующей звезды и коллапсирует внутрь вместе с ней. Пусть он каждую секунду по своим часам посылает

сигналы на космический корабль, обращающийся по орбите вокруг звезды. В какой-то момент времени по его часам, скажем в 11:00, звезда сожмется до радиуса ниже критического, при котором гравитационное поле становится настолько сильным, что ничто не может выйти наружу, и тогда сигналы этого смельчака больше не попадут на космический корабль. При приближении времени к 11:00 интервалы между очередными сигналами, которые астронавт посылает своим спутникам на космический корабль, будут удлиняться, но до 10:59:59 этот эффект будет невелик. Между сигналами, которые астронавт по своим часам пошлет в 10:59:58 и 10:59:59, на космическом корабле пройдет чуть больше секунды, но сигнала, посланного астронавтом в 11:00, им придется ждать вечно. Световые волны, испущенные с поверхности звезды между 10:59:59 и 11:00 по часам астронавта, будут, с точки зрения пассажира космического корабля, размазаны по бесконечному периоду времени. Временной интервал между двумя волнами, приходящими друг за другом на корабль, будет все время увеличиваться, и поэтому излучаемый звездой свет будет непрерывно ослабевать и казаться все более красным. В конце концов звезда станет такой тусклой, что ее больше не увидят с борта космического корабля: от нее останется лишь черная дыра в пространстве. При этом на корабль будет по-прежнему действовать гравитационное притяжение звезды, так что он продолжит свое движение по орбите вокруг черной дыры.

Но этот сценарий не совсем реалистичен по следующей причине. При удалении от звезды ее гравитационное притяжение ослабевает, а поэтому ноги

нашего отважного астронавта всегда будут испытывать более сильное гравитационное воздействие, чем голова. Разница в величине сил приведет к тому, что астронавт либо окажется вытянутым, как спагетти, либо разорвется на части еще до того, как размеры звезды сократятся до критического радиуса, когда возникает горизонт событий! Но мы считаем, что во Вселенной существуют гораздо большие объекты, например центральные области галактик, которые тоже могут превращаться в черные дыры из-за гравитационного коллапса. Тогда, находясь на одном из таких объектов, астронавт не был бы разорван на части еще до образования черной дыры. На самом деле он бы не почувствовал ничего особенного, когда радиус звезды достиг бы критического значения, и вполне мог бы пройти, не заметив, точку, за которой начинается область, откуда нельзя вернуться назад. Но всего через несколько часов, когда эта область начала бы коллапсировать, разница гравитационных сил, действующих на ноги и на голову, возросла бы так сильно, что его опять разорвало бы на части.

В работе, которую мы с Роджером Пенроузом выполнили в период с 1965 по 1970 г., было показано, что, согласно общей теории относительности, в черной дыре должна быть сингулярность, в которой плотность и кривизна пространства-времени бесконечны. Ситуация напоминает большой взрыв в момент начала отсчета времени с той только разницей, что это означало бы конец времени для астронавта и для коллапсирующего тела. В этой сингулярной точке нарушались бы законы науки, а мы потеряли бы способность предсказывать будущее. Но эта потеря

не коснулась бы ни одного наблюдателя, находящегося вне черной дыры, потому что до него не дошел бы ни световой, ни какой-нибудь другой сигнал, вышедший из сингулярности. Под влиянием этого удивительного факта Роджер Пенроуз выдвинул «гипотезу космической цензуры», которую можно сформулировать так: «Бог не терпит голой сингулярности». Другими словами, сингулярности, возникшие в результате гравитационного коллапса, появляются лишь в местах вроде черных дыр, где горизонт событий надежно укрывает их от взглядов извне. Строго говоря, это гипотеза слабой космической цензуры (как ее и называют сейчас): благодаря ей наблюдатели, находящиеся за пределами черной дыры, защищены от последствий того, что в сингулярности теряется способность предсказывать будущее, но эта гипотеза нечего не дает для спасения несчастного астронавта, упавшего в черную дыру.

Существуют некоторые решения уравнений общей теории относительности, которые позволяют астронавту увидеть голую сингулярность; он может увернуться от сингулярности и, пролетев через «кротовую нору», выйти в другой области Вселенной. Такой вариант предоставил бы широкие возможности для путешествия в пространстве и времени, но, к сожалению, все эти решения, по-видимому, сильно нестабильны. Малейшее возмущение, например присутствие астронавта, могло бы так изменить решения, что астронавт не увидел бы сингулярность до самого столкновения с ней, когда его существованию пришел бы конец. Другими словами, сингулярность находилась бы всегда в его будущем и никогда в прошлом. Сильная формулировка гипотезы космиче-

ской цензуры такова: сингулярности реалистического решения должны быть всегда либо целиком в будущем (как в случае гравитационного коллапса), либо целиком в прошлом (как в случае большого взрыва). Очень хочется надеяться, что «гипотеза космической цензуры» выполняется в той или иной формулировке, потому что иначе вблизи голых сингулярностей имелась бы возможность попадать в прошлое. Это было бы прекрасно для писателей-фантастов, но означало бы, что никогда нельзя быть уверенным в своей безопасности: кто-то может войти в прошлое и лишить жизни кого-нибудь из ваших родителей еще до того, как они успели дать жизнь вам!

Горизонт событий, ограничивающий ту область пространства-времени, из которой невозможно выбраться наружу, подобен некоей полупроницаемой мембране, окружающей черную дыру: объекты вроде неосторожного астронавта могут упасть в черную дыру через горизонт событий, но никакие объекты не могут выбраться из нее через горизонт событий обратно. (Вспомните, что горизонт событий — это путь, по которому в пространстве-времени распространяется свет, когда он стремится выйти из черной дыры, а быстрее света не может двигаться ничто.) О горизонте событий можно сказать так, как сказано у поэта Данте о входе в Ад: «Оставь надежду всяк сюда входящий». Все и вся провалившееся за горизонт событий вскоре попадет в область бесконечной плотности, где время кончается.

Общая теория относительности предсказывает, что при движении тяжелых объектов должны излучаться гравитационные волны, которые представляют собой пульсации кривизны пространства, распространяю-

щиеся со скоростью света. Излучаемые при любом движении гравитационные волны будут уносить энергию системы. (Это напоминает поведение брошенного в воду поплавка, который сначала то уходит под воду, то выныривает на поверхность, но, поскольку волны уносят его энергию, в конце концов застывает в неподвижном стационарном состоянии.) Например, при обращении Земли вокруг Солнца возникают гравитационные волны, и Земля теряет свою энергию. Потеря энергии будет влиять на орбиту Земли, и Земля начнет постепенно приближаться к Солнцу. В конце концов они войдут в контакт, и Земля, перестав двигаться относительно Солнца, окажется в стационарном состоянии. При вращении Земли вокруг Солнца теряемая мощность очень мала — примерно такова, какую потребляет небольшой электрокипятильник. Это означает, что Земля упадет на Солнце примерно через тысячу миллионов миллионов миллионов миллионов лет, а потому прямо сейчас беспокоиться не о чем! Изменения орбиты Земли происходят слишком медленно для наблюдения, но за последние несколько лет в точности такой же эффект наблюдался в системе PSR 1913+16. (PSR означает «пульсар» — особая разновидность нейтронной звезды, которая излучает периодические импульсы радиоволн.) Это система двух нейтронных звезд, вращающихся одна вокруг другой; потери энергии на гравитационное излучение приводят к их сближению по спирали.

Когда во время гравитационного коллапса звезды образуется черная дыра, все движения звезды должны сильно ускориться, и поэтому потери энергии тоже должны сильно возрасти. Следовательно, кол-

лапсирующая звезда должна вскоре оказаться в некоем стационарном состоянии. Каким же будет это конечное состояние?

Можно предположить, что оно будет зависеть от всех сложных свойств исходной звезды, т. е. не только от ее массы и скорости вращения, но и от разных плотностей разных частей звезды и от сложного движения газов внутри нее. Но если бы черные дыры были столь же разнообразными, как и коллапсирующие объекты, из которых они возникают, то делать какие бы то ни было общие предсказания о черных дырах оказалось бы очень трудно.

Однако в 1967 г. канадский ученый Вернер Израэль (он родился в Берлине, воспитывался в Южной Африке, а докторскую диссертацию защищал в Ирландии) произвел революцию в науке о черных дырах. Израэль показал, что, согласно общей теории относительности, невращающиеся черные дыры должны иметь очень простые свойства: они должны быть правильной сферической формы, размеры черной дыры должны зависеть только от ее массы, а две черные дыры с одинаковыми массами должны быть идентичны друг другу. Фактически получалось, что черные дыры можно описать частным решением уравнений Эйнштейна, известным еще с 1917 г. и найденным Карлом Шварцшильдом вскоре после опубликования общей теории относительности. Сначала многие, в том числе и сам Израэль, считали, что, поскольку черные дыры должны быть совершенно круглыми, они могут образовываться только в результате коллапса совершенно круглого объекта. Таким образом, любая реальная звезда — а реальные звезды не бывают *идеально* сферической формы —

может сколлапсировать, порождая только голую сингулярность.

Правда, была возможна и другая интерпретация полученного Израэлем результата, которую, в частности, поддерживали Роджер Пенроуз и Джон Уилер. Быстрые движения, возникающие во время коллапса звезды, означают, указывали эти ученые, что излучаемые звездой гравитационные волны могут еще сильнее скруглить ее, и к тому моменту, когда звезда окажется в стационарном состоянии, она будет в точности сферической формы. При таком взгляде на вещи любая невращающаяся звезда, как бы ни была сложна ее форма и внутренняя структура, после гравитационного коллапса должна превратиться в черную дыру правильной сферической формы, размеры которой будут зависеть только от ее массы. В дальнейшем такой вывод был подтвержден расчетами и вскоре стал общепринятым.

Результат Израэля касался только черных дыр, образовавшихся из невращающихся объектов. В 1963 г. Рой Керр из Новой Зеландии нашел семейство решений уравнений общей теории относительности, которые описывали вращающиеся черные дыры. Керровские черные дыры вращаются с постоянной скоростью, а их форма и размер зависят только от массы и скорости вращения. Если вращение отсутствует, то черная дыра имеет идеальную шарообразную форму, а отвечающее ей решение идентично шварцшильдовскому решению. Если же черная дыра вращается, то ее диаметр увеличивается по экватору (точно так же, как деформируются вследствие вращения Земля и Солнце), и тем сильнее, чем быстрее вращение. Чтобы можно было перенести результат

Израэля и на вращающиеся тела, было сделано предположение, что любое вращающееся тело, которое в результате коллапса образует черную дыру, должно в конце концов оказаться в стационарном состоянии, описываемом решением Керра.

В 1970 г. мой аспирант и коллега по Кембриджу Брендон Картер сделал первый шаг к доказательству этого предположения. Картер показал, что если стационарная вращающаяся черная дыра обладает осью симметрии, как волчок, то ее размеры и форма будут зависеть только от ее массы и скорости вращения. Затем в 1971 г. я доказал, что любая стационарная черная дыра всегда будет иметь такую ось симметрии. Наконец в 1973 г. Дэвид Робинсон из Королевского колледжа в Лондоне, опираясь на наши с Картером результаты, показал, что вышеприведенное предположение правильно, т. е. что стационарная черная дыра всегда будет решением Керра. Итак, после гравитационного коллапса черная дыра должна оказаться в таком состоянии, чтобы она могла вращаться, но не могла пульсировать. Кроме того, размеры черной дыры будут зависеть только от ее массы и скорости вращения и никак не будут связаны со свойствами того тела, которое сколлапсировало в эту черную дыру. Этот вывод стал известен в формулировке: «У черной дыры нет волос». Теорема об отсутствии волос у черной дыры имеет огромное практическое значение, потому что она налагает сильные ограничения на возможные типы черных дыр и тем самым дает возможность строить детальные модели объектов, которые могли бы содержать черные дыры, и сравнивать их предсказания с результатами наблюдений. Кроме того, из нее следует, что при образовании

черной дыры должна теряться огромная часть информации о сколлапсировавшем теле, потому что после коллапса все, что нам удастся измерить, — это, может быть, лишь масса тела да скорость его вращения. Значимость сказанного станет ясна из следующей главы.

Черные дыры — один из очень немногочисленных примеров в истории науки, когда теория развивалась во всех деталях как математическая модель, не имея никаких экспериментальных подтверждений своей справедливости. И это, конечно, было главным возражением противников черных дыр: как можно верить в реальность объектов, существование которых следует лишь из вычислений, основанных на такой сомнительной теории, как общая теория относительности. Но в 1963 г. Маартен Шмидт, астроном из Паламарской обсерватории в Калифорнии, измерил красное смещение тусклого, похожего на звезду объекта в направлении источника радиоволн 3C273 (источник под номером 273 в третьем Кембриджском каталоге радиоисточников). Обнаруженное Шмидтом красное смещение оказалось слишком велико, чтобы его можно было объяснить действием гравитационного поля: если бы оно было гравитационного происхождения, то связанный с ним объект должен был иметь такую большую массу и располагаться так близко к нам, что его присутствие изменило бы орбиты всех планет Солнечной системы. Но, может быть, тогда красное смещение возникло из-за расширения Вселенной, и из этого следует, что рассматриваемый объект находится, наоборот, очень далеко? Видимый на таком большом расстоянии объект должен быть очень ярким, т. е. должен излучать

огромную энергию. Единственный механизм, с помощью которого могло бы излучаться такое большое количество энергии, — это гравитационный коллапс, но не какой-нибудь одной звезды, а коллапс всей центральной области Галактики. С тех пор были открыты и другие аналогичные квазизвездные объекты, или квазары, обладающие красным смещением. Но их большая удаленность сильно затрудняет наблюдение и не дает возможности сделать окончательные выводы относительно черных дыр.

В 1967 г. появился новый довод в пользу существования черных дыр. Кембриджский аспирант Джослин Белл обнаружил на небе объекты, излучающие регулярные импульсы радиоволн. Сначала Белл и его руководитель Энтони Хьюиш решили, что они установили контакт с внеземными цивилизациями нашей Галактики! Я помню, что, докладывая о своем открытии на семинаре, четыре источника они действительно назвали сокращенно LGM 1–4, где LGM означает «зеленые человечки» (Little Green Men). Но потом и авторы, и все остальные пришли к менее романтичному заключению, что обнаруженные объекты, которые были названы *пульсарами*, представляют собой вращающиеся нейтронные звезды, которые излучают импульсы радиоволн из-за сложного характера взаимодействия их магнитного поля с окружающим веществом. Эта новость огорчила авторов боевиков о космических пришельцах, но очень воодушевила наш немногочисленный отряд сторонников черных дыр, так как мы впервые получили подтверждение того, что нейтронные звезды существуют. Радиус нейтронной звезды равен примерно пятнадцати километрам, т. е. всего в несколько раз

больше критического радиуса, по достижении которого звезда превращается в черную дыру. Если звезда может сколлапсировать до таких небольших размеров, то вполне допустимо предположить, что другие звезды в результате коллапса станут еще меньше и образуют черные дыры.

Да, но как можно рассчитывать найти черную дыру, если по самому ее определению она вообще не излучает свет? Это все равно что ловить черного кота в темной комнате. И все-таки один способ есть. Еще Джон Митчелл в своей пионерской работе, написанной в 1783 г., указывал, что черные дыры все же оказывают гравитационное воздействие на близкие к ним объекты. Астрономы наблюдали много систем, в которых две звезды обращаются одна вокруг другой под действием гравитационного притяжения. Наблюдаются и такие системы, в которых видима лишь одна звезда, обращающаяся вокруг своего невидимого партнера. Разумеется, мы не можем сразу заключить, что партнер и есть черная дыра, потому что это может быть просто чересчур тусклая звезда. Однако некоторые из таких систем, например Лебедь X-1 (рис. 6.2), являются еще и мощными источниками рентгеновского излучения. Это явление лучше всего объясняется предположением, что с поверхности видимой звезды «сдувается» вещество, которое падает на вторую, невидимую звезду, вращаясь по спирали (как вытекающая из ванны вода), и, сильно разогреваясь, испускает рентгеновское излучение (рис. 6.3). Для существования такого механизма невидимый объект должен быть очень малым — белым карликом, нейтронной звездой или черной дырой. Результаты наблюдения орбиты видимой звезды

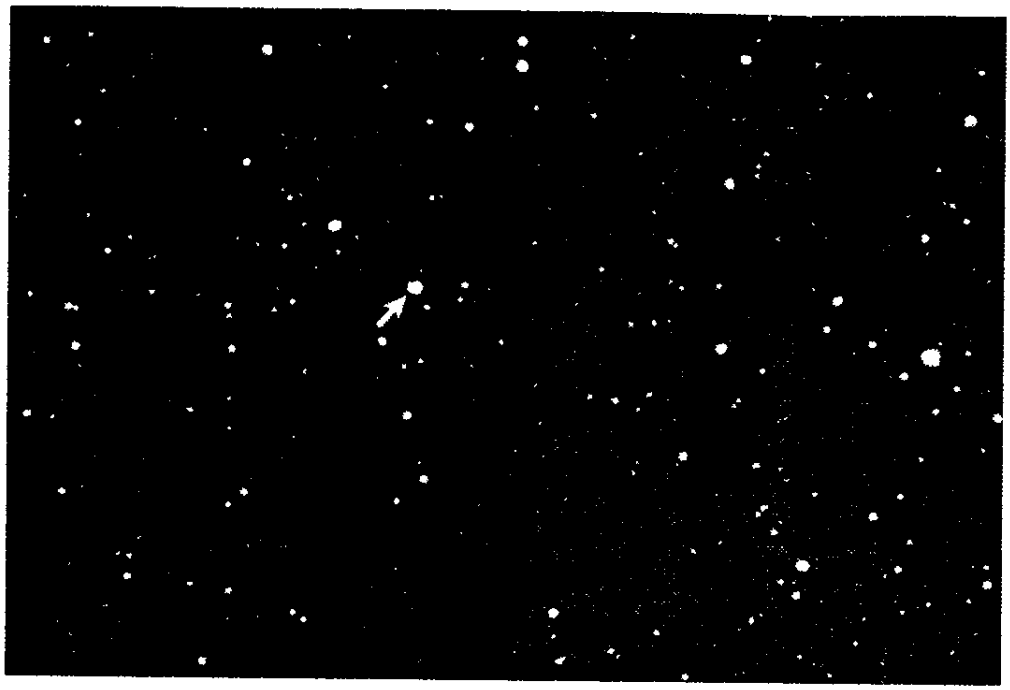


Рис 6.2. Стрелкой указан объект Лебедь Х-1, который, как считается, представляет собой систему черной дыры и обычной звезды, обращающихся вокруг друг друга

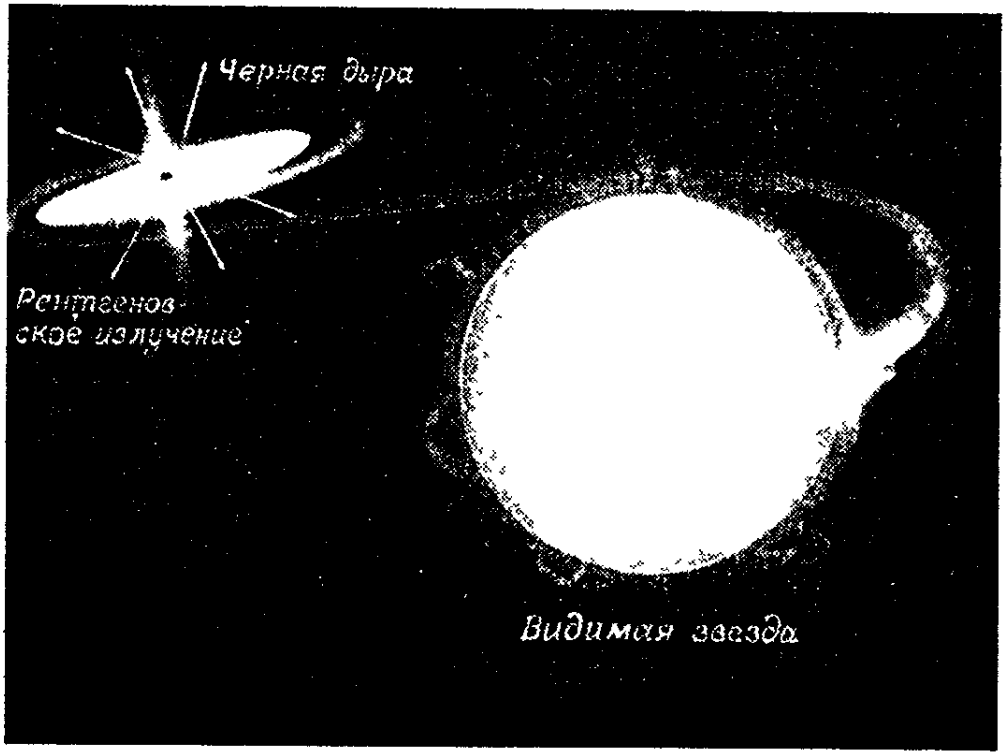


Рис. 6.3

позволяют вычислить, какую наименьшую массу может иметь невидимый объект. В случае Лебедя X-1 эта масса составляет примерно шесть солнечных масс, т. е., согласно Чандрасекару, слишком велика, чтобы обладающий ею невидимый объект оказался белым карликом. А так как эта масса велика и для нейтронной звезды, объект, по-видимому, должен быть черной дырой.

Существуют и другие модели, объясняющие результаты наблюдений Лебедя X-1 без привлечения черных дыр, но все они довольно искусственны. Черная дыра представляется единственным совершенно естественным объяснением наблюдений. Несмотря на это, я заключил пари с Кипом Торном из Калифорнийского технологического института, что на самом деле в Лебеде X-1 нет черной дыры! Для меня это пари — некая страховка Я очень много занимался черными дырами, и вся моя работа пойдет насмарку, если вдруг окажется, что черные дыры не существуют. Но в этом случае утешением мне будет выигранное пари, а по его условиям я в течение четырех лет буду бесплатно получать журнал «Private Eye». Если же черные дыры все-таки существуют, то Кип будет целый год получать журнал «Penthouse». Заключая пари в 1975 г., мы были на 80% уверены в том, что Лебедь X-1 является черной дырой. Сейчас наша уверенность возросла, я бы сказал, до 95%, но пари остается в силе.

Мы располагаем данными о еще нескольких черных дырах в системах типа Лебедя X-1 в нашей Галактике и двух соседних галактиках, которые называются Большим и Малым Магеллановыми Облаками. Но черных дыр почти наверняка гораздо

больше: на протяжении долгой истории Вселенной многие звезды должны были израсходовать до конца свое ядерное топливо и сколлапсировать. Число черных дыр вполне может даже превышать число видимых звезд, которое только в нашей Галактике составляет около ста тысяч миллионов. Дополнительное гравитационное притяжение столь большого количества черных дыр могло бы быть причиной того, почему наша Галактика вращается именно с такой скоростью, а не с какой-нибудь другой: массы видимых звезд для объяснения этой скорости недостаточно. Существуют и некоторые данные в пользу того, что в центре нашей Галактики есть черная дыра гораздо большего размера с массой примерно в сто тысяч масс Солнца. Звезды, оказавшиеся в Галактике слишком близко к этой черной дыре, разлетаются на части из-за разницы гравитационных сил на ближней и дальней сторонах звезды. Остатки разлетающихся звезд и газ, выброшенный другими звездами, будут падать по направлению к черной дыре. Как и в случае Лебедя X-1, газ будет закручиваться по спирали внутрь и разогреваться, правда, не так сильно. Разогрев будет недостаточным для испускания рентгеновского излучения, но им можно объяснить тот крошечный источник радиоволн и инфракрасных лучей, который наблюдается в центре Галактики.

Не исключено, что в центрах квазаров есть такие же черные дыры, но еще бóльших размеров, с массами около ста миллионов масс Солнца. Только падением вещества в такую сверхмассивную черную дыру можно было бы объяснить, откуда берется энергия мощнейшего излучения, которое исходит из черной дыры. Вещество падает, вращаясь по спирали, внутрь

черной дыры и заставляет ее вращаться в том же направлении, в результате чего возникает магнитное поле, похожее на магнитное поле Земли. Падающее внутрь вещество будет рождать около черной дыры частицы очень высокой энергии. Магнитное поле будет настолько сильным, что сможет сфокусировать эти частицы в струи, которые будут вылетать наружу вдоль оси вращения черной дыры, т. е. в направлении ее северного и южного полюсов. У некоторых галактик и квазаров такие струи действительно наблюдаются.

Можно рассмотреть и возможность существования черных дыр с массами, меньшими массы Солнца. Такие черные дыры не могли бы образоваться в результате гравитационного коллапса, потому что их массы лежат ниже предела Чандрасекара: звезды с небольшой массой могут противостоять гравитации даже в том случае, если все их ядерное топливо уже израсходовано. Черные дыры малой массы могут образоваться лишь при условии, что вещество сжато до огромных плотностей чрезвычайно высокими внешними давлениями. Такие условия могут выполняться в очень большой водородной бомбе: физик Джон Уилер как-то вычислил, что если взять всю тяжелую воду из всех океанов мира, то можно сделать водородную бомбу, в которой вещество так сильно сожмется, что в ее центре возникнет черная дыра. (Разумеется, вокруг не останется никого, кто мог бы это увидеть!) Более реальная возможность — это образование не очень массивных черных дыр с небольшой массой при высоких значениях температуры и давления на весьма ранней стадии развития Вселенной. Черные дыры могли образоваться лишь в том случае, если

ранняя Вселенная не была идеально гладкой и однородной, потому что лишь какую-нибудь небольшую область с плотностью, превышающей среднюю плотность, можно так сжать, чтобы она превратилась в черную дыру. Но мы знаем, что во Вселенной должны были присутствовать неоднородности, иначе все вещество не сбилось бы в комки, образуя звезды и галактики, а равномерно распределилось бы по всей Вселенной.

Могли ли эти неоднородности, существованием которых объясняется возникновение звезд и галактик, привести к образованию первичных черных дыр, зависит от того, какой была ранняя Вселенная. Следовательно, определив, какое количество первичных черных дыр сейчас существует, мы смогли бы многое узнать о самых ранних стадиях развития Вселенной. Первичные черные дыры, масса которых превышает тысячу миллионов тонн (масса большой горы), можно было бы зарегистрировать только по влиянию их гравитационного поля на видимую материю или же на процесс расширения Вселенной. Но в следующей главе мы узнаем, что на самом деле черные дыры вовсе не черные: они светятся, как раскаленное тело, и чем меньше черная дыра, тем сильнее она светится. Как ни парадоксально, но может оказаться, что маленькие черные дыры проще регистрировать, чем большие!

7
Черные дыры не так уж черны

До 1970 г. я в своих исследованиях по общей теории относительности сосредоточивался в основном на вопросе о том, существовала или нет сингулярная точка большого взрыва. Но как-то вечером в ноябре 1970 г., вскоре после рождения моей дочери Люси, ложась спать, я задумался о черных дырах. Из-за своей немощности я очень медленно готовлюсь ко сну, и поэтому у меня было много времени для размышлений. Тогда еще не было точного определения, какие точки пространства-времени лежат внутри черной дыры, а какие — снаружи. Но мы уже обсуждали с Роджером Пенроузом определение черной дыры как множества событий, из которого невозможно уйти на большое расстояние. Это определение стало сейчас общепринятым. Оно означает, что границу черной дыры, горизонт событий, образуют в пространстве-времени пути лучей света, которые не отклоняются к сингулярности, но и не могут выйти за пределы черной дыры и обречены вечно балансировать на самом краю (рис 7.1). Это как если бы, убегая от полицейского, держаться на шаг впереди, не будучи в силах совсем оторваться от него

Вдруг я понял, что пути лучей света на горизонте событий никогда не смогут сблизиться. Если бы это произошло, то лучи в конце концов пересеклись бы

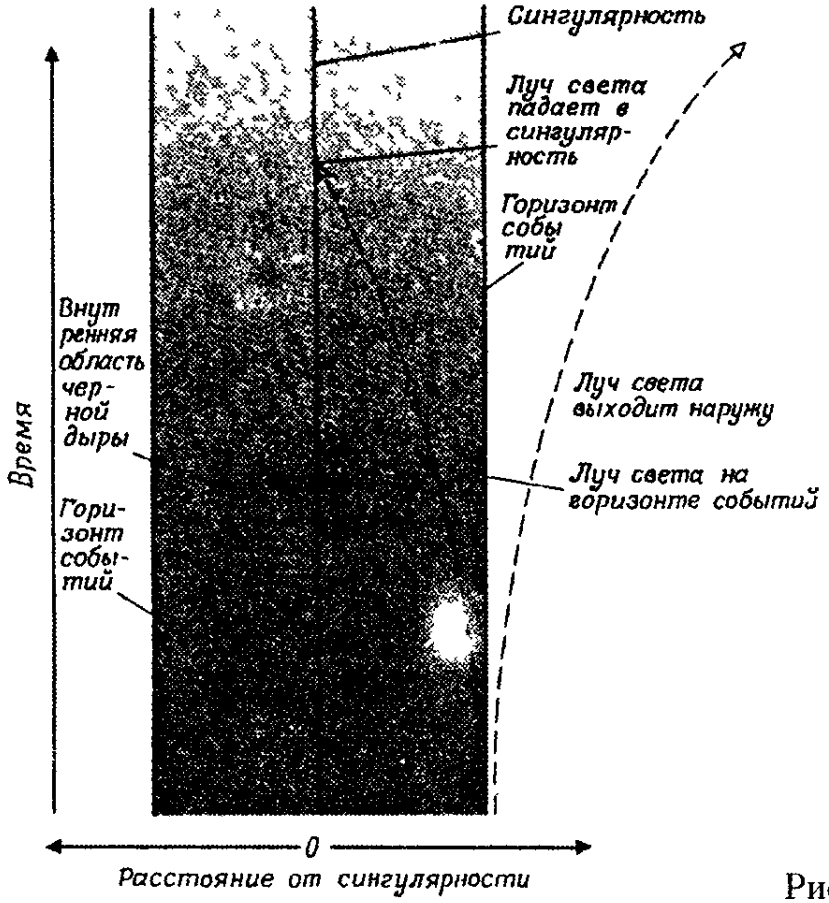


Рис 7 1

Как если бы наткнуться на кого-то другого, тоже убегающего от полицейского, но в противоположном направлении, — тогда оба будут пойманы (Или же, в нашем случае, упадут в черную дыру) Но если бы эти лучи света поглотила черная дыра, то они не могли бы лежать на границе черной дыры Следовательно, на горизонте событий лучи света должны всегда двигаться параллельно друг другу, т е поодаль друг от друга Иначе говоря, горизонт событий (граница черной дыры) подобен краю тени — тени грядущей гибели Если посмотреть на тень, создаваемую каким-нибудь очень удаленным источником, например Солнцем, то вы увидите, что на краю тени лучи света не приближаются друг к другу

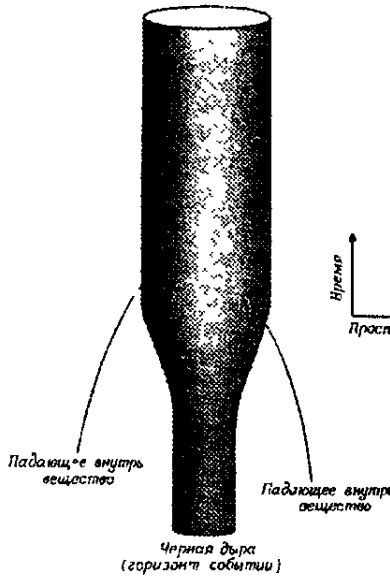


Рис. 7.2

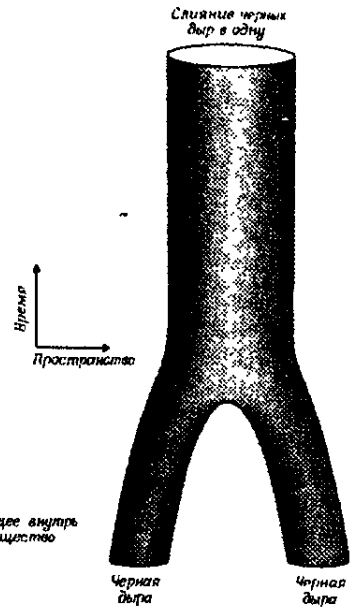


Рис. 7.3

Если лучи света, образующие горизонт событий, т. е. границу черной дыры, никогда не смогут сблизиться, то площадь горизонта событий может либо оставаться той же самой, либо увеличиваться со временем, но никогда не будет уменьшаться, потому что ее уменьшение означало бы, что по крайней мере некоторые лучи света на границе черной дыры должны сближаться. На самом деле эта площадь будет всегда увеличиваться при падении в черную дыру вещества или излучения (рис. 7.2). Если же две черные дыры столкнутся и сольются в одну, то площадь горизонта событий либо будет больше суммы площадей горизонтов событий исходных черных дыр, либо будет равна этой сумме (рис. 7.3). То, что площадь горизонта событий не уменьшается, налагает важное ограничение на возможное поведение черных дыр. Я был так возбужден сделанным открытием, что почти не спал в ту ночь. На следующий день я позвонил Роджеру Пенроузу. Он согласился с моими рассуждениями. Я думаю, что на самом деле это свойство площадей

Пенроузу было уже известно. Но он исходил из несколько иного определения черной дыры. Он не понял, что оба определения дают одинаковые границы черной дыры и, следовательно, одинаковые площади при условии, что черная дыра находится в состоянии, не изменяющемся со временем.

То, что площадь черной дыры не уменьшается, очень напоминает поведение одной физической величины — энтропии, которая является мерой беспорядка в системе. По своему повседневному опыту мы знаем, что беспорядок всегда увеличивается, если пустить все на самотек. (Попробуйте только прекратить дома всякий мелкий ремонт, и вы убедитесь в этом воочию!) Беспорядок можно превратить в порядок (например, покрасив дом), но это потребует затраты усилий и энергии и, следовательно, уменьшит количество имеющейся «упорядоченной» энергии.

Точная формулировка приведенных рассуждений называется вторым законом термодинамики. Этот закон гласит, что энтропия изолированной системы всегда возрастает и что при объединении двух систем в одну энтропия полной системы больше, чем сумма энтропий отдельных исходных систем. В качестве примера рассмотрим систему молекул газа в коробке. Можно представить себе, что молекулы — это маленькие бильярдные шары, которые все время сталкиваются друг с другом и отскакивают от стенок коробки. Чем выше температура газа, тем быстрее движутся молекулы и, следовательно, тем чаще и сильнее они ударяются о стенки коробки, и тем больше создаваемое ими изнутри давление на стенки коробки. Пусть сначала все молекулы находятся за перегородкой в левой части коробки. Если вынуть

перегородку, то молекулы выйдут из своей половины и распространятся по обеим частям коробки. Через некоторое время все молекулы могут случайно оказаться справа или опять слева, но, вероятнее всего, в обеих половинах коробки число молекул окажется примерно одинаковым. Такое состояние менее упорядочено, т. е. является состоянием большего беспорядка, чем исходное состояние, в котором все молекулы находились в одной половине, и поэтому говорят, что энтропия газа возросла. Аналогично представим себе, что вначале имеются две коробки, в одной из которых молекулы кислорода, а в другой — молекулы водорода. Если соединить коробки и вынуть общую стенку, то кислород и водород смешаются друг с другом. Наиболее вероятно, что через некоторое время в обеих коробках будет находиться довольно однородная смесь молекул кислорода и водорода. Это будет менее упорядоченное состояние, обладающее, следовательно, большей энтропией, чем начальное, отвечающее двум отдельным коробкам.

Второй закон термодинамики занимает несколько особое положение среди других законов науки, таких, например, как ньютоновский закон тяготения, потому что он выполняется не всегда, а только в подавляющем большинстве случаев. Вероятность того, что все молекулы газа в первой коробке через некоторое время окажутся в одной половине этой коробки, равна единице, деленной на много миллионов миллионов, но такое событие все же может произойти. Если же поблизости есть черная дыра, то нарушить второй закон, по-видимому, еще проще: достаточно бросить в черную дыру немного вещества, обладающего большой энтропией, например коробку с газом.

Тогда полная энтропия вещества снаружи черной дыры уменьшится. Разумеется, можно возразить, что полная энтропия, включая энтропию внутри черной дыры, не уменьшилась, но раз мы не можем заглянуть в черную дыру, мы не можем и узнать, какова энтропия содержащегося в ней вещества. Значит, было бы неплохо, если бы черная дыра обладала какой-нибудь такой характеристикой, по которой внешние наблюдатели могли бы определить ее энтропию и которая возрастала бы всякий раз при падении в черную дыру вещества, обладающего энтропией. После того как было открыто, что при падении в черную дыру вещества площадь горизонта событий увеличивается, Джекоб Бикенстин, аспирант из Принстона, предложил считать мерой энтропии черной дыры площадь горизонта событий. При падении в черную дыру вещества, обладающего энтропией, площадь горизонта событий черной дыры возрастает, и поэтому сумма энтропии вещества, находящегося снаружи черных дыр, и площадей горизонтов событий никогда не уменьшается.

Казалось бы, при таком подходе в большинстве случаев будет предотвращено нарушение второго закона термодинамики. Однако есть одно серьезное возражение. Если черная дыра обладает энтропией, то у нее должна быть и температура. Но тело, у которого есть некоторая температура, должно с какой-то интенсивностью испускать излучение. Все мы знаем, что если сунуть в огонь кочергу, она раскалится докрасна и будет светиться, но тела излучают и при более низких температурах, только мы этого обычно не замечаем из-за слабости излучения. Это излучение необходимо для того, чтобы не нарушался второй за-

кон термодинамики. Итак, черные дыры должны испускать излучение. Но по самому их понятию черные дыры — это такие объекты, которые не могут испускать излучения. Поэтому создавалось впечатление, что площадь горизонта событий черной дыры нельзя рассматривать как ее энтропию. В 1972 г. мы с Брендоном Картером и нашим американским коллегой Джимом Бардином написали совместную работу, в которой говорилось, что, несмотря на большое сходство между энтропией и площадью горизонта событий, вышеупомянутая трудность существует и представляется неустранимой. Должен признаться, что эта статья писалась отчасти под влиянием раздражения, вызванного работой Бикенстина, который, как я считал, злоупотребил открытым мною ростом площади горизонта событий. Но в конце концов оказалось, что Бикенстин в принципе был прав, хотя наверняка даже не представлял себе, каким образом.

Будучи в Москве в сентябре 1973 г., я беседовал о черных дырах с двумя ведущими советскими учеными — Я. Б. Зельдовичем и А. А. Старобинским. Они убедили меня в том, что в силу квантово-механического принципа неопределенности вращающиеся черные дыры должны рождать и излучать частицы. Я согласился с физическими доводами, но мне не понравился их математический способ расчета излучения. Поэтому я занялся разработкой лучшего математического подхода и рассказал о нем на неофициальном семинаре в Оксфорде в конце ноября 1973 г. Тогда я еще не провел расчеты самой интенсивности излучения. Я ожидал получить лишь то излучение, которое Зельдович и Старобинский пред-

сказали, рассматривая вращающиеся черные дыры. Но, выполнив вычисления, я, к своему удивлению и досаде, обнаружил, что даже невращающиеся черные дыры, по-видимому, должны с постоянной интенсивностью рождать и излучать частицы. Сначала я решил, что, вероятно, одно из использованных мной приближений неправильно. Я боялся, что если об этом узнает Бикенстин, то он этим воспользуется для дальнейшего обоснования своих соображений об энтропии черных дыр, которые мне по-прежнему не нравились. Однако чем больше я размышлял, тем больше убеждался в том, что мои приближения на самом деле правильны. Но меня окончательно убедило в существовании излучения то, что спектр испускаемых частиц должен быть в точности таким же, как спектр излучения горячего тела, и что черная дыра должна излучать частицы в точности с той интенсивностью, при которой не нарушался бы второй закон термодинамики. С тех пор многие самыми разными способами повторили мои расчеты и тоже подтвердили, что черная дыра должна испускать частицы и излучение, как если бы она была горячим телом, температура которого зависит только от массы черной дыры — чем больше масса, тем ниже температура.

Как же черная дыра может испускать частицы, если мы знаем, что ничто не выходит из нее за горизонт событий? Дело в том, говорит нам квантовая механика, что частицы выходят не из самой черной дыры, а из «пустого» пространства, находящегося перед горизонтом событий! Вот как это можно понять: то, что мы представляем себе как «пустое» пространство, не может быть совсем пустым, так как это означало бы, что все поля, такие, как гравитационное

и электромагнитное, в нем точно равны нулю. Но величина поля и скорость его изменения со временем аналогичны положению и скорости частицы: согласно принципу неопределенности, чем точнее известна одна из этих величин, тем менее точно известна вторая. Следовательно, в «пустом» пространстве поле не может иметь постоянного нулевого значения, так как тогда оно имело бы и точное значение (нуль), и точную скорость изменения (тоже нуль). Должна существовать некоторая минимальная неопределенность в величине поля — квантовые флуктуации. Эти флуктуации можно себе представить как пары частиц света или гравитации, которые в какой-то момент времени вместе возникают, расходятся, а потом опять сближаются и аннигилируют друг с другом. Такие частицы являются виртуальными, как частицы, переносящие гравитационную силу Солнца: в отличие от реальных виртуальные частицы нельзя наблюдать с помощью детектора реальных частиц. Но косвенные эффекты, производимые виртуальными частицами, например небольшие изменения энергии электронных орбит в атомах, можно измерить, и результаты удивительно точно согласуются с теоретическими предсказаниями. Принцип неопределенности предсказывает также существование аналогичных виртуальных пар частиц материи, таких, как электроны или кварки. Но в этом случае один член пары будет частицей, а второй—античастицей (античастицы света и гравитации — это то же самое, что и частицы).

Поскольку энергию нельзя создать из ничего, один из членов пары частица — античастица будет иметь положительную энергию, а второй — отрицательную. Тот, чья энергия отрицательна, может быть только

короткоживущей виртуальной частицей, потому что в нормальных ситуациях энергия реальных частиц всегда положительна. Значит, он должен найти своего партнера и с ним аннигилировать. Но, находясь рядом с массивным телом, реальная частица обладает меньшей энергией, чем вдали от него, так как для того, чтобы преодолеть гравитационное притяжение тела и удержаться вдали от него, нужна энергия. Обычно энергия частицы все-таки положительна, но гравитационное поле внутри черной дыры так велико, что даже реальная частица может иметь там отрицательную энергию. Поэтому, если имеется черная дыра, виртуальная частица с отрицательной энергией может упасть в эту черную дыру и превратиться в реальную частицу или античастицу. В этом случае она уже не обязана аннигилировать со своим партнером, а покинутый партнер может либо упасть в ту же черную дыру, либо, если его энергия положительна, выйти из области вблизи черной дыры как реальная частица или как античастица (рис. 7.4). Удаленному наблюдателю покажется, что этот партнер испущен из черной дыры. Чем меньше черная дыра, тем меньше расстояние, которое придется пройти частице с отрицательной энергией до превращения в реальную частицу, и, следовательно, тем больше скорость излучения и кажущаяся температура черной дыры.

Положительная энергия испускаемого излучения должна уравновешиваться потоком частиц с отрицательной энергией, направленным в черную дыру. Согласно уравнению Эйнштейна $E = mc^2$ (где E — энергия, m — масса, а c — скорость света), энергия прямо пропорциональна массе, а поэтому поток отрицательной энергии, входящий в черную дыру,

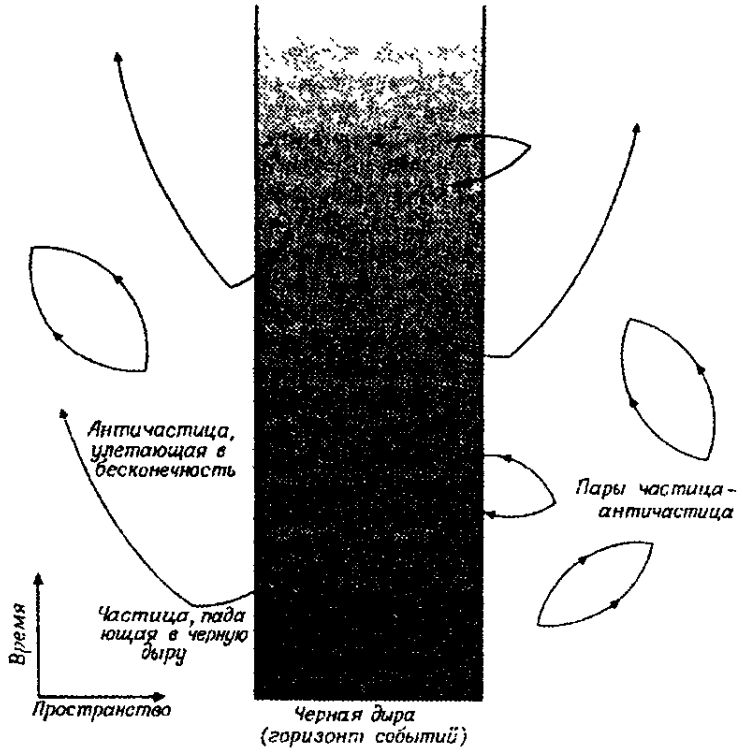


Рис. 7.4

уменьшает ее массу. Когда черная дыра теряет массу, площадь ее горизонта событий уменьшается, но это уменьшение энтропии черной дыры с лихвой возмещается энтропией испущенного излучения, так что второй закон термодинамики никогда не нарушается.

Кроме того, чем меньше масса черной дыры, тем выше ее температура. Поэтому, когда черная дыра теряет массу, ее температура и скорость излучения возрастают, и, следовательно, потеря массы идет еще быстрее. Пока еще не совсем ясно, что происходит, когда масса черной дыры в конце концов становится чрезвычайно малой, но наиболее логичным представляется, что черная дыра полностью исчезает в гигантской последней вспышке излучения, эквивалентной взрыву миллионов водородных бомб.

Температура черной дыры с массой, равной нескольким массам Солнца, должна быть равна всего

одной десятимиллионной градуса выше абсолютного нуля. Это гораздо меньше, чем температура микроволнового излучения, заполняющего Вселенную (около 2,7° выше абсолютного нуля). Следовательно, черные дыры должны излучать даже меньше, чем поглощать. Если Вселенной суждено вечно расширяться, то температура микроволнового излучения в конце концов упадет ниже температуры такой черной дыры и черная дыра начнет терять массу. Но и тогда ее температура будет настолько низкой, что она полностью испарится лишь через миллион миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов (единица с шестьюдесятью шестью нулями) лет. Это значительно превышает возраст Вселенной, который равен всего десяти или двадцати тысячам миллионов лет (единица или двойка с десятью нулями). Но, как говорилось в гл. 6, могли существовать первичные черные дыры с гораздо меньшей массой, образовавшиеся в результате коллапса нерегулярностей на очень ранних стадиях развития Вселенной. Такие черные дыры должны иметь гораздо более высокую температуру и испускать излучение с гораздо большей интенсивностью. Время жизни первичной черной дыры с начальной массой тысяча миллионов тонн должно быть примерно равно возрасту Вселенной. Первичные черные дыры с меньшими начальными массами должны были бы уже полностью испариться, а те, у которых начальные массы чуть-чуть больше, должны продолжать испускать рентгеновское и гамма-излучение. Эти виды излучения аналогичны световым волнам, но имеют гораздо меньшую длину волны. К подобным дырам едва ли подходит

название *черные*: на самом деле они *раскалены добела* и излучают энергию с мощностью около десяти тысяч мегаватт.

Одна такая черная дыра могла бы обеспечить работу десяти крупных электростанций, если бы только мы умели использовать ее энергию. А это довольно трудно: наша черная дыра имела бы массу, равную массе горы, сжатую примерно до одной миллион миллионной (единица, деленная на миллион миллионов) сантиметра, т. е. до размеров атомного ядра! Если бы одна из таких черных дыр оказалась на поверхности Земли, то мы никак не могли бы предотвратить ее падение сквозь пол к центру Земли. Она колебалась бы взад-вперед вдоль земной оси до тех пор, пока в конце концов не остановилась бы в центре. Следовательно, единственное место для этой черной дыры, где излучаемую ею энергию можно было бы использовать, — это орбита вокруг Земли, а единственный способ привлечь черную дыру на эту орбиту — буксировать перед ней огромную массу, как морковку перед самым носом осла. Такое предложение выглядит не слишком реальным, по крайней мере в ближайшем будущем.

Но даже если мы не сможем использовать излучение этих первичных черных дыр, то велика ли возможность их увидеть? Можно было бы искать гамма-излучение, которое черные дыры испускают на протяжении большей части своей жизни. Несмотря на то что черные дыры в основном находятся далеко и поэтому дают очень слабое излучение, суммарное излучение всех черных дыр могло бы поддаваться регистрации. Мы действительно наблюдаем фон такого гамма-излучения: на рис. 7.5 показано, как интенсивности наблю-

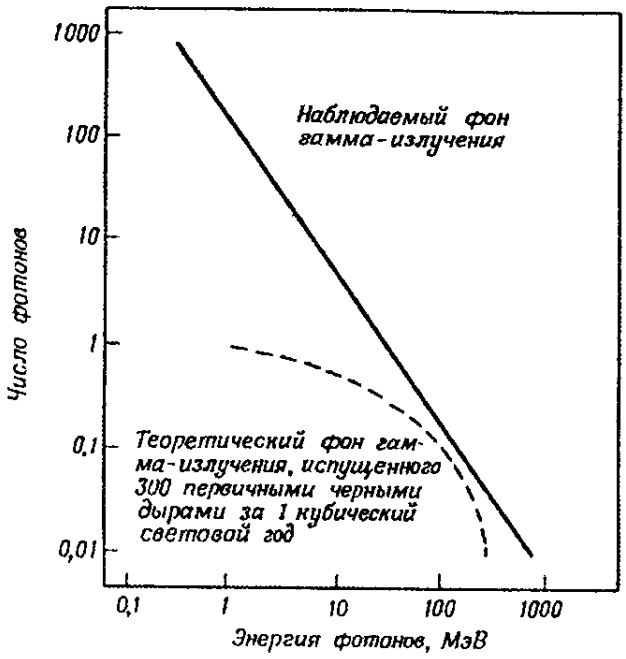


Рис. 7.5

даемых гамма-лучей различаются при разных частотах (частота — это число волн в секунду). Но источником этого фона могли быть, а может быть, и были не первичные черные дыры, а какие-нибудь другие процессы. На рис. 7.5 пунктиром представлена вычисленная зависимость интенсивности от частоты гамма-излучения, испускаемого первичными черными дырами, при плотности 300 черных дыр на кубический световой год. На основании графика можно сделать вывод, что измерение фона гамма-излучения не дает никакой *положительной* информации о существовании первичных черных дыр, но указывает на то, что во Вселенной не может быть в среднем больше 300 черных дыр в каждом кубическом световом году. Этот предел означает, что первичные дыры могли бы составлять максимум одну миллионную всего вещества во Вселенной.

При таком скудном количестве черных дыр могло бы показаться неправдоподобным, чтобы какая-ни-

будь из них оказалась очень близко от нас и ее можно было бы наблюдать как некий отдельный источник гамма-излучения. Но поскольку под действием гравитации первичные черные дыры должны притягиваться к любому веществу, их должно быть гораздо больше внутри и вокруг галактик. Следовательно, хотя вычисленный фон гамма-излучения говорит о том, что в одном кубическом световом году не может быть в среднем больше 300 первичных черных дыр, он не дает никакой информации о том, насколько часто первичные черные дыры встречаются в нашей собственной Галактике. Если бы их было, скажем, в миллион раз больше, то ближайшая к нам черная дыра могла оказаться на расстоянии тысячи миллионов километров, т. е. примерно на уровне Плутона, самой далекой из известных планет. На таком расстоянии все равно очень трудно зарегистрировать постоянное излучение черной дыры, даже если его мощность равна десяти тысячам мегаватт. Для наблюдения первичной черной дыры требуется зарегистрировать несколько гамма-квантов, пришедших с одной и той же стороны, в течение какого-нибудь разумного интервала времени, скажем за неделю. Иначе они могут оказаться просто частью фона. Но по закону Планка каждый гамма-квант обладает большой энергией, так как гамма-излучение имеет высокую частоту, следовательно, для излучения даже десяти тысяч мегаватт потребуется не очень много квантов. А для наблюдения этих нескольких квантов, пришедших с расстояния, равного расстоянию до Плутона, нужен был бы детектор гамма-излучения намного большего размера, чем любой из ныне существующих. Кроме того, этот детектор нужно

было бы поместить в космосе, потому что гамма-излучение не проходит через атмосферу.

Разумеется, если бы черная дыра, находящаяся на расстоянии Плутона, закончив свой жизненный цикл, взорвалась, последний всплеск излучения можно было бы с легкостью зарегистрировать. Но если черная дыра продолжает излучать в течение последних десяти или двадцати тысяч миллионов лет, то шансы на то, что ее гибель придется на ближайшие несколько лет, а не на те несколько миллионов лет, что уже прошли или еще наступят, действительно очень малы! Значит, чтобы иметь реальную возможность увидеть взрыв до окончания финансирования эксперимента, вы должны придумать, как регистрировать взрывы, происходящие на расстоянии порядка одного светового года. Вам все равно будет нужен большой детектор гамма-излучения, чтобы зарегистрировать несколько гамма-квантов из тех, что образуются при взрыве. Но в этом случае отпадает необходимость проверять, что все гамма-кванты приходят с одной и той же стороны: достаточно будет знать, что все они зарегистрированы в течение очень короткого промежутка времени, чтобы быть уверенным в том, что их источником является одна и та же вспышка.

Один из детекторов гамма-излучения, с помощью которого можно было бы опознавать первичные черные дыры, — это вся атмосфера Земли. (Во всяком случае, вряд ли нам удастся построить детектор большего размера!) Когда гамма-квант, обладающий высокой энергией, сталкивается в земной атмосфере с атомами, рождаются пары из электронов и позитронов (антиэлектронов), которые в свою очередь сталкиваются с атомами и образуют новые электронно-пози-

тронные пары. Возникает так называемый электронный ливень. Связанное с ним излучение представляет собой один из видов светового и называется черенковским. Поэтому вспышки гамма-излучения можно регистрировать, следя за световыми вспышками в ночном небе. Существуют, конечно, и другие явления (такие, как молния и отражение света от крутящихся спутников и обращающихся по орбитам ступеней ракет-носителей), которые тоже сопровождаются вспышками на небе. Вспышки, обусловленные гамма-излучением, можно отличить от этих явлений, проводя наблюдения одновременно из двух или большего числа пунктов, сильно удаленных друг от друга. Такие поиски предприняли в Аризоне двое ученых из Дублина, Нил Портер и Тревор Уикс. С помощью телескопов они обнаружили несколько вспышек, но ни одну из них нельзя было с определенностью приписать всплескам гамма-излучения первичных черных дыр.

Даже если поиск первичных черных дыр даст отрицательные результаты, а он может их дать, мы все равно получим важную информацию об очень ранних стадиях развития Вселенной. Если ранняя Вселенная была хаотической, или нерегулярной, или если давление материи было мало́, можно было бы ожидать образования значительно большего числа черных дыр, чем тот предел, который нам дали наблюдения фона гамма-излучения. Объяснить, почему черные дыры не существуют в таком количестве, в котором их можно было бы наблюдать, можно лишь в том случае, если ранняя Вселенная была очень гладкой и однородной, с высоким давлением вещества.

Вывод о том, что черные дыры могут испускать излучение, был первым предсказанием, которое суще-

ственным образом основывалось на обеих великих теориях нашего века — общей теории относительности и квантовой механике. Вначале этот вывод встретил сильное противодействие, так как шел вразрез с распространенным представлением: «Как черная дыра может что бы то ни было излучать?» Когда я впервые объявил о своих результатах на конференции в Резерфордовской лаборатории под Оксфордом, все к ним отнеслись недоверчиво. В конце доклада председатель секции Джон Тейлор из Королевского колледжа в Лондоне заявил, что все это чепуха. Он даже написал статью, чтобы доказать, что я не прав. Но в конце концов большинство, в том числе и Джон Тейлор, пришли к выводу, что черные дыры должны излучать как горячее тело, если только верны все остальные представления общей теории относительности и квантовой механики. Таким образом, хотя нам и не удалось отыскать первичную черную дыру, но если бы вдруг это удалось, то, по довольно общему убеждению, черная дыра должна была бы испускать мощное гамма- и рентгеновское излучение.

Вывод о существовании излучения, испускаемого черными дырами, по-видимому, означает, что гравитационный коллапс не так уж окончателен и необратим, как мы думали раньше. Если астронавт упадет в черную дыру, то ее масса увеличится, но в конце концов количество энергии, эквивалентное этой прибавке массы, вернется во Вселенную в форме излучения. Следовательно, в каком-то смысле астронавт будет «регенерирован». Это, конечно, не самый лучший вид бессмертия: собственное представление о времени у астронавта почти наверняка пропадет, когда

он разлетится на клочки внутри черной дыры! Даже частицы, испущенные черной дырой для компенсации массы астронавта, будут не теми, из которых он состоял: единственное свойство астронавта, которое сохранится, — это его масса или энергия.

Приближения, которыми я пользовался в расчетах излучения черных дыр, должны хорошо выполняться, когда масса черной дыры превышает доли грамма, но они неприменимы в конце жизни черной дыры, когда ее масса становится очень малой. По-видимому, наиболее вероятный исход — это просто исчезновение черной дыры, по крайней мере из нашей области Вселенной. Исчезнув, она унесет с собой и астронавта, и любую сингулярность, которая могла бы в ней оказаться. Это было первое указание на возможность устранения квантовой механикой сингулярностей, предсказываемых общей теорией относительности. Однако те методы, которыми и я, и другие ученые пользовались в 1974 г., не могли дать ответы на такие вопросы, как, например, появятся ли сингулярности в квантовой гравитации. Поэтому начиная с 1975 г. я занялся разработкой более действенного подхода к квантовой гравитации, основанного на фейнмановском суммировании по историям (траекториям). Ответы, полученные при таком подходе, на вопросы о происхождении и судьбе Вселенной и того, что в ней находится, например астронавтов, будут изложены в двух следующих главах. Мы увидим, что хотя принцип неопределенности налагает ограничения на точность всех наших предсказаний, он зато устраняет фундаментальную непредсказуемость, возникающую в сингулярности пространства-времени.

8
Рождение и гибель Вселенной

В общей теории относительности Эйнштейна, самой по себе, делается вывод, что пространство-время возникло в сингулярной точке большого взрыва, а свой конец оно должно находить в сингулярной точке большого хлопка́ (если коллапсирует вся Вселенная) и в сингулярности внутри черной дыры (если коллапсирует какая-нибудь локальная область типа звезды). Любое вещество, упавшее в такую дыру, в сингулярности должно разрушиться, и снаружи будет ощущаться лишь гравитационное воздействие его массы. Когда же были учтены квантовые эффекты, то оказалось, что масса и энергия вещества в конце концов должны, по-видимому, возвращаться оставшейся части Вселенной, а черная дыра вместе со своей внутренней сингулярностью должна испариться и полностью исчезнуть. Будет ли столь же большим влияние квантовой механики на сингулярности в точках большого взрыва и большого хлопка? Что в действительности происходит на очень ранних и очень поздних стадиях развития Вселенной, когда гравитационные поля настолько сильны, что нельзя пренебрегать квантовыми эффектами? Есть ли действительно у Вселенной начало и конец? А если есть, то каковы они?

На протяжении семидесятых годов я в основном занимался исследованием черных дыр, но в 1981 г.,

когда я был на конференции по космологии, организованной в Ватикане отцами-иезуитами, во мне опять проснулся интерес к вопросу о возникновении и гибели Вселенной. Католическая Церковь совершила большую ошибку в своих взаимоотношениях с Галилеем, когда, пытаясь подчинить закону вопрос науки, объявила, что Солнце обращается вокруг Земли. Теперь, через века, Церковь решила пригласить специалистов и получить у них консультацию по космологии. В конце конференции участники были удостоены аудиенции Папы. Он сказал, что эволюцию Вселенной после большого взрыва изучать можно, но не следует вторгаться в сам большой взрыв, потому что это был момент Сотворения и, следовательно, Божественный акт. Я был очень рад, что Папа не знал темы только что сделанного мной доклада о возможности того, что пространство-время конечно не имеет границ, т. е. что оно не имеет начала, а значит, нет и момента Сотворения. Мне не хотелось разделять судьбу Галилея, с которым, мне кажется, у меня есть что-то общее, хотя бы то, что по странному совпадению я родился точно через 300 лет после его смерти!

Чтобы было ясно, какими были мои мысли и мысли других о возможном влиянии квантовой механики на наши взгляды на рождение и гибель Вселенной, необходимо сначала напомнить общепринятую картину истории Вселенной, основанную на так называемой горячей модели большого взрыва. В ней считается, что Вселенная от наших дней до большого взрыва описывается одной из моделей Фридмана. В подобных моделях оказывается, что по мере расширения Вселенной вещество и излучение в ней охлаждаются. (С удвоением размеров Вселенной ее

температура становится вдвое ниже.) Поскольку температура — это просто мера энергии (т. е. скорости) частиц, охлаждение Вселенной должно сильно воздействовать на вещество внутри нее. При очень высоких температурах частицы движутся так быстро, что могут противостоять любому взаимному притяжению, вызванному ядерными или электромагнитными силами, но при охлаждении можно ожидать, что некоторые частицы будут притягиваться друг к другу и начнут сливаться. Более того, даже типы частиц, существующих во Вселенной, должны зависеть от температуры. При достаточно высоких температурах энергия частиц столь велика, что при любом столкновении образуется много разных пар частица—античастица, и, хотя некоторая доля этих частиц аннигилирует, сталкиваясь с античастицами, их образование происходит все равно быстрее аннигиляции. Но при более низких температурах, когда энергия сталкивающихся частиц меньше, пары частица—античастица будут образовываться медленнее и аннигиляция частиц будет происходит быстрее рождения.

Считается, что в момент большого взрыва размеры Вселенной были равны нулю, а сама она была бесконечно горячей. Но по мере расширения температура излучения понижалась. Через секунду после большого взрыва температура упала примерно до десяти тысяч миллионов градусов; это примерно в тысячу раз больше температуры в центре Солнца, но такие температуры достигаются при взрывах водородной бомбы. В это время Вселенная состояла из фотонов, электронов, нейтрино (нейтрино — легчайшие частицы, участвующие только в слабом и гравитационном

взаимодействиях) и их античастиц, а также из некоторого количества протонов и нейтронов. По мере того как Вселенная продолжала расширяться, а температура падать, скорость рождения электрон-антиэлектронных пар в соударениях стала меньше скорости их уничтожения за счет аннигиляции. Поэтому почти все электроны и антиэлектроны должны были аннигилировать друг с другом, образовав новые фотоны, так что осталось лишь чуть-чуть избыточных электронов. Но нейтрино и антинейтрино не аннигилировали друг с другом, потому что эти частицы очень слабо взаимодействуют между собой и с другими частицами. Поэтому они до сих пор должны встречаться вокруг нас. Если бы их можно было наблюдать, то у нас появился бы хороший способ проверки модели очень горячей ранней Вселенной. К сожалению, их энергии сейчас слишком малы, чтобы их можно было непосредственно наблюдать. Однако если нейтрино не является безмассовой частицей, а обладает небольшой собственной массой, обнаруженной в неподтвержденном эксперименте советских ученых 1981 г., то мы смогли бы обнаружить их косвенно: они могли бы оказаться одной из форм темной материи, упоминавшейся ранее, гравитационное притяжение которой достаточно для того, чтобы прекратить расширение Вселенной и заставить ее опять сжиматься.

Примерно через сто секунд после большого взрыва температура упала до тысячи миллионов градусов, что отвечает температуре внутри самых горячих звезд. При такой температуре энергии протонов и нейтронов уже недостаточно для сопротивления сильному ядерному притяжению, и они начинают

объединяться друг с другом, образуя ядра дейтерия (тяжелого водорода), которые состоят из протона и нейтрона. Затем ядра дейтерия присоединяют к себе еще протоны и нейтроны и превращаются в ядра гелия, содержащие два протона и два нейтрона, а также образуют небольшие количества более тяжелых элементов — лития и бериллия. Вычисления показывают, что, согласно горячей модели большого взрыва, около четвертой части протонов и нейтронов должно было превратиться в атомы гелия и небольшое количество тяжелого водорода и других элементов. Оставшиеся нейтроны распались на протоны, представляющие собой ядра обычных атомов водорода.

Описанная картина горячей Вселенной на ранней стадии развития была предложена ученым Джорджем (Г. А.) Гамовым в знаменитой работе, которую Гамов написал в 1948 г. вместе со своим аспирантом Ральфом Альфером. Обладая прекрасным чувством юмора, Гамов уговорил физика-ядерщика Ганса Бете добавить свою фамилию к списку авторов, чтобы получилось «Альфер, Бете, Гамов», что звучит, как названия первых трех букв греческого алфавита — альфа, бета, гамма, и чрезвычайно подходит для статьи о начале Вселенной! В этой статье было сделано замечательное предсказание о том, что излучение (в виде фотонов), испущенное на очень ранних стадиях развития Вселенной, должно до сих пор существовать вокруг нас, но за это время его температура упала и равна всего лишь нескольким градусам выше абсолютного нуля. Это именно то излучение, которое в 1965 г. обнаружили Пензиас и Вильсон. Когда Альфер, Бете и Гамов писали свою работу, ядерные реакции с участием протонов и нейтронов были плохо

изучены. Поэтому предсказанные ими соотношения между концентрациями разных элементов в ранней Вселенной оказались весьма неточными, однако, будучи повторены в свете новых представлений, все вычисления дали результаты, прекрасно согласующиеся с современными наблюдениями. Кроме того, очень трудно объяснить как-то иначе, почему во Вселенной должно быть так много гелия. Поэтому мы совершенно уверены в том, что эта картина правильна, по крайней мере спустя секунду после большого взрыва и позже.

Всего через несколько часов после большого взрыва образование гелия и других элементов прекратилось, после чего в течение примерно миллиона лет Вселенная просто продолжала расширяться и с ней не происходило ничего особенного. Наконец, когда температура упала до нескольких тысяч градусов и энергии электронов и ядер стало недостаточно для преодоления действующего между ними электромагнитного притяжения, они начали объединяться друг с другом, образуя атомы. Вся Вселенная как целое могла продолжать расширяться и охлаждаться, но в тех областях, плотность которых была немного выше средней, расширение замедлялось из-за дополнительного гравитационного притяжения. В результате некоторые области перестали расширяться и начали сжиматься. В процессе сжатия под действием гравитационного притяжения материи, находящейся снаружи этих областей, могло начаться их медленное вращение. С уменьшением размеров коллапсирующей области ее вращение ускорялось, подобно тому, как ускоряется вращение фигуриста на льду, когда он прижимает руки к телу. Когда наконец коллапси-

рующая область стала достаточно малой, скорости ее вращения должно было хватить для уравновешивания гравитационного притяжения — так образовались вращающиеся дискообразные галактики. Те области, которые не начали вращаться, превратились в овальные объекты, называемые эллиптическими галактиками. Коллапс этих областей тоже прекратился, потому что, хотя отдельные части галактики стабильно вращались вокруг ее центра, галактика в целом не вращалась.

Состоящий из водорода и гелия газ внутри галактик со временем распался на газовые облака меньшего размера, сжимающиеся под действием собственной гравитации. При сжатии этих облаков атомы внутри них сталкивались друг с другом, температура газа повышалась, и в конце концов газ разогрелся так сильно, что начались реакции ядерного синтеза. В результате этих реакций из водорода образовалось дополнительное количество гелия, а из-за выделившегося тепла возросло давление и газовые облака перестали сжиматься. Облака долго оставались в этом состоянии, подобно таким звездам, как наше Солнце, превращая водород в гелий и излучая выделяющуюся энергию в виде тепла и света. Более массивным звездам для уравновешивания своего более сильного гравитационного притяжения нужно было разогреться сильнее, и реакции ядерного синтеза протекали в них настолько быстрее, что они выжгли свой водород всего за сто миллионов лет. Затем они слегка сжались, и, поскольку нагрев продолжался, началось превращение гелия в более тяжелые элементы, такие как углерод и кислород. Но в подобных процессах выделяется не много энергии, и поэтому, как уже

говорилось в главе о черных дырах, должен был разразиться кризис. Не совсем ясно, что произошло потом, но вполне правдоподобно, что центральные области звезды коллапсировали в очень плотное состояние вроде нейтронной звезды или черной дыры. Внешние области звезды могут время от времени отрываться и уноситься чудовищным взрывом, который называется взрывом сверхновой, затмевающей своим блеском все остальные звезды в своей галактике. Часть более тяжелых элементов, образовавшихся перед гибелью звезды, была отброшена в заполняющий галактику газ и превратилась в сырье для последующих поколений звезд. Наше Солнце содержит около двух процентов упомянутых более тяжелых элементов, потому что оно является звездой второго или третьего поколения, образовавшейся около пяти миллионов лет назад из облака вращающегося газа, в котором находились осколки более ранних сверхновых. Газ из этого облака в основном пошел на образование Солнца или был унесен взрывом, но небольшое количество более тяжелых элементов, собравшись вместе, превратилось в небесные тела — планеты, которые сейчас, как и Земля, обращаются вокруг Солнца.

Сначала Земля была горячей и не имела атмосферы. Со временем она остыла, а вследствие выделения газа из горных пород возникла земная атмосфера. Ранняя атмосфера была непригодна для нашей жизни. В ней не было кислорода, но было много других, ядовитых для нас газов, например сероводорода (это тот газ, который придает специфический запах тухлым яйцам). Правда, есть и другие, примитивные формы жизни, которые могут процветать в таких

условиях. Предполагают, что они развились в океанах, возможно, в результате случайных объединений атомов в большие структуры, называемые макромолекулами, которые обладали способностью группировать другие атомы в океане в такие же структуры. Таким образом они самовоспроизводились и множились. Иногда в воспроизведении могли произойти сбои. Эти сбои большей частью состояли в том, что новая макромолекула не могла воспроизвести себя и в конце концов разрушалась. Но иногда в результате сбоев возникали новые макромолекулы, даже более способные к самовоспроизведению, что давало им преимущество, и они стремились заменить собой первоначальные. Так начался процесс эволюции, который приводил к возникновению все более и более сложных организмов, способных к самовоспроизведению. Самые первые примитивные живые организмы потребляли различные вещества, в том числе сероводород, и выделяли кислород. В результате происходило постепенное изменение земной атмосферы, состав которой в конце концов стал таким, как сейчас, и возникли подходящие условия для развития более высоких форм жизни, таких, как рыбы, рептилии, млекопитающие и, наконец, человеческий род.

Картина, в которой Вселенная сначала была очень горячей и охлаждалась по мере своего расширения, на сегодняшний день согласуется с результатами всех наблюдений. Тем не менее целый ряд важных вопросов остается без ответа.

1. Почему ранняя Вселенная была такой горячей?

2. Почему Вселенная так однородна в больших масштабах? Почему она выглядит одинаково во всех

точках пространства и во всех направлениях? В частности, почему температура космического фона микроволнового излучения практически не меняется при наблюдениях в разных направлениях? Когда на экзамене нескольким студентам подряд задается один и тот же вопрос и их ответы совпадают, вы можете быть совершенно уверены в том, что они советовались друг с другом. Однако в описанной модели с момента большого взрыва у света не было времени, чтобы попасть из одной удаленной области в другую, даже если эти области располагались близко друг к другу в ранней Вселенной. Согласно же теории относительности, если свет не может попасть из одной области в другую, то и никакая другая информация тоже не может. Поэтому разные области ранней Вселенной никак не могли выравнять свои температуры друг с другом, если у них не были одинаковые по какой-то непонятной причине температуры прямо с момента рождения.

3. Почему Вселенная начала расширяться со скоростью, столь близкой к критической, которая разделяет модели с повторным сжатием и модели с вечным расширением, так что даже сейчас, через десять тысяч миллионов лет, Вселенная продолжает расширяться со скоростью, примерно равной критической? Если бы через секунду после большого взрыва скорость расширения оказалась хоть на одну сто тысяча миллион миллионную[1] меньше, то произошло бы повторное сжатие Вселенной и она никогда бы не достигла своего современного состояния.

---

[1] 1/100 000 000 000 000 000.

4. Несмотря на крупномасштабную однородность Вселенной, в ней существуют неоднородности, такие, как звезды и галактики. Считается, что они образовались из-за небольших различий в плотности ранней Вселенной от области к области. Что было причиной этих флуктуаций плотности?

Общая теория относительности сама по себе не в состоянии объяснить перечисленные свойства или ответить на поставленные вопросы, так как она говорит, что Вселенная возникла в сингулярной точке большого взрыва и в самом начале имела бесконечную плотность. В сингулярной же точке общая теория относительности и все физические законы неверны: невозможно предсказать, что выйдет из сингулярности. Как мы уже говорили, это означает, что большой взрыв и все события до него можно выбросить из теории, потому что они никак не могут повлиять на то, что мы наблюдаем. Следовательно, пространство-время *должно* иметь границу — начало в точке большого взрыва.

Наука, по-видимому, открыла все те законы, которые в пределах погрешностей, налагаемых принципом неопределенности, позволяют предсказать, как Вселенная изменится со временем, если известно ее состояние в какой-то момент времени. Может быть, эти законы были даны Богом, но с тех пор Он, судя по всему, предоставил Вселенной развиваться в соответствии с ними и теперь не вмешивается в ее жизнь. Но какими он выбрал начальное состояние и начальную конфигурацию Вселенной? Какие «граничные условия» были в момент «начала времени»?

Один из возможных ответов — это сказать, что при выборе начальной конфигурации Вселенной Бог

руководствовался соображениями, понять которые нам не дано. Это, безусловно, было во власти Бога, но почему, выбрав такое странное начало, Он все же решил, чтобы Вселенная развивалась по понятным нам законам? Вся история науки была постепенным осознанием того, что события не происходят произвольным образом, а отражают определенный скрытый порядок, который мог или не мог быть установлен божественными силами. Было бы лишь естественно предположить, что этот порядок относится не только к законам науки, но и к условиям на границе пространства-времени, которые определяют начальное состояние Вселенной. Возможно большое число разных моделей Вселенной с иными начальными условиями, подчиняющихся законам науки. Должен существовать какой-то принцип для отбора одного начального состояния и, стало быть, одной модели для описания нашей Вселенной.

Одну из таких возможностей называют хаотическими граничными условиями. В них молчаливо принимается, либо что Вселенная бесконечна в пространстве, либо что существует бесконечно много вселенных. Согласно хаотическим граничным условиям, вероятность того, что любая выделенная область пространства сразу после большого взрыва окажется в *любом* заданном состоянии, примерно равна вероятности того, что она окажется в любом другом состоянии: начальное состояние Вселенной выбирается совершенно произвольным образом. Это означало бы, что ранняя Вселенная была, вероятно, очень хаотичной и нерегулярной, потому что хаотических и беспорядочных состояний Вселенной гораздо больше, чем гладких и упорядоченных. (Если все

состояния равновероятны, то Вселенная с большой вероятностью возникла в одном из хаотических и беспорядочных состояний просто потому, что таких состояний гораздо больше.) Трудно сказать, как подобные хаотические начальные условия могли породить такую гладкую и однородную в больших масштабах Вселенную, как наша сейчас. Можно также ожидать, что в такой модели флуктуации плотности приведут к образованию гораздо большего числа первичных черных дыр, чем верхний предел, вытекающий из наблюдений фона гамма-излучения.

Если Вселенная в самом деле бесконечна в пространстве или если существует бесконечно много вселенных, то где-то могли бы существовать довольно большие области, возникшие в гладком и однородном состоянии. Вспомним хорошо известный пример со стаей обезьян, барабанящих на пишущих машинках: бóльшая часть их работы пойдет в корзину, но в принципе они могут совершенно случайно напечатать один из сонетов Шекспира. Так и здесь — не могла ли область Вселенной, в которой мы живем, случайно оказаться гладкой и однородной? На первый взгляд это может показаться крайне маловероятным, потому что таких гладких областей должно быть намного меньше, чем хаотических и неоднородных. Но предположим, что галактики и звезды образовывались только в гладких областях и только там условия были пригодны для развития таких сложных самовоспроизводящихся организмов, как мы, способных задать вопрос: «Почему Вселенная такая гладкая?» Это пример применения так называемого антропного принципа, который можно сформулировать следующим образом: «Мы видим Все-

ленную так, как мы ее видим, потому что мы существуем».

Антропный принцип существует в двух вариантах — слабом и сильном. Слабый антропный принцип утверждает, что во Вселенной, которая велика или бесконечна в пространстве или во времени, условия, необходимые для развития разумных существ, будут выполняться только в некоторых областях, ограниченных в пространстве и времени. Поэтому разумные существа в этих областях не должны удивляться, обнаружив, что та область, где они живут, удовлетворяет условиям, необходимым для их существования. Так богач, живущий в богатом районе, не видит никакой бедности вокруг себя.

Один из примеров применения слабого антропного принципа — «объяснение» того, что большой взрыв произошел около десяти тысяч миллионов лет назад: примерно столько времени требуется разумным существам для их развития. Как уже говорилось, прежде всего должно было образоваться раннее поколение звезд. Эти звезды превращали часть первоначального водорода и гелия в элементы типа углерода и кислорода, из которых мы состоим. Затем звезды взрывались как сверхновые, а из их осколков образовывались другие звезды и планеты, в том числе и входящие в нашу Солнечную систему, возраст которой около пяти тысяч миллионов лет. В первые одну или две тысячи миллионов лет существования Земли на ней было слишком жарко для развития каких бы то ни было сложных организмов. Остальные примерно три тысячи миллионов лет происходит медленный процесс биологического развития, в результате которого простейшие организмы прошли

путь до разумных существ, умеющих измерять время, прошедшее с момента большого взрыва.

Мало кто возражает против справедливости и применимости слабого антропного принципа. Некоторые же идут значительно дальше, предлагая его сильный вариант. Он заключается в том, что существует либо много разных вселенных, либо много разных областей одной вселенной, каждая из которых имеет свою собственную начальную конфигурацию и, возможно, свой собственный набор научных законов. В большей части этих вселенных условия были непригодны для развития сложных организмов; лишь в нескольких, похожих на нашу, вселенных смогли развиваться разумные существа, и у этих разумных существ возник вопрос: «Почему наша Вселенная такая, какой мы ее видим?» Тогда ответ прост: «Если бы Вселенная была другой, здесь не было бы нас!»

Законы науки в том виде, в котором мы их знаем сейчас, содержат много фундаментальных величин, таких, как электрический заряд электрона и отношение массы протона к массе электрона. Мы не умеем, по крайней мере сейчас, теоретически предсказывать значения этих величин — они находятся только из эксперимента. Может быть, придет день, когда мы откроем полную единую теорию, с помощью которой все эти величины будут вычислены, но может оказаться, что некоторые из них, а то и все изменяются при переходе от вселенной к вселенной или в пределах одной вселенной. Удивительно, что значения таких величин были, по-видимому, очень точно подобраны, чтобы обеспечить возможность развития жизни. Если бы, например, электрический заряд электрона был чуть-чуть другим, звезды либо не сжигали бы

водород и гелий, либо не взрывались. Разумеется, могут быть и другие формы разумной жизни, о которых не грезили даже писатели-фантасты. Для поддержания этой жизни не требуются ни свет звезды, как, скажем, наше Солнце, ни тяжелые элементы, синтезирующиеся внутри звезд и разлетающиеся по космическому пространству при взрыве звезды. Тем не менее, по-видимому, ясно, что величины, о которых мы говорим, имеют сравнительно немного областей значений, при которых возможно развитие какой бы то ни было разумной жизни. Бóльшая же часть значений отвечает вселенным, в которых, как бы они ни были прекрасны, нет никого, кто мог бы ими восхищаться. Это можно воспринимать либо как свидетельство божественного провидения в сотворении Вселенной и выборе законов науки, либо как подтверждение сильного антропного принципа.

Можно выдвинуть несколько возражений против привлечения сильного антропного принципа для объяснения наблюдаемого состояния Вселенной. Во-первых, в каком смысле можно говорить, что все эти вселенные существуют? Если они действительно изолированы друг от друга, то события, происходящие не в нашей Вселенной, не могут иметь наблюдаемых следствий в нашей Вселенной. Поэтому нам следует воспользоваться принципом экономии и исключить их из теории. Если же эти вселенные — просто разные области одной и той же вселенной, то научные законы должны быть одинаковы в каждой области, потому что иначе был бы невозможен непрерывный переход из одной области в другую. Тогда области отличались бы друг от друга только начальными

конфигурациями и сильный антропный принцип сводился бы к слабой формулировке.

Второе возражение против сильного антропного принципа — это то, что он направлен против хода всей истории науки. Развитие науки шло от геоцентрических космологий Птолемея и его предшественников через гелиоцентрическую космологию Коперника и Галилея к современной картине мира, согласно которой Земля является планетой среднего размера, обращающейся вокруг обычной звезды внутри обычной спиральной галактики, которая в свою очередь является всего лишь одной из миллиона миллионов галактик в наблюдаемой части Вселенной. Тем не менее, согласно сильному антропному принципу, все это гигантское сооружение существует просто ради нас. В это очень трудно поверить. Наша Солнечная система безусловно является необходимым условием нашего существования; те же самые рассуждения можно распространить на всю нашу Галактику, чтобы учесть звезды раннего поколения, благодаря которым произошел синтез тяжелых элементов. Но, по-видимому, нет никакой необходимости в том, чтобы все эти другие галактики, да и вся Вселенная были такими однородными и одинаковыми в больших масштабах в любом направлении.

Можно было бы не беспокоиться насчет антропного принципа, особенно в его слабой формулировке, если бы удалось показать, что из разных начальных конфигураций Вселенной лишь некоторые могли развиться во Вселенную, как та, которую мы наблюдаем. Если это правильно, то Вселенная, возникшая из случайных начальных условий, должна содержать в себе гладкие и однородные области, пригодные для

развития разумной жизни. Если же для того, чтобы получилось то, что мы видим вокруг, требовался чрезвычайно тщательный выбор начального состояния Вселенной, то вряд ли в ней оказалась бы *хоть одна* область, в которой могла зародиться жизнь. В горячей модели большого взрыва было слишком мало времени для передачи тепла из одной области в другую. Это значит, что для объяснения того факта, что температура микроволнового фона одинакова в любом направлении наблюдения, необходимо, чтобы в начальном состоянии Вселенной ее температура была везде в точности одинаковой. Кроме того, требовался и очень точный выбор начальной скорости расширения, потому что для избежания повторного сжатия скорость расширения должна оставаться достаточно близкой к критическому значению. Следовательно, выбор начального состояния Вселенной должен производиться очень тщательно, если горячая модель большого взрыва применима до самого момента начала отсчета времени. Почему начало Вселенной должно было быть именно таким, очень трудно объяснить иначе, как деянием Бога, которому захотелось создать таких живых существ, как мы.

Попытки построить модель Вселенной, в которой множество разных начальных конфигураций могло бы развиться во что-нибудь вроде нашей нынешней Вселенной, привели Алана Гута, ученого из Массачусетского технологического института, к предположению о том, что ранняя Вселенная пережила период очень быстрого расширения. Это расширение называют раздуванием, подразумевая, что какое-то время расширение Вселенной происходило со все возрастающей скоростью, а не с убывающей, как сейчас. Гут

рассчитал, что радиус Вселенной увеличивался в миллион миллионов миллионов миллионов миллионов (единица с тридцатью нулями) раз всего за крошечную долю секунды.

Гут высказал предположение, что Вселенная возникла в результате большого взрыва в очень горячем, но довольно хаотическом состоянии. Высокие температуры означают, что частицы во Вселенной должны были очень быстро двигаться и иметь большие энергии. Как уже говорилось, при таких высоких температурах сильные и слабые ядерные силы и электромагнитная сила должны были все объединиться в одну. По мере расширения Вселенной она охлаждалась и энергии частиц уменьшались. В конце концов должен был бы произойти так называемый фазовый переход и симметрия сил была бы нарушена: сильное взаимодействие начало бы отличаться от слабого и электрогманитного. Известный пример фазового перехода — замерзание воды при охлаждении. Жидкое состояние воды симметрично, т. е. вода одинакова во всех точках и во всех направлениях. Образующиеся же кристаллы льда имеют определенные положения и выстраиваются в некотором направлении. В результате симметрия воды нарушается.

Если охлаждать воду очень осторожно, то ее можно «переохладить», т. е. охладить ниже точки замерзания (0° С) без образования льда. Гут предположил, что Вселенная могла себя вести похожим образом: ее температура могла упасть ниже критического значения без нарушения симметрии сил. Если бы это произошло, то Вселенная оказалась бы в нестабильном состоянии с энергией, превышающей ту, которую она имела бы при нарушении симметрии. Можно по-

казать, что эта особая дополнительная энергия производит антигравитационное действие аналогично космологической постоянной, которую Эйнштейн ввел в общую теорию относительности, пытаясь построить статическую модель Вселенной. Поскольку, как и в горячей модели большого взрыва, Вселенная уже вращалась, отталкивание, вносимое космологической постоянной, заставило бы Вселенную расширяться со все возрастающей скоростью. Даже в тех областях, где число частиц вещества превышало среднее значение, гравитационное притяжение материи было бы меньше отталкивания, вносимого эффективной космологической постоянной. Следовательно, такие области должны были тоже расширяться с ускорением, характерным для модели раздувающейся Вселенной. По мере расширения частицы материи расходились бы все дальше друг от друга, и в конце концов расширяющаяся Вселенная оказалась бы почти без частиц, но все еще в переохлажденном состоянии. В результате расширения все неоднородности во Вселенной должны были просто сгладиться, как разглаживаются при надувании морщины на резиновом шарике. Следовательно, нынешнее гладкое и однородное состояние Вселенной могло развиться из большого числа разных неоднородных начальных состояний.

Во Вселенной, скорость расширения которой растет из-за космологической постоянной быстрее, чем замедляется из-за гравитационного притяжения материи, свету хватило бы времени для перехода из одной области ранней Вселенной в другую. Это было бы решением ранее поставленной задачи о том, почему разные области ранней Вселенной имеют оди-

наковые свойства. Кроме того, скорость расширения Вселенной стала бы автоматически очень близка к критическому значению, определяемому плотностью энергии во Вселенной. Тогда такую близость скорости расширения к критической можно было бы объяснить, не делая предположения о тщательном выборе начальной скорости расширения Вселенной.

Раздуванием Вселенной можно было бы объяснить, почему в ней так много вещества. В доступной наблюдениям области Вселенной содержится порядка ста миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов (единица с восемьюдесятью нулями) частиц. Откуда все они взялись? Ответ состоит в том, что в квантовой теории частицы могут рождаться из энергии в виде пар частица—античастица. Но тогда сразу возникает вопрос: откуда берется энергия? Ответ таков. Полная энергия Вселенной в точности равна нулю. Вещество во Вселенной образовано из положительной энергии. Но все вещество само себя притягивает под действием гравитации. Два близко расположенных куска вещества обладают меньшей энергией, чем те же два куска, находящиеся далеко друг от друга, потому что для разнесения их в стороны нужно затратить энергию на преодоление гравитационной силы, стремящейся их соединить. Следовательно, энергия гравитационного поля в каком-то смысле отрицательна. Можно показать, что в случае Вселенной, примерно однородной в пространстве, эта отрицательная гравитационная энергия в точности компенсирует положительную энергию, связанную с веществом. Поэтому полная энергия Вселенной равна нулю.

Поскольку дважды нуль тоже нуль, количество положительной энергии вещества во Вселенной может удвоиться одновременно с удвоением отрицательной гравитационной энергии; закон сохранения энергии при этом не нарушится. Такого не бывает при нормальном расширении Вселенной, в которой плотность энергии вещества уменьшается по мере увеличения размеров Вселенной. Но именно так происходит при раздувании, потому что в этом случае Вселенная увеличивается, а плотность энергии переохлажденного состояния остается постоянной: когда размеры Вселенной удвоятся, положительная энергия вещества и отрицательная гравитационная энергия тоже удвоятся, в результате чего полная энергия остается равной нулю. В фазе раздувания размеры Вселенной очень сильно возрастают. Следовательно, общее количество энергии, за счет которой могут образовываться частицы, тоже сильно увеличивается. Гут по этому поводу заметил: «Говорят, что не бывает скатерти-самобранки. А не вечная ли самобранка сама Вселенная?»

Сейчас Вселенная расширяется без раздувания. Значит, должен существовать какой-то механизм, благодаря которому была устранена очень большая эффективная космологическая постоянная, а скорость расширения перестала расти и под действием гравитации начала уменьшаться, как продолжает уменьшаться и сейчас. Можно ожидать, что при раздувании в конце концов нарушится симметрия сил, так же как переохлажденная вода в конце концов замерзнет. Тогда лишняя энергия состояния с ненарушенной симметрией должна выделиться, и за счет этого Вселенная разогреется до температуры, чуть-

чуть меньшей, чем критическая температура, при которой симметрия сил еще не нарушается. Затем Вселенная опять начнет расширяться и охлаждаться, так же как в горячей модели большого взрыва, но теперь мы уже сможем объяснить, почему скорость ее расширения в точности равна критической и почему разные области Вселенной имеют одинаковую температуру.

В гипотезе Гута фазовый переход происходил очень быстро, как возникают вдруг кристаллы льда в очень холодной воде. Идея Гута заключалась в том, что внутри старой фазы образуются «пузырьки» новой фазы нарушенной симметрии, подобно тому, как в кипящей воде зарождаются пузырьки пара. Гут предположил, что пузыри расширяются и сливаются друг с другом до тех пор, пока вся Вселенная не окажется в новой фазе. Но вот в чем беда: Вселенная, на что указали я и еще несколько человек, так быстро расширяется, что даже если бы пузыри росли со скоростью света, они все равно удалялись бы друг от друга и поэтому не могли бы сливаться. Вселенная оставалась бы в очень неоднородном состоянии, и в некоторых областях симметрия между силами сохранялась бы. Такая модель Вселенной не соответствовала бы тому, что мы видим.

В октябре 1981 г. я приехал в Москву на конференцию по квантовой гравитации. После конференции я сделал доклад о модели раздувающейся Вселенной и связанных с ней проблемах в Астрономическом институте им. Штернберга. Среди слушателей был молодой советский физик Андрей Линде, сотрудник Физического института им. Лебедева. Он сказал, что трудность, связанная с невозможностью

объединения пузырей, отпадает, если размеры пузырей столь велики, что вся наша область Вселенной содержится внутри одного пузыря. Для того чтобы это предположение выполнялось, сохранение симметрии внутри пузыря должно очень медленно переходить в ее нарушение, что вполне возможно в теории великого объединения. Мысль Линде о медленном нарушении симметрии была очень хороша, но потом мне стало ясно, что́ его пузыри должны быть больше нынешней Вселенной! Я доказал, что симметрия должна нарушаться всюду одновременно, а не только внутри пузырей. Только это привело бы к той однородной Вселенной, которую мы сейчас наблюдаем. Я был сильно возбужден своей идеей и поделился ею с одним из своих аспирантов Яном Моссом. Подружившись с Линде, я оказался в некотором замешательстве, когда позднее получил из научного журнала представленную Линде статью с просьбой от редакции дать отзыв о ее пригодности для публикации. В своем ответе я написал, что в статье есть одна ошибка (пузыри должны быть больше Вселенной), но что основная идея медленного нарушения симметрии совершенно правильна. Я рекомендовал статью для публикации в том виде, в котором она была, иначе исправления заняли бы у Линде несколько месяцев, потому что все рукописи, отправляемые из Советского Союза на Запад, должны были проходить через аппарат литературной цензуры, который в то время не проявлял ни особой квалификации, ни скорости в обращении с научными статьями. Мы же с Яном Моссом послали в тот же журнал небольшую статью, в которой указали на сложности, возникающие с большим пузырем, и показали, как их можно преодолеть.

Через день после возвращения из Москвы я отправился в Филадельфию, где мне должны были вручить медаль Института Франклина. Мой секретарь Джуди Фелла, использовав все свое немалое обаяние, убедила воздушное агентство Великобритании продать нам два билета на «Конкорд», пригрозив в противном случае оглаской. Но по дороге в аэропорт меня застал чудовищный дождь, и я опоздал на самолет. Тем не менее я все-таки попал в Филадельфию и получил медаль. Потом меня попросили рассказать о модели раздувающейся Вселенной на семинаре в Университете Дрексела в Филадельфии. Бóльшую часть времени я, как и в Москве, посвятил задачам, связанным с этой моделью, но в конце упомянул об идее Линде медленного нарушения симметрии и о сделанных мной исправлениях. На семинаре присутствовал Пол Стейнхардт, молодой профессор Пенсильванского университета. После семинара мы с ним обсуждали модель раздувания. В феврале он прислал мне статью, написанную им совместно со студентом Андреасом Албрехтом, в которой содержалось нечто очень похожее на идею Линде медленного нарушения симметрии. Позже Стейнхардт сказал мне, что он не помнил мой рассказ о работе Линде и увидел ее, лишь когда они почти закончили свою. На Западе Стейнхардт и Албрехт разделяют сейчас честь открытия модели, которая называется новой моделью раздувания и основана на идее медленного нарушения симметрии. (Старой моделью раздувания Вселенной называют предложенное Гутом быстрое нарушение симметрии с образованием пузырей.)

Новая модель раздувания Вселенной была удачной попыткой объяснить, почему Вселенная стала

именно такой, какая она сейчас. Однако я и еще несколько человек показали, что эта модель, по крайней мере в первоначальном виде, предсказывала гораздо большие вариации температуры фона микроволнового излучения, чем наблюдаемые. Последующие работы тоже внушали сомнения по поводу того, мог ли в очень ранней Вселенной произойти подходящий фазовый переход. Сам я считаю, что новая модель раздувания как научная теория уже мертва, несмотря на то что многие, по-видимому, не слышали о ее кончине и продолжают писать статьи, как будто бы эта модель все еще жизнеспособна. В 1983 г. Линде предложил более удачную модель, называемую хаотической моделью раздувания. В ней нет ни фазового перехода, ни переохлаждения, а взамен присутствует бесспиновое поле, которое из-за квантовых флуктуаций принимает большие значения в некоторых областях ранней Вселенной. В таких областях энергия поля будет вести себя как космологическая постоянная. Результатом действия поля будет гравитационное отталкивание, под влиянием которого вышеуказанные области начнут раздуваться. По мере увеличения этих областей энергия поля в них будет медленно уменьшаться, пока раздувание не перейдет в такое же расширение, как в горячей модели большого взрыва. Одна из областей могла бы превратиться в современную наблюдаемую Вселенную. Модель Линде обладает всеми преимуществами ранней модели раздувания, но не требует сомнительного фазового перехода и, кроме того, может дать реальную оценку флуктуаций температуры фона микроволнового излучения, согласующуюся с результатами наблюдений.

Проведенные исследования моделей раздувания показали, что современное состояние Вселенной могло возникнуть из большого числа разных начальных конфигураций. Это важный вывод, ибо из него следует, что выбор начального состояния той части Вселенной, в которой мы живем, мог быть не очень тщательным. Но вовсе не из *всякого* начального состояния могла получиться такая Вселенная, как наша. Это можно доказать, предположив, что Вселенная сейчас находится в совершенно другом состоянии, каком-нибудь очень нерегулярном и комковатом. Воспользовавшись законами науки, можно проследить развитие Вселенной назад во времени и определить ее конфигурацию в более ранние времена. По теоремам о сингулярности классической общей теории относительности сингулярность в точке большого взрыва все равно должна была существовать. Если такая Вселенная будет развиваться вперед во времени в соответствии с законами науки, то в конце мы придем к тому комковатому и нерегулярному состоянию, с которого начинали. Следовательно, должны существовать начальные конфигурации, из которых не может получиться такая Вселенная, какой сейчас мы видим нашу. Значит, даже модель раздувания ничего не говорит о том, почему начальная конфигурация оказалась не той, при которой получилась бы Вселенная, сильно отличающаяся от наблюдаемой нами. Следует ли обратиться для объяснения к антропному принципу? Было ли все происшедшее просто счастливой случайностью? Такой ответ выглядел бы как выражение отчаяния, отрицание всех наших надежд понять, какой же порядок лежит в основе Вселенной.

Для предсказания того, каким должно было быть начало Вселенной, необходимы законы, справедливые в начале отсчета времени. Если классическая общая теория относительности верна, то из доказанных Роджером Пенроузом и мной теорем о сингулярности следует, что в точке начала отсчета времени плотность и кривизна пространства-времени принимают бесконечные значения. В такой точке нарушаются все известные законы природы. Можно было бы предположить, что в сингулярностях действуют новые законы, но их трудно формулировать в точках со столь непонятным поведением, и мы не знали бы, как из наблюдений вывести вид этих законов. Но на самом деле из теорем о сингулярности следует, что гравитационное поле настолько усиливается, что становятся существенными квантовые гравитационные эффекты: классическая теория перестает давать хорошее описание Вселенной. Поэтому при изучении очень ранних стадий развития Вселенной приходится привлекать квантовую теорию гравитации. Как мы потом увидим, в квантовой теории обычные законы науки могут выполняться везде, в том числе и в начале отсчета времени: нет необходимости постулировать новые законы для сингулярностей, потому что в квантовой теории не должно быть никаких сингулярностей.

Пока у нас еще нет полной и согласованной теории, объединяющей квантовую механику и гравитацию. Но мы совершенно уверены в том, что подобная единая теория должна иметь некоторые определенные свойства. Во-первых, она должна включать в себя фейнмановский метод квантовой теории, основанный на суммах по траекториям частицы (и по «историям»

Вселенной). При таком методе в отличие от классической теории частица уже не рассматривается как обладающая одной-единственной траекторией. Напротив, предполагается, что она может перемещаться по всем возможным путям в пространстве-времени и любой ее траектории отвечает пара чисел, одно из которых дает длину волны, а другое — положение в периоде волны (фазу). Например, вероятность того, что частица пройдет через некоторую точку, получается суммированием всех волн, отвечающих каждой возможной траектории, проходящей через эту точку. Но попытки произвести такое суммирование наталкиваются на серьезные технические затруднения. Их можно обойти, лишь воспользовавшись следующим специальным рецептом: складываются волны, образующие те истории (траектории) частиц, которые происходят не в ощущаемом нами реальном (действительном) времени, а в так называемом мнимом времени. Мнимое время звучит, возможно, научно-фантастически, но на самом деле это строго определенное научное понятие. Умножив обычное (или действительное) число само на себя, мы получим положительное число. (Например, число 2, умноженное на 2, дает 4, и то же самое получается при умножении −2 на −2.) Но существуют особые числа (они называются мнимыми), которые при умножении сами на себя дают отрицательный результат. (Одно из таких чисел, мнимая единица i, при умножении само на себя дает −1, число $2i$, умноженное само на себя, дает −4 и т. д.) Во избежание усложнений технического характера при вычислении фейнмановских сумм по траекториям следует переходить к мнимому времени. Это означает, что

при расчетах время надо измерять не в действительных единицах, а в мнимых. Тогда в пространстве-времени обнаруживаются интересные изменения: в нем совершенно исчезает различие между временем и пространством. Пространство-время, в котором временная координата событий имеет мнимые значения, называют евклидовым, в честь древнегреческого ученого Евклида, основателя учения о геометрии двумерных поверхностей. То, что мы сейчас называем евклидовым пространством-временем, очень похоже на первоначальную геометрию Евклида и отличается от нее лишь числом измерений: четыре вместо двух. В евклидовом пространстве-времени не делается различий между осью времени и направлениями в пространстве. В реальном же пространстве-времени, где событиям отвечают действительные значения координаты времени, эти различия видны сразу: для всех событий ось времени лежит внутри светового конуса, а пространственные оси — снаружи. В любом случае, пока мы имеем дело с обычной квантовой механикой, мнимое время и евклидово пространство-время можно рассматривать просто как математический прием для расчета величин, связанных с реальным пространством-временем.

Второе условие, которое должна включать в себя любая завершенная теория, — это предположение Эйнштейна о том, что гравитационное поле представляется в виде искривленного пространства-времени: частицы стремятся двигаться по траекториям, заменяющим в искривленном пространстве-времени прямые, но, поскольку пространство-время не плоское, эти траектории искривляются, как будто на них действует гравитационное поле. Если фейнмановское

суммирование по траекториям соединить с представлением Эйнштейна о гравитации, то тогда аналогом траектории одной частицы станет все искривленное пространство-время, которое представляет собой историю всей Вселенной. Для того чтобы избежать технических затруднений, которые могут встретиться при конкретном вычислении суммы по историям, искривленные четырехмерные пространства надо считать евклидовыми. Это означает, что ось времени мнимая и не отличается от пространственных осей. Для вычисления вероятности того, что действительное пространство-время обладает некоторым свойством, например выглядит одинаково во всех точках и во всех направлениях, надо сложить волны, соответствующие всем тем историям, которые обладают этим свойством.

В классической общей теории относительности может существовать много разных видов искривленного пространства-времени, и все они отвечают разным начальным состояниям Вселенной. Зная начальное состояние нашей Вселенной, мы знали бы целиком всю ее историю. Аналогично в квантовой теории гравитации возможно много разных квантовых состояний Вселенной, и точно так же, зная, как вели себя в ранние времена искривленные евклидовы четырехмерные пространства в сумме по историям, мы могли бы определить квантовое состояние Вселенной.

В классической теории гравитации, использующей действительное пространство-время, возможны лишь два типа поведения Вселенной: либо она существовала в течение бесконечного времени, либо ее началом была сингулярная точка в какой-то конечный

момент времени в прошлом. В квантовой же теории гравитации возникает и третья возможность. Поскольку используются евклидовы пространства, в которых временна́я и пространственные оси равноправны, пространство-время, будучи конечным, может тем не менее не иметь сингулярностей, образующих его границу или край. Тогда пространство-время напоминало бы поверхность Земли с двумя дополнительными измерениями. Поверхность Земли имеет конечную протяженность, но у нее нет ни границы, ни края: поплыв по морю в сторону заката, вы не вывалитесь через край и не попадете в сингулярность (я это знаю, сам объехал вокруг света!).

Если евклидово пространство-время простирается назад по мнимому времени до бесконечности или начинается в сингулярной точке мнимого времени, то, как и в классической теории относительности, возникает вопрос об определении начального состояния Вселенной — Богу, может быть, и известно, каким было начало Вселенной, но у нас нет никаких оснований мыслить это начало таким, а не иным. Квантовая же теория гравитации открыла одну новую возможность: пространство-время не имеет границы, и поэтому нет необходимости определять поведение на границе. Тогда нет и сингулярностей, в которых нарушались бы законы науки, а пространство-время не имеет края, на котором пришлось бы прибегать к помощи Бога или какого-нибудь нового закона, чтобы наложить на пространство-время граничные условия. Можно было бы сказать, что граничное условие для Вселенной — отсутствие границ. Тогда Вселенная была бы совершенно самостоятельна и никак не зависела бы от того, что происходит снаружи. Она не

была бы сотворена, ее нельзя было бы уничтожить. Она просто *существовала* бы.

Я уже упоминал ранее о Ватиканской конференции. Именно на ней я впервые высказал ту мысль, что пространство и время, возможно, образуют вместе некую поверхность, которая имеет конечную протяженность, но не имеет границ и краев. Однако моя статья носила математический характер, и в ту пору, в общем, никому (так же, как и мне) не пришло в голову, что из этого положения могут следовать выводы о роли Бога в сотворении Вселенной. В то время, когда происходила Ватиканская конференция, я не знал еще, как можно использовать условие отсутствия границ, чтобы сделать выводы относительно Вселенной. Но следующее лето я провел в Калифорнийском университете, находящемся в Санта-Барбаре. Там один мой друг и коллега, Джим Хартл, исследовал при моем участии вопрос о том, каким условиям должна удовлетворять Вселенная, если пространство-время не имеет границ. В Кембридже я продолжил эту работу с двумя своими аспирантами, Джулианом Латтрелом и Джонатаном Холлиуэллом.

Хочу подчеркнуть, что данное положение о том, что время и пространство должны быть конечны без границ, есть всего лишь теоретический *постулат*: оно не может быть выведено из какого-либо другого принципа. Как и всякое теоретическое положение, оно может быть первоначально выдвинуто из эстетических или метафизических соображений, но затем должно пройти реальную проверку — позволяет ли оно делать предсказания, согласующиеся с наблюдениями. В случае квантовой теории гравитации такая проверка затруднена по двум причинам. Во-первых,

как будет показано в следующей главе, мы еще не имеем теории, которая успешно объединяла бы общую теорию относительности с квантовой механикой, хотя нам во многом известна форма, которую должна иметь такая теория. Во-вторых, всякая модель, детально описывающая всю Вселенную, несомненно, будет в математическом отношении слишком сложна, чтобы можно было на ее основе выполнять точные вычисления. Поэтому в расчетах неизбежны упрощающие предположения и приближения, и даже при этом задача извлечения предсказаний остается чудовищно сложной.

Всякая история в сумме по историям будет описывать не только пространство-время, но и все в нем, в том числе все сложные организмы, подобные человеческим существам, которые могут быть наблюдателями истории Вселенной. В этом можно видеть еще одно оправдание антропного принципа, ибо если все истории возможны, то, коль скоро мы существуем в одной из них, мы имеем право им пользоваться для объяснения причин того, что мир таков, каков он есть. Неясно лишь, какой смысл следует вложить в другие истории, в которых нас нет. Но такая картина квантовой теории гравитации была бы гораздо более удовлетворительной, если бы можно было показать, что при методе сумм по историям наша Вселенная отвечает не просто одной из возможных историй, а одной из наиболее вероятных. Для этого мы должны выполнить суммирование по историям для всех возможных евклидовых пространств-времен, не имеющих границ.

Если принять условие отсутствия границ, то оказывается, что вероятность развития Вселенной по

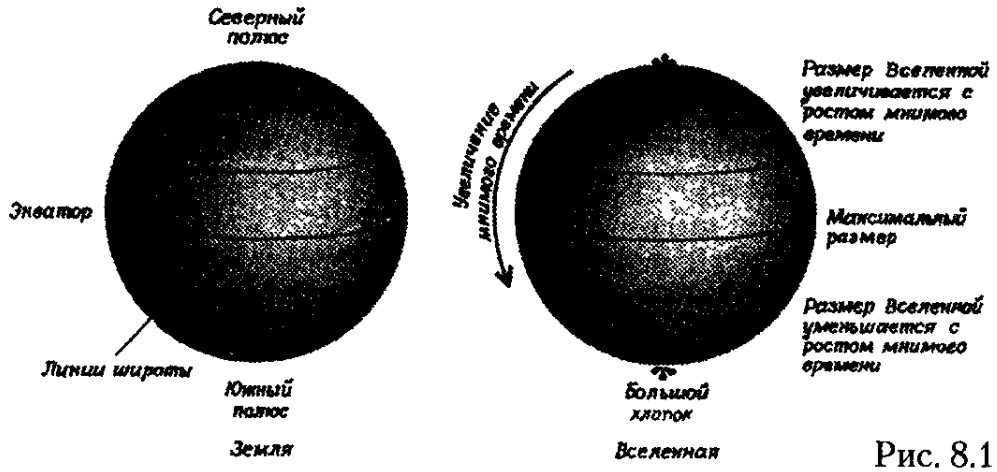


Рис. 8.1

большинству возможных историй пренебрежимо мала, но существует некоторое семейство историй, значительно более вероятных, чем остальные. Эти истории можно изобразить в виде как бы поверхности Земли, причем расстояние до Северного полюса соответствует мнимому времени, а размеры окружностей, все точки которых равно удалены от Северного полюса, отвечают пространственным размерам Вселенной. Вселенная начинается как точка на Северном полюсе. При движении на юг такие широтные окружности увеличиваются, что отвечает расширению Вселенной с течением мнимого времени (рис. 8.1). Вселенная достигает максимального размера на экваторе, а затем с течением мнимого времени сжимается в точку на Южном полюсе. Несмотря на то, что на Северном и Южном полюсе размер Вселенной равен нулю, эти точки будут сингулярными не более, чем Северный и Южный полюс на поверхности Земли. Законы науки будут выполняться в них так же, как они выполняются на Северном и Южном полюсах Земли.

Но в действительном времени история Вселенной выглядит совершенно иначе. Десять или двадцать

тысяч миллионов лет назад размер Вселенной имел минимальное значение, равное максимальному радиусу истории в мнимом времени. Затем, с течением действительного времени, Вселенная расширялась в соответствии с хаотической моделью раздувания, предложенной Линде (но теперь уже нет необходимости предполагать, что Вселенная была каким-то образом создана в правильном состоянии). Вселенная достигла очень больших размеров, а потом должна опять сжаться в нечто, имеющее в действительном времени вид сингулярности. Поэтому в каком-то смысле все мы обречены, даже если будем держаться подальше от черных дыр. Сингулярностей не будет лишь в том случае, если представлять себе развитие Вселенной в мнимом времени.

Если Вселенная на самом деле находится в таком квантовом состоянии, то ее история в мнимом времени не будет иметь никаких сингулярностей. Поэтому может показаться, что моими последними работами о сингулярностях полностью зачеркнуты мои же старые работы о сингулярностях. Но, как уже отмечалось, главное значение теорем о сингулярностях таково: они показывают, что гравитационное поле должно стать очень сильным, так что нельзя будет пренебречь квантовыми гравитационными эффектами. Именно это ведет к выводу, что в мнимом времени Вселенная должна быть конечной, но без границ и сингулярностей. По возвращении же в реальное время, в котором мы живем, обнаруживается, что сингулярности появляются опять. Астронавт, упавший в черную дыру, все равно придет к трагическому концу, и только в мнимом времени у него не было бы встречи с сингулярностями.

Может быть, следовало бы заключить, что так называемое мнимое время — это на самом деле есть время реальное, а то, что мы называем реальным временем, — просто плод нашего воображения. В действительном времени у Вселенной есть начало и конец, отвечающие сингулярностям, которые образуют границу пространства-времени и в которых нарушаются законы науки. В мнимом же времени нет ни сингулярностей, ни границ. Так что, быть может, именно то, что мы называем мнимым временем, на самом деле более фундаментально, а то, что мы называем временем реальным, — это некое субъективное представление, возникшее у нас при попытках описать, какой мы видим Вселенную. Ведь, согласно сказанному в гл. 1, научная теория есть просто математическая модель, построенная нами для описания результатов наблюдений: она существует только у нас в голове. Поэтому не имеет смысла спрашивать, что же реально — действительное время или время мнимое? Важно лишь, какое из них более подходит для описания.

Мы можем теперь, пользуясь методом суммирования по историям и предположением об отсутствии границ, посмотреть, какими свойствами Вселенная может обладать одновременно. Например, можно вычислить вероятность того, что Вселенная расширяется примерно с одинаковой скоростью во всех направлениях в то время, когда плотность Вселенной имеет современное значение. В упрощенных моделях, которыми мы до сих пор занимались, эта вероятность оказывается весьма значительной; таким образом, условие отсутствия границ приводит к выводу о чрезвычайно высокой вероятности того, что совре-

менный темп расширения Вселенной почти одинаков во всех направлениях. Это согласуется с наблюдениями фона микроволнового излучения, которые показывают, что его интенсивность во всех направлениях почти одинакова. Если бы Вселенная в одних направлениях расширялась быстрее, чем в других, то интенсивность излучения в этих направлениях уменьшалась бы за счет дополнительного красного смещения.

Сейчас изучаются и другие следствия из условия отсутствия границ. Особенно интересна задача о малых отклонениях плотности от однородной плотности ранней Вселенной, в результате которых возникли сначала галактики, потом звезды и наконец мы сами. В силу принципа неопределенности ранняя Вселенная не может быть совершенно однородной, потому что должны обязательно присутствовать некоторые неопределенности в положениях и скоростях частиц — флуктуации. Исходя из условия отсутствия границ, мы найдем, что в начальном состоянии во Вселенной действительно должна быть неоднородность, минимально возможная с точки зрения принципа неопределенности. Затем Вселенная пережила период быстрого расширения, как в моделях раздувания. В течение этого периода начальные неоднородности усиливались, пока не достигли размеров, достаточных, чтобы объяснить происхождение тех структур, которые мы видим вокруг себя. В такой расширяющейся Вселенной, в которой плотность вещества слабо меняется от места к месту, расширение более плотных областей под действием гравитации могло замедлиться и перейти в сжатие. Это должно привести к образованию галактик, звезд и,

наконец, даже таких незначительных существ, как мы. Таким образом, возникновение всех сложных структур, которые мы видим во Вселенной, можно объяснить условием отсутствия у нее границ в сочетании с квантово-механическим принципом неопределенности.

Из представления о том, что пространство и время образуют замкнутую поверхность, вытекают также очень важные следствия относительно роли Бога в жизни Вселенной. В связи с успехами, достигнутыми научными теориями в описании событий, большинство ученых пришло к убеждению, что Бог позволяет Вселенной развиваться в соответствии с определенной системой законов и не вмешивается в ее развитие, не нарушает эти законы. Но законы ничего не говорят нам о том, как выглядела Вселенная, когда она только возникла, — завести часы и выбрать начало все-таки могло быть делом Бога. Пока мы считаем, что у Вселенной было начало, мы можем думать, что у нее был Создатель. Если же Вселенная действительно полностью замкнута и не имеет ни границ, ни краев, то тогда у нее не должно быть ни начала, ни конца: она просто есть, и все! Остается ли тогда место для Создателя?

9
Стрела времени

В предыдущих главах мы видели, как менялись наши взгляды на природу времени с течением лет. До начала нынешнего века люди верили в абсолютное время. Это значит, что каждое событие можно единственным образом пометить неким числом, которое называется временем, и все точно идущие часы будут показывать одинаковый интервал времени между двумя событиями. Но открытие, что скорость света одна и та же для любого наблюдателя независимо от того, как он движется, привело к созданию теории относительности, которая отвергла существование единого абсолютного времени. Каждый наблюдатель имеет свое время, которое он измеряет своими часами, и показания часов разных наблюдателей не обязаны совпадать. Время стало более субъективным понятием, связанным с наблюдателем, который его измеряет.

Попытки объединить гравитацию с квантовой механикой привели к понятию мнимого времени. Мнимое время ничем не отличается от направлений в пространстве. Идя на север, можно повернуть назад и пойти на юг. Аналогично, если кто-то идет вперед в мнимом времени, то он может повернуть и пойти назад. Это означает, что между противоположными направлениями мнимого времени нет существенной

разницы. Но когда мы имеем дело с реальным временем, то мы знаем, что существует огромное различие между движением во времени вперед и назад. Откуда же берется такая разница между прошлым и будущим? Почему мы помним прошлое, но не помним будущего?

Законы науки не отличают прошлого от будущего. Точнее говоря, законы науки не меняются в результате выполнения операций (или симметрий), обозначаемых буквами *C*, *P* и *T*. (*C* — замена частицы античастицей, *P* — зеркальное отражение, когда левое и правое меняются местами, а *T* — изменение направления движения всех частиц на обратное.)

Законы физики, управляющие поведением материи во всех обычных ситуациях, не изменяются и после выполнения только двух операций *C* и *P*. Другими словами, жизнь будет одинакова и для нас, и для обитателей другой планеты, если они, во-первых, являются нашим зеркальным отражением и, во-вторых, состоят из антиматерии, а не из материи. Если законы науки не изменяет комбинация операций *C* и *P*, а также тройная комбинация *C*, *P* и *T*, то эти законы не должны изменяться и при выполнении одной операции *T*. Однако в обычной жизни существует огромное различие между движением вперед и назад во времени. Представьте себе, что со стола падает и разбивается на куски чашка с водой. Если снять это падение на пленку, то при просмотре фильма сразу станет ясно, вперед или назад прокручивается пленка. Если она прокручивается назад, то мы увидим, как лежащие на полу осколки вдруг собираются вместе и, сложившись в целую чашку, впрыгивают на стол. Вы можете утверждать, что фильм прокручивается

назад, потому что в обычной жизни такого не бывает. Иначе пришлось бы закрыть фаянсовые заводы.

Чтобы объяснить, почему разбитые чашки никогда не возвращаются целыми обратно на стол, обычно ссылаются на то, что это противоречило бы второму закону термодинамики. Он гласит, что в любой замкнутой системе беспорядок, или энтропия, всегда возрастает со временем. Другими словами, это похоже на закон Мёрфи: все в нашем мире происходит не так, как надо. Целая чашка на столе — это состояние высокого порядка, а разбитая, лежащая на полу, находится в состоянии беспорядка. Нетрудно пройти путь от целой чашки на столе в прошлом до разбитой на полу, но обратный ход событий невозможен.

Увеличение беспорядка, или энтропии, с течением времени — это одно из определений так называемой стрелы времени, т. е. возможности отличить прошлое от будущего, определить направление времени. Можно говорить по крайней мере о трех различных стрелах времени. Во-первых, стрела термодинамическая, указывающая направление времени, в котором возрастает беспорядок, или энтропия. Во-вторых, стрела психологическая. Это направление, в котором мы ощущаем ход времени, направление, при котором мы помним прошлое, но не будущее. И в-третьих, стрела космологическая. Это направление времени, в котором Вселенная расширяется, а не сжимается.

В данной главе я докажу, что, исходя из условия отсутствия границ у Вселенной и из слабого антропного принципа, можно объяснить, почему все три стрелы времени направлены одинаково и, более того, почему вообще должна существовать определенная стрела времени. Я докажу, что психологическая

стрела определяется термодинамической и обе эти стрелы всегда направлены одинаково. Предположив, что для Вселенной справедливо условие отсутствия границ, мы увидим, что должны существовать хорошо определенные термодинамическая и космологическая стрелы времени, хотя они не обязаны быть одинаково направленными на протяжении всей истории Вселенной. Но, как я покажу, лишь в том случае, когда направления этих стрел совпадают, могут возникнуть условия для развития разумных существ, способных задать такой вопрос: почему беспорядок увеличивается в том же направлениия по времени, в котором расширяется Вселенная?

Сначала рассмотрим термодинамическую стрелу времени. Второй закон термодинамики вытекает из того, что состояний беспорядка всегда гораздо больше, чем состояний порядка. Возьмем, например, картинку на детских кубиках. Имеется только одно взаимное расположение кубиков, при котором составляется нужная картинка. В то же время есть очень много разных беспорядочных расположений, когда картинка не составляется вообще.

Предположим, что какая-то система вначале находится в одном из немногих состояний порядка. С течением времени состояние системы будет изменяться в полном согласии с законами науки. Через некоторое время система из состояния порядка, скорее всего, перейдет в состояние беспорядка, поскольку состояний беспорядка больше. Следовательно, если система вначале находилась в состоянии высокого порядка, то со временем будет расти беспорядок. Так, если наши кубики сложены в картинку, то при перемешивании изменится их расположение и станет, скорее

всего, беспорядочным, потому что состояний беспорядка опять гораздо больше, чем состояний порядка. Картинка, конечно, при этом будет разрушена. Некоторые кубики еще будут удерживаться вместе, образуя куски картинки, но чем больше мы будем их перемешивать, тем с большей вероятностью эти куски рассыплются и все еще больше перепутается. В конце концов никакой картинки у нас не останется. Таким образом, беспорядок будет расти со временем, если в начале было состояние высокого порядка.

Предположим, однако, что Бог повелел, чтобы развитие Вселенной независимо от начального состояния заканчивалось в состоянии высокого порядка. На ранних стадиях Вселенная, вероятнее всего, находилась бы в состоянии беспорядка. Это означало бы, что беспорядок уменьшается со временем. Тогда вы видели бы, как разбитые чашки собираются из осколков и впрыгивают на стол. Но люди, которые видели бы такие прыгающие чашки, должны быть жителями вселенной, в которой беспорядок уменьшается со временем. Я утверждаю, что психологическая стрела времени этих людей должна быть направлена назад, т. е. они должны помнить события в будущем, но не должны помнить события, происходившие в прошлом. Увидев разбитую чашку, они вспомнили бы, как она стоит на столе, но когда она оказывается на столе, они не помнили бы, что она была на полу.

Рассуждать о человеческой памяти — весьма непростое занятие, ибо мы не знаем во всех деталях, как работает наш мозг Зато мы знаем все о том, как действует память компьютера. Поэтому я буду говорить о психологической стреле времени для компьютеров. Мне кажется вполне логичным предположить,

что и у компьютеров, и у людей психологическая стрела одна и та же. Если бы это было не так, то, имея компьютер, который помнил бы завтрашний курс акций, можно было бы прекрасно играть на бирже.

Память компьютера — это, грубо говоря, устройство, содержащее элементы, которые могут находиться в одном из двух состояний. Простой пример такого устройства — абак, древние счеты. В простейшем виде это набор горизонтальных проволочек, на каждую из которых насажена бусинка. Каждая бусинка находится в одном из двух положений. До тех пор пока в память компьютера ничего не введено, она находится в беспорядочном состоянии, в котором оба возможных расположения бусинок равновероятны (бусинки на проволочках распределены случайным образом). После того как память провзаимодействует с системой, состояние которой надо запомнить, ее состояние станет вполне определенным, зависящим от состояния системы. (Каждая бусинка на счетах будет либо в правом, либо в левом конце своей проволочки.) Итак, память компьютера перешла из беспорядка в упорядоченное состояние. Но для того, чтобы быть уверенным в том, что память находится в правильном состоянии, надо затратить некоторое количество энергии (например, для перебрасывания бусинок или питания компьютера). Эта энергия перейдет в тепло и тем самым увеличит степень беспорядка во Вселенной. Можно показать, что это увеличение беспорядка будет всегда больше, чем увеличение упорядоченности самой памяти. Необходимость охлаждения компьютера вентилятором говорит о том, что, когда компьютер записывает что-то в память, общий беспорядок во Вселенной все-таки увеличивается.

Направление времени, в котором компьютер запоминает прошлое, оказывается тем же, в котором растет беспорядок.

Следовательно, наше субъективное ощущение направления времени — психологическая стрела времени — задается в нашем мозгу термодинамической стрелой времени. Как и компьютер, мы должны запоминать события в том же порядке, в котором возрастает энтропия. Второй закон термодинамики становится при этом почти тривиальным. Беспорядок растет со временем, потому что мы измеряем время в направлении, в котором растет беспорядок. Трудно спорить с такой логикой!

Все же, почему термодинамическая стрела времени должна вообще существовать? Или, другими словами, почему на одном из концов времени, на том его конце, который мы называем прошлым, Вселенная должна находиться в состоянии с высокой упорядоченностью? Почему бы ей не быть в состоянии полного беспорядка? Ведь это выглядело бы более вероятным. Кроме того, почему беспорядок растет во времени в том же направлении, в котором расширяется Вселенная?

Классическая общая теория относительности не позволяет вычислить, как возникла Вселенная, потому что в сингулярной точке большого взрыва все известные нам законы природы должны нарушаться. Вселенная могла возникнуть в каком-то однородном, сильно упорядоченном состоянии. Это привело бы к четко определенным стрелам времени — термодинамической и космологической, как это наблюдается сейчас. Однако начальное состояние Вселенной вполне могло бы быть и очень неоднородным, и неупоря-

доченным. В этом случае Вселенная уже находилась бы в состоянии полного беспорядка и беспорядок не мог бы увеличиваться со временем. Он мог бы оставаться неизменным, тогда не было бы определенной термодинамической стрелы времени, либо мог бы уменьшаться, и тогда термодинамическая стрела времени была бы направлена навстречу космологической стреле. Ни одна из этих возможностей не согласуется с тем, что мы наблюдаем. Как мы, однако, видели, классическая общая теория относительности предсказывает свое нарушение. Когда кривизна пространства-времени становится большой, становятся существенными квантовые гравитационные эффекты, и классическая теория перестает служить надежным основанием для описания Вселенной. Чтобы понять, как возникла Вселенная, необходимо обратиться к квантовой теории гравитации.

Но, чтобы определить в квантовой теории гравитации состояние Вселенной, необходимо, как мы видели в предыдущих главах, знать, как возможные истории Вселенной вели себя на границе пространства-времени в прошлом. Необходимость знать то, что мы не знаем и знать не можем, отпадает лишь в том случае, если прошлые истории удовлетворяют условию отсутствия границ: они имеют конечную протяженность, но у них нет ни границ, ни краев, ни особенностей. Тогда начало отсчета времени должно было быть регулярной, гладкой точкой в пространстве-времени и Вселенная начала бы свое расширение из весьма однородного и упорядоченного состояния. Оно не могло бы быть совершенно однородным, потому что этим нарушался бы принцип неопределенности квантовой теории. Это значит, что должны

существовать небольшие флуктуации плотности и скоростей частиц. Но в силу условия отсутствия границ эти флуктуации должны были быть малы, чтобы согласоваться с принципом неопределенности.

Вначале Вселенная могла бы экспоненциально расширяться, или раздуваться, в результате чего ее размеры увеличились бы во много раз. Флуктуации плотности, оставаясь сначала небольшими, потом начали бы расти. Расширение тех областей, в которых плотность была чуть выше средней, происходило бы медленнее из-за гравитационного притяжения лишней массы. В конце концов такие области перестанут расширяться и коллапсируют, в результате чего образуются галактики, звезды и живые существа вроде нас. Таким образом, в момент возникновения Вселенная могла находиться в однородном и упорядоченном состоянии и перейти со временем в состояние неоднородное и неупорядоченное. Такой подход мог бы объяснить существование термодинамической стрелы времени.

Но что произошло бы, когда Вселенная перестала бы расширяться и стала сжиматься? Повернулась бы при этом термодинамическая стрела времени? Начал бы уменьшаться со временем беспорядок? Перед теми, кому посчастливилось бы пережить переход из фазы расширения в фазу сжатия, открылись бы самые фантастические возможности. Может быть, они увидели бы, как осколки разбитых чашек собираются на полу в целые чашки, которые возвращаются обратно на стол? А может быть, они бы помнили завтрашний курс акций и удачно играли на бирже? Правда, беспокойство по поводу того, что случится, если Вселенная опять начнет коллапсировать, кажется

несколько преждевременным — сжатия не будет еще по крайней мере десять тысяч миллионов лет. Однако узнать об этом можно гораздо быстрее. Для этого надо просто прыгнуть в черную дыру. Коллапс звезды в состояние черной дыры аналогичен последним стадиям коллапса всей Вселенной. Поэтому если беспорядок должен уменьшаться на стадии сжатия Вселенной, то он будет уменьшаться и внутри черной дыры. Тогда астронавт, упавший в черную дыру, мог бы там подзаработать, играя в рулетку. Ведь еще не сделав ставки, он бы уже помнил, где остановится шарик. (Правда, игра была бы очень недолгой, лишь до тех пор, пока сам астронавт не превратился бы в спагетти. Не успев сообщить нам о повороте термодинамической стрелы и даже не получив выигрыш, он исчез бы за горизонтом событий черной дыры.)

Вначале я считал, что при коллапсе Вселенной беспорядок должен уменьшаться, потому что, став опять маленькой, Вселенная должна была бы вернуться в исходное гладкое и упорядоченное состояние. Это означало бы, что фаза сжатия эквивалентна обращенной во времени фазе расширения. На стадии сжатия жизнь должна течь в обратном направлении, так что люди умирали бы до своего рождения и по мере сжатия Вселенной становились бы все моложе и моложе.

Привлекательность такого вывода — в красивой симметрии между фазой расширения и фазой сжатия. Однако его нельзя рассматривать сам по себе, независимо от других представлений о Вселенной. Возникает вопрос: следует ли этот вывод из условия отсутствия границ или же, напротив, с этим условием несовместим? Как уже говорилось, я считал

вначале, что условие отсутствия границ в самом деле означает, что беспорядок должен увеличиваться на стадии сжатия. Отчасти меня ввела в заблуждение аналогия с поверхностью Земли. Положим, что начало Вселенной соответствует Северному полюсу. Тогда конец Вселенной должен быть похож на начало так же, как Южный полюс похож на Северный. Но Северный и Южный полюсы соответствуют началу и концу Вселенной в мнимом времени. В реальном же времени начало и конец могут сколь угодно сильно отличаться друг от друга. Меня еще ввела в заблуждение работа, в которой я рассматривал одну простую модель Вселенной, где фаза коллапса была похожа на обращенную во времени фазу расширения. Но мой коллега, Дон Пейдж из Университета штата Пенсильвания, показал, что условие отсутствия границ вовсе не требует того, чтобы фаза сжатия была обращенной во времени фазой расширения. Затем один из моих аспирантов, Реймонд Лефлемм, установил, что в несколько более сложной модели коллапс Вселенной сильно отличается от ее расширения. Я понял, что ошибся: из условия отсутствия границ следует, что во время сжатия беспорядок должен продолжать увеличиваться. Термодинамическая и психологическая стрелы времени не изменят своего направления на противоположное ни в черной дыре, ни во Вселенной, начавшей сокращаться вновь.

Что бы вы сделали, обнаружив у себя такую ошибку? Некоторые никогда не признаются в своей неправоте и продолжают поиски новых, часто совершенно необоснованных, аргументов в пользу своих идей. Так поступил Эддингтон, выступив противником теории черных дыр. Другие заявляют, что они

никогда и не поддерживали эту неправильную точку зрения, а если и поддерживали, то лишь для того, чтобы продемонстрировать ее несостоятельность. Мне кажется, что гораздо правильнее выступить в печати с признанием своей неправоты. Прекрасный пример тому — Эйнштейн. О введении космологической постоянной, которая понадобилась ему при построении статической модели Вселенной, он говорил как о своей самой серьезной ошибке.

Вернемся к стреле времени. У нас остался один вопрос: почему, как показывают наблюдения, термодинамическая и космологическая стрелы направлены одинаково? Или, другими словами, почему беспорядок возрастает во времени в том же направлении, в каком расширяется Вселенная? Если считать, что Вселенная после расширения начнет сжиматься, как, по-видимому, следует из условия отсутствия границ, то наш вопрос звучит так: почему мы должны находиться в фазе расширения, а не в фазе сжатия?

Ответ на этот вопрос дает слабый антропный принцип: условия в фазе сжатия непригодны для существования таких разумных существ, которые могли бы спросить, почему беспорядок растет в том же направлении во времени, в котором расширяется Вселенная. Условие отсутствия границ предсказывает раздувание Вселенной на ранних стадиях развития. Это означает, что расширение Вселенной должно происходить со скоростью, очень близкой к критической, при которой коллапс исключается, а потому коллапса не будет очень долго. Но тогда все звезды успеют сгореть, а образующие их протоны и нейтроны распадутся на более легкие частицы. Вселенная осталась бы в состоянии практически полного беспорядка,

в котором не было бы сильной термодинамической стрелы времени. Беспорядок не мог сильно увеличиваться, ведь Вселенная и так находилась бы в состоянии почти полного беспорядка. Но для существования разумной жизни необходима сильная термодинамическая стрела. Чтобы выжить, люди должны потреблять пищу, которая выступает как носитель упорядоченной формы энергии, и превращать ее в тепло, т. е. в неупорядоченную форму энергии. Следовательно, на стадии сжатия никакой разумной жизни быть не могло. Этим объясняется, почему для нас термодинамическая и космологическая стрелы времени направлены одинаково. Неверно считать, будто беспорядок растет из-за расширения Вселенной. Всему причиной условие отсутствия границ. Из-за него растет беспорядок, но только в фазе расширения создаются условия для существования разумной жизни.

Подведем итог. Законы науки не делают различия между направлением «вперед» и «назад» во времени. Но существуют по крайней мере три стрелы времени, которые отличают будущее от прошлого. Это термодинамическая стрела, т. е. то направление времени, в котором возрастает беспорядок; психологическая стрела — то направление времени, в котором мы помним прошлое, а не будущее; космологическая стрела — направление времени, в котором Вселенная не сжимается, а расширяется. Я показал, что психологическая стрела практически эквивалентна термодинамической стреле, так что обе они должны быть направлены одинаково. Из условия отсутствия границ вытекает существование четко определенной термодинамической стрелы времени, потому что Вселенная должна была возникнуть в гладком и упорядо-

ченном состоянии. А причина совпадения термодинамической и космологической стрел кроется в том, что разумные существа могут жить только в фазе расширения. Фаза сжатия для них не подходит, потому что в ней отсутствует сильная термодинамическая стрела времени.

Прогресс человека на пути познания Вселенной привел к возникновению маленького уголка порядка в растущем беспорядке Вселенной. Если вы запомните каждое слово из этой книжки, то ваша память получит около двух миллионов единиц информации, и порядок в вашей голове возрастет примерно на два миллиона единиц. Но пока вы читали эту книгу, по крайней мере тысяча калорий упорядоченной энергии, которую вы получили в виде пищи, превратились в неупорядоченную энергию, которую вы передали в окружающий вас воздух в виде тепла за счет конвекции и потовыделения. Беспорядок во Вселенной возрастет при этом примерно на двадцать миллионов миллионов миллионов миллионов единиц, что в десять миллионов миллионов миллионов раз превышает указанное увеличение порядка в вашем мозгу, — и это произойдет лишь в том случае, если вы запомните все из моей книжки. В следующей главе я попытаюсь навести у нас в головах еще больший порядок. Я расскажу о том, как люди пытаются объединить друг с другом те отдельные теории, о которых я рассказал, стараясь создать полную единую теорию, которая охватывала бы все, что происходит во Вселенной.

10
Объединение физики

Как уже говорилось в гл. 1, совсем не просто сразу строить полную единую теорию всего, что происходит во Вселенной. Поэтому мы продвигаемся вперед, создавая частные теории, описывающие какую-то ограниченную область событий, и либо пренебрегаем остальными эффектами, либо приближенно заменяем их некоторыми числами. (Например, в химии можно рассчитывать взаимодействия атомов, не зная внутреннего строения атомного ядра.) Но можно надеяться на то, что в конце концов будет найдена полная, непротиворечивая единая теория, в которую все частные теории будут входить в качестве приближений и которую не нужно будет подгонять под эксперимент подбором значений входящих в нее произвольных величин. Работа по созданию такой теории называется объединением физики. Последние годы своей жизни Эйнштейн почти целиком посвятил поискам единой теории, но время для этого тогда еще не пришло: существовали частные теории гравитации и электромагнитных взаимодействий, но о ядерных силах было мало что известно. К тому же Эйнштейн отказывался верить в реальность квантовой механики, несмотря на ту огромную роль, которую он сам сыграл в ее развитии. Но принцип неопределенности является, по-видимому, фундаментальным

свойством Вселенной, в которой мы живем. Поэтому он обязательно должен быть составной частью правильной единой теории.

Дальше я покажу, что надежды на построение такой теории сильно возросли, ибо мы сейчас значительно больше узнали о Вселенной. Но не нужно быть чересчур уверенным — мы уже не раз сталкивались с миражами! Например, в начале века считалось, что все можно объяснить с помощью свойств, характеризующих непрерывное вещество, скажем, таких, как упругость и теплопроводность. Открытие строения атома и принципа неопределенности навсегда покончило с подобным подходом. Затем в 1928 г. физик, лауреат Нобелевской премии Макс Борн, выступая перед гостями Гёттингенского университета, сказал: «Физика в том смысле, в котором мы ее понимаем, через полгода кончится». В своей уверенности Борн основывался на недавно открытом Дираком уравнении для электрона. Все думали, что аналогичное уравнение должно существовать и для протона — второй из двух известных тогда частиц, — и тогда теоретическая физика кончится. Но открытие нейтрона и ядерных сил развеяло и эти предсказания. И все же я уверен, что сейчас есть основания для осторожного оптимизма: мы, пожалуй, близки к завершению поисков окончательных законов природы.

В предыдущих главах я говорил об общей теории относительности, которая представляет собой частную теорию гравитации, и о частных теориях, описывающих слабые, сильные и электромагнитные взаимодействия. Последние три теории могут быть объединены в так называемые теории великого объединения, которые нельзя считать достаточно удовлетворительными,

потому что они не включают гравитацию и содержат величины, например относительные массы разных частиц, которые не вычисляются теоретически и должны подбираться из условия наилучшего согласия с экспериментом. Основная трудность построения теории, которая объединяла бы гравитацию с остальными силами, связана с тем, что общая теория относительности представляет собой классическую теорию, т. е. не включает в себя квантово-механический принцип неопределенности. Другие же частные теории существенно связаны с квантовой механикой. Поэтому прежде всего общую теорию относительности необходимо объединить с принципом неопределенности. Мы знаем, что результатом такого объединения станет ряд удивительных следствий: черные дыры перестанут быть черными, а из Вселенной исчезнут сингулярности, и она станет полностью замкнутой и не имеющей границ. Но, как уже объяснялось в гл. 7, здесь возникают затруднения, связанные с тем, что в силу принципа неопределенности даже пустое пространство заполнено парами виртуальных частиц и античастиц. Эти пары обладают бесконечной энергией, а потому в соответствии со знаменитым уравнением Эйнштейна $E = mc^2$ их масса тоже должна быть бесконечна. Следовательно, под действием создаваемого ими гравитационного притяжения Вселенная должна, искривляясь, сворачиваться до бесконечно малых размеров.

Такие же нелепые бесконечности возникают и в других частных теориях, но их всегда можно устранить с помощью процедуры, которая называется перенормировкой. Метод перенормировок предписывает введение новых бесконечностей для компенсации

старых. Несмотря на свою неполную математическую обоснованность, этот метод успешно применяется, и полученные с его помощью предсказания частных теорий чрезвычайно точно согласуются с результатами наблюдений. Однако в плане поиска завершенной теории метод перенормировок обладает одним серьезным недостатком: он не позволяет теоретически предсказать действительные значения масс и сил; их приходится подбирать путем подгонки к эксперименту.

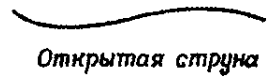
При попытках включить принцип неопределенности в общую теорию относительности имеются только два числа, которые можно подгонять: величина гравитационной силы и космологическая постоянная. Но их изменением невозможно устранить все бесконечности. Значит, мы имеем теорию, согласно которой некоторые величины, например кривизна пространства-времени, должны быть бесконечными, несмотря на то что эти величины можно наблюдать, и из измерений вытекает, что они конечны! Эта проблема, возникающая при объединении общей теории относительности с принципом неопределенности, какое-то время считалась сомнительной, но в конце концов ее реальность была, наконец, подтверждена детальными расчетами в 1972 г. Через четыре года появилось одно из возможных ее решений, названное теорией супергравитации. Суть этой теории в том, что гравитон (частица со спином 2, являющаяся переносчиком гравитационного взаимодействия) объединяется с некоторыми новыми частицами, имеющими спины 3/2, 1, 1/2 и 0. Тогда все эти частицы в каком-то смысле можно рассматривать как разные виды одной и той же «суперчастицы», осуществив

таким образом объединение частиц материи, имеющих спины 1/2 и 3/2, с частицами — переносчиками взаимодействия, спины которых равны 0, 1 и 2. Виртуальные пары частица—античастица со спином 1/2 и 3/2 обладают при этом отрицательной энергией, компенсирующей положительную энергию виртуальных пар со спином 2, 1, 0. В результате многие бесконечности будут устранены, но есть подозрения, что какая-то их часть может все же остаться. Однако выяснение того, все ли бесконечности устранены, требовало столь громоздких и сложных расчетов, что ими никто не собирался заниматься. Оценки показали, что даже с помощью компьютера работа заняла бы никак не меньше четырех лет, и при этом очень велика вероятность хоть раз ошибиться. Следовательно, в ответе можно быть уверенным лишь в том случае, если кто-нибудь другой повторил бы все вычисления и получил тот же результат, а на это трудно рассчитывать.

Несмотря на все эти проблемы и на то, что частицы в теориях супергравитации, по-видимому, отличались от наблюдаемых частиц, большинство ученых считало, что супергравитация может привести к правильному решению задачи об объединении физики. Но в 1984 г. общее ученое мнение сильнейшим образом изменилось в сторону так называемых струйных теорий. Основными объектами струнных теорий выступают не частицы, занимающие всего лишь точку в пространстве, а некие структуры вроде бесконечно тонких кусочков струны, не имеющих никаких измерений, кроме длины. Концы этих струн могут быть либо свободны (так называемые открытые струи), либо соединены друг с другом (замкнутые струи)

(рис. 10.1 и 10.2). Частица в каждый момент времени представляется одной точкой в пространстве. Следовательно, ее историю можно изобразить линией в пространстве-времени (мировая линия). Но струне в каждый момент времени отвечает линия в трехмерном пространстве. Следовательно, ее история в пространстве-времени изображается двумерной поверхностью, которая называется «мировым листом». (Любую точку на таком мировом листе можно задать двумя числами, одно из которых — время, а другое — положение точки на струне.) Мировой лист открытой струны представляет собой полосу, края которой отвечают путям концов струны в пространстве-времени (рис. 10.1). Мировой лист замкнутой струны — это цилиндр или трубка (рис. 10.2), сечением которой является окружность, отвечающая положению струны в определенный момент времени.

Два куска струны могут соединиться в одну струну; в случае открытых струн они просто смыкаются концами (рис. 10.3), а соединение замкнутых струн напоминает соединение двух штанин в брюках (рис. 10.4). Аналогичным образом кусок струны может разорваться на две струны. То, что раньше считалось частицами, в струнных теориях изображается в виде волн, бегущих по струне так же, как бегут волны по натянутой веревке, если ее дернуть за конец. Испускание и поглощение одной частицы другой отвечает соединению и разделению струн. Например, гравитационная сила, с которой Солнце действует на Землю, в теориях частиц изображалась как результат испускания какой-нибудь частицей на Солнце гравитона и последующего его поглощения какой-нибудь частицей на Земле (рис. 10.5). В теории струн

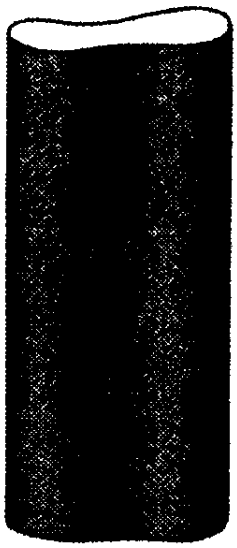






Мировой лист открытой струны

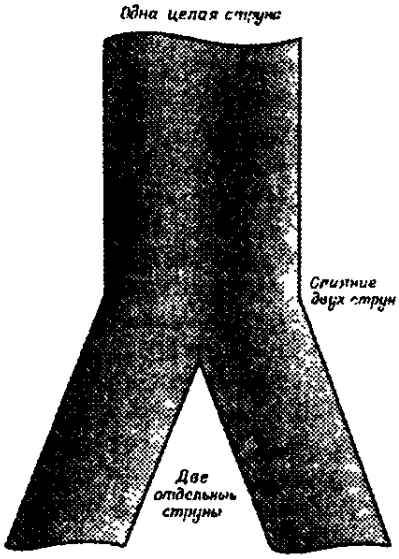




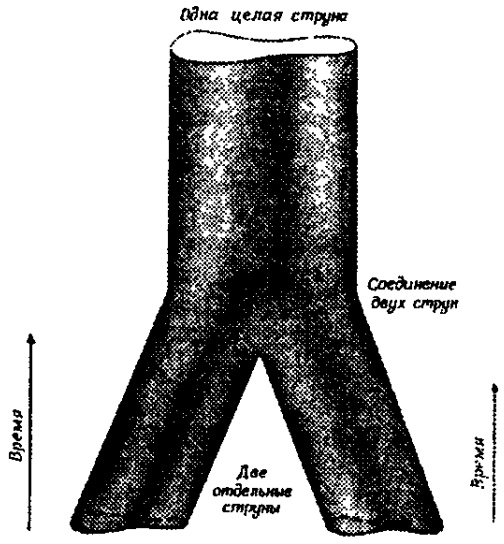
Мировой лист замкнутой струны

Рис. 10.1

Рис. 10.2



Мировой лист двух открытых струн, соединяющихся друг с другом



Мировой лист двух замкнутых струн, соединяющихся друг с другом

Рис. 10.3

Рис. 10.4



Рис. 10.5

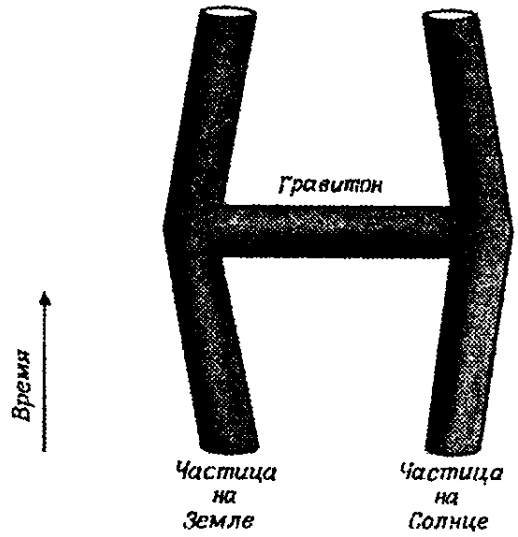


Рис. 10.6

этот процесс изображается Н-образным соединением трубок (рис. 10.6). (Теория струн в каком-то смысле подобна технике водопроводчика.) Две вертикальные стороны соответствуют частицам, находящимся на Солнце и на Земле, а горизонтальная поперечина отвечает летящему между ними гравитону.

Теория струн имеет очень необычную историю. Она возникла в конце шестидесятых годов при попытках построить теорию сильных взаимодействий. Идея была в том, чтобы частицы типа протона и нейтрона рассматривать как волны, распространяющиеся по струне. Тогда сильные силы, действующие между частицами, соответствуют отрезкам струн, соединяющим между собой, как в паутине, другие участки струн. Для того чтобы вычисленная в этой теории сила взаимодействия имела значение, отвечающее эксперименту, струны должны быть эквивалентны резиновым лентам, натянутым с силой около десяти тонн.

В 1974 г. парижанин Джоэль Шерк и Джон Шварц из Калифорнийского технологического института

опубликовали работу, в которой было показано, что теория струн может описывать гравитационное взаимодействие, но только при значительно большем натяжении струны — порядка тысячи миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов (единица с тридцатью девятью нулями) тонн. В обычных масштабах предсказания такой струнной модели и общей теории относительности совпадали, но начинали различаться на очень малых расстояниях, меньших одной тысяча миллион миллион миллион миллионной доли сантиметра (один сантиметр, деленный на единицу с тридцатью тремя нулями). Однако эта работа не привлекла особенного внимания, потому что как раз в то время многие отказались от первоначальной струнной теории сильного взаимодействия, обратившись к теории кварков и глюонов, результаты которой значительно лучше согласовались с экспериментом. Шерк трагически умер (у него был диабет, и во время комы рядом не оказалось никого, кто бы сделал ему укол инсулина), и Шварц остался почти единственным сторонником струнной теории, но со значительно более сильным натяжением струн.

В 1984 г. интерес к струнам неожиданно возродился. На то было, по-видимому, две причины. Во-первых, никто не мог ничего добиться, пытаясь показать, что супергравитация конечна или что с ее помощью можно объяснить существование всех разнообразных частиц, которые мы наблюдаем. Второй причиной была публикация статьи Джона Шварца и Майка Грина из Лондонского Куин-Мэри-колледжа, в которой было показано, что с помощью теории струн можно объяснить существование частиц с левой

спиральностью, как у некоторых из тех частиц, что мы наблюдаем. Какими бы ни были побудительные мотивы, вскоре очень многие обратились к теории струн, в результате чего появилась ее новая разновидность — теория так называемой гетеротической струны, которая дает надежду на объяснение разнообразия видов наблюдаемых частиц.

В теориях струн тоже возникают бесконечности, но есть надежда, что в тех или иных теориях гетеротической струны эти бесконечности сократятся (хотя пока это еще не известно). Но струнные теории содержат значительно более серьезную трудность: они непротиворечивы, по-видимому, лишь в десяти- или двадцатишестимерном пространстве-времени, а не в обычном четырехмерном! Лишние измерения — это обычное дело в научной фантастике; там без них и в самом деле почти невозможно обойтись, потому что иначе, из-за того что, согласно теории относительности, нельзя двигаться быстрее света, путешествия среди звезд и галактик происходили бы немыслимо долго. Идея научной фантастики заключается в том, что можно как-то сократить путь, пройдя через лишнее измерение. Эту мысль можно следующим образом пояснить на рисунке. Представьте себе, что пространство, в котором мы живем, имеет только два измерения и искривлено, как поверхность бублика, или тора (рис. 10.7). Если вы находитесь в какой-то точке на внутренней стороне тора и хотите попасть в противоположную точку, вам придется обойти тор по внутреннему кольцу. А если бы вы умели перемещаться в третьем измерении, вы могли бы срезать, пойдя напрямик.

Но почему же мы не замечаем все эти дополнительные измерения, если они действительно существуют?

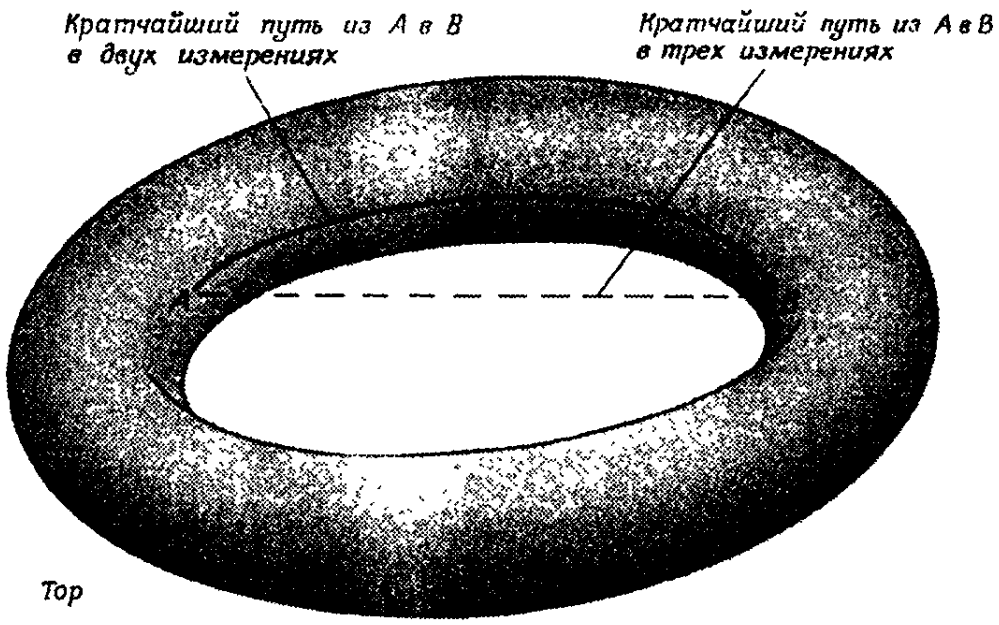


Рис. 10.7

Почему мы видим только три пространственных и одно временное измерение? Возможно, причина кроется в том, что другие измерения свернуты в очень малое пространство размером порядка одной миллион миллион миллион миллион миллионной доли сантиметра. Оно так мало́, что мы его просто не замечаем: мы видим всего лишь одно временное и три пространственных измерения, в которых пространство-время выглядит довольно плоским. То же самое происходит, когда мы смотрим на поверхность апельсина: вблизи она выглядит искривленной и неровной, а издали бугорки не видны и апельсин кажется гладким. Так же и пространство-время: в очень малых масштабах оно десятимерно и сильно искривлено, а в больших масштабах кривизна и дополнительные измерения не видны. Если это представление верно, то оно несет дурные вести будущим покорителям космоса: дополнительные измерения

будут слишком малы для прохода космического корабля. Но возникает и другая серьезная проблема. Почему лишь некоторые, а не все вообще измерения должны свернуться в маленький шарик? На очень ранней стадии все измерения во Вселенной были, по-видимому, очень сильно искривлены. Почему же одно временное и три пространственных измерения развернулись, а все остальные остаются туго свернутыми?

Один из возможных ответов дается антропным принципом. Двух пространственных измерений, по-видимому, недостаточно для того, чтобы могли развиться такие сложные существа, как мы. Живя, например, на одномерной Земле, двумерные животные, чтобы разойтись при встрече, были бы вынуждены перелезать друг через друга. Если бы двумерное существо питалось чем-нибудь таким, что не переваривается до конца, то остатки должны были бы выводиться по тому же пути, по которому входит пища, так как при наличии сквозного прохода через все тело животное оказалось бы разделенным на две отдельные половины, и наше двумерное существо развалилось бы на две части (рис. 10.8). Точно так же трудно представить себе, как у двумерного существа происходила бы циркуляция крови.

Трудности возникали бы и в том случае, если бы число пространственных измерений было больше трех. Гравитационная сила между двумя телами быстрее возрастала бы с расстоянием, чем в трехмерном пространстве. (Когда расстояние удваивается, то в трех измерениях гравитационная сила уменьшается в четыре раза, в четырех измерениях — в восемь раз, в пяти — в шестнадцать раз и т. д.) Это значит, что

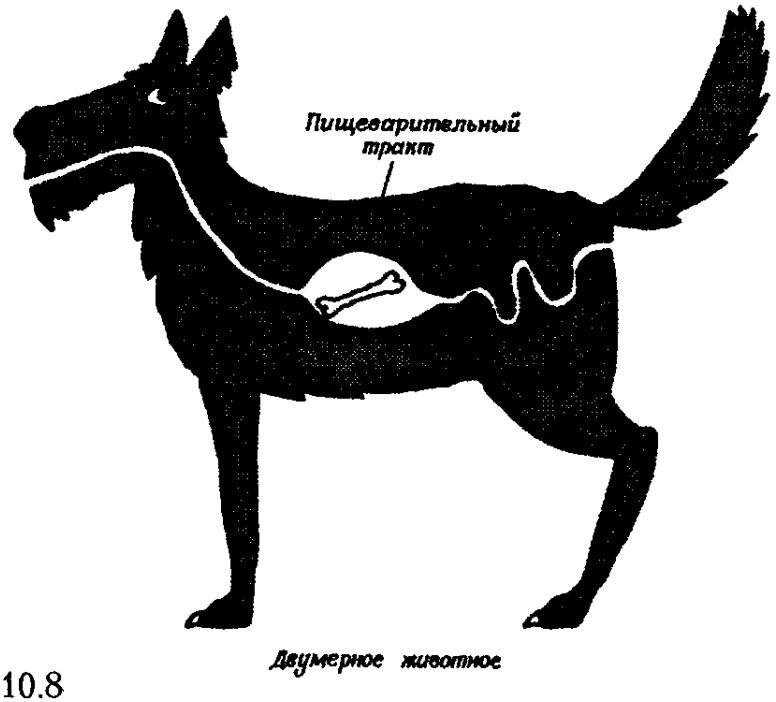


Рис. 10.8

орбиты планет, например, Земли, вращающихся вокруг Солнца, были бы нестабильны: малейшее отклонение от круговой орбиты (возникшее, допустим, из-за гравитационного притяжения других планет) привело бы к тому, что Земля стала бы двигаться по спирали либо от Солнца, либо к Солнцу. Мы бы тогда либо замерзли, либо сгорели. На самом деле, если бы зависимость гравитационной силы от расстояния была одинаковой в пространствах с размерностью выше трех, то Солнце не могло бы существовать в стабильном состоянии, в котором сохраняется равновесие между давлением и гравитацией. Оно либо распалось бы на части, либо, сколлапсировав, превратилось в черную дыру. В обоих случаях от него уже было бы мало пользы как от источника тепла и света для поддержки жизни на Земле. На меньших масштабах электрические силы, под действием которых электроны обращаются в атоме вокруг ядра,

вели бы себя так же, как гравитационные. Следовательно, электроны либо все вместе вылетели бы из атома, либо по спирали упали бы на ядро. В том и другом случае не существовало бы таких атомов, как сейчас.

Тогда, казалось бы, очевидно, что жизнь, по крайней мере так, как мы ее себе представляем, может существовать лишь в таких областях пространства-времени, в которых одно временное и три пространственных измерения не очень сильно искривлены. Это означает, что мы имеем право призвать на помощь слабый антропный принцип, если сможем показать, что струнная теория по крайней мере допускает (а она, по-видимому, действительно допускает) существование во Вселенной областей указанного вида. Вполне могут существовать и другие области Вселенной или другие вселенные (что бы под *этим* ни подразумевалось), в которых либо все измерения сильно искривлены, либо распрямлено больше четырех измерений, но в подобных областях не будет разумных существ, которые могли бы увидеть это разнообразие действующих измерений.

Кроме определения числа измерений, которыми обладает пространство-время, в теории струн есть еще и другие задачи, которые надо решить, прежде чем провозглашать теорию струн окончательной единой теорией физики. Мы пока не знаем, все ли бесконечности компенсируют друг друга, и не умеем точно находить соответствие между волнами на струне и определенными типами частиц, которые мы наблюдаем. Тем не менее ответы на эти вопросы будут, по-видимому, найдены в ближайшие несколько лет, и к концу века мы узнаем, является ли

теория струн той долгожданной единой теорией физики.

Но может ли единая теория реально существовать? Или мы просто гоняемся за миражом? Возможны, по-видимому, три варианта.

1. Полная единая теория действительно существует, и мы ее когда-нибудь откроем, если постараемся.

2. Окончательной теории Вселенной нет, а есть просто бесконечная последовательность теорий, которые дают все более и более точное описание Вселенной.

3. Теории Вселенной не существует: события не могут быть предсказаны далее некоторого предела и происходят произвольным образом и беспорядочно.

В пользу третьего варианта некоторые выдвигают тот довод, что существование полной системы законов ограничило бы свободу Бога, если бы он передумал и решил вмешаться в наш мир. Ситуация сродни старому доброму парадоксу: может ли Бог сотворить такой камень, который Он сам не смог бы поднять. Но мысль о том, что Бог может передумать, — это пример заблуждения, на которое указывал еще Блаженный Августин; оно возникает, если считать Бога существом, живущим во времени; время же — свойство только Вселенной, которая создана Богом. Запуская Вселенную, Бог, вероятно, знал что делает!

С появлением квантовой механики пришло понимание того, что событие невозможно предсказывать абсолютно точно и в любом предсказании всегда содержится некоторая доля неопределенности. При желании эту неопределенность можно было бы отнести на счет вмешательства Бога, но вмешательства, носящего очень странный характер: нет никаких сви-

детельств его хоть какой-нибудь целевой направленности. Разумеется, оказавшись направленным, оно по своему понятию не было бы случайным. В наш век мы практически исключили третий возможный вариант, предопределив цель, стоящую перед наукой: найти систему законов, которые давали бы возможность предсказывать события в пределах точности, устанавливаемой принципом неопределенности.

Вторая возможность, связанная с существованием бесконечной последовательности все более и более точных теорий, пока целиком согласуется с нашим опытом. Во многих случаях мы повышали чувствительность аппаратуры или производили эксперименты нового типа лишь для того, чтобы открыть новые явления, которые еще не были предсказаны существующей теорией, и для их предсказания приходилось создавать новую, более сложную теорию. Поэтому не будет ничего особенно удивительного, если окажется неверным предсказание, сделанное в рамках современных теорий великого объединения, о том, что не должно быть никаких существенно новых явлений в промежутке от значения энергии электрослабого объединения 100 ГэВ до энергии великого объединения, равной примерно тысяче миллионов миллионов гигаэлектронвольт. На самом деле можно ожидать, что будут открыты какие-то новые слои структуры, более элементарные, чем кварки и электроны, которые мы сейчас считаем элементарными.

Но гравитация может, по-видимому, наложить ограничение на эту последовательность вложенных одна в другую «матрешек». Если бы существовала частица, энергия которой превышала бы планковское значение — десять миллионов миллионов миллионов

(единица с девятнадцатью нулями) гигаэлектронвольт, — то ее масса была бы столь сильно сжата, что частица выдавилась бы из Вселенной, образовав черную дыру. Таким образом, последовательность все более точных теорий должна, по-видимому, иметь предел при переходе ко все более и более высоким энергиям, а потому при каких-то энергиях должна существовать окончательная теория Вселенной. Планковская энергия, конечно, отделена пропастью от энергий порядка сотни гигаэлектронвольт — того максимума, который сейчас можно достичь в лаборатории, и с помощью ускорителей вряд ли удастся возвести мост через эту пропасть в обозримом будущем! Но столь высокие энергии могли возникнуть на очень ранних стадиях развития Вселенной. Мне кажется, что изучение ранней Вселенной и требования математической согласованности приведут к созданию полной единой теории, и произойдет это еще при жизни кого-то из нас, ныне живущих, если, конечно, мы до этого сами себя не взорвем.

Что бы это означало, если бы нам действительно удалось открыть окончательную теорию Вселенной? Как уже говорилось в гл. 1, мы никогда не могли бы быть уверенными в том, что найденная теория действительно верна, потому что никакую теорию нельзя доказать. Но если открытая теория была бы математически непротиворечива и ее предсказания всегда совпадали с экспериментом, то мы могли бы не сомневаться в ее правильности. Этим завершилась бы длинная и удивительная глава в истории интеллектуальной борьбы человечества за познание Вселенной. Кроме того, открытие такой теории произвело бы революцию в представлениях обычных людей

о законах, управляющих Вселенной. Во времена Ньютона образованный человек мог, по крайней мере в общих чертах, охватить весь объем знаний, которыми располагало человечество. Но с тех пор развитие науки происходит в таком темпе, что подобный охват стал невозможным. Теории непрерывно видоизменяются для согласования с результатами наблюдений, и никто не занимается переработкой и упрощением теорий для того, чтобы их могли понять неспециалисты. Даже будучи специалистом, можно надеяться понять лишь малую часть научных теорий. Кроме того, развитие идет так быстро, что все, чему учат в школе или университете, всегда немного устарелое. Лишь единицы могут двигаться вперед наравне с быстро растущим объемом информации. Им приходится посвящать этому все свое время и специализироваться лишь в какой-то узкой области Остальные мало что знают о том, чего достигла наука и как это переживают ученые. Если верить Эддингтону, семьдесят лет назад лишь два человека понимали общую теорию относительности. Сейчас ее знают десятки тысяч выпускников университетов, а многие миллионы людей по крайней мере знакомы с лежащей в ее основе идеей. Если бы была открыта полная единая теория, то ее систематизация и упрощение, а потом и преподавание в школе, по крайней мере в общих чертах, оказались бы просто делом времени. Тогда все смогли бы получить некоторое представление о законах, управляющих Вселенной и ответственных за наше существование.

Если нам действительно удастся открыть полную единую теорию, то это не будет означать, что мы сможем предсказывать события вообще. На то есть две

причины. Во-первых, наши предсказательные возможности ограничены квантово-механическим принципом неопределенности, и с этим ничего не поделаешь. Правда, на практике второе ограничение сильнее первого. Второе ограничение связано с тем, что, если не считать очень простых случаев, мы не умеем находить точные решения уравнений, описывающих теорию. (Мы не в состоянии точно решить даже уравнения движения трех тел в ньютоновской теории гравитации, а с ростом числа тел и усложнением теории трудности еще более увеличиваются.) Мы уже знаем те законы, которым подчиняется поведение вещества во всех условиях, кроме экстремальных. В частности, мы знаем самые важные законы, лежащие в основе химии и биологии. Тем не менее мы, конечно же, не причисляем эти науки к решенным проблемам; мы пока не добились почти никаких успехов в предсказании поведения человека на основе математических уравнений! Таким образом, если мы и найдем полную систему основных законов, перед нами на много лет вперед будет стоять вызовом нашему интеллекту задача разработки новых приближенных методов, с помощью которых мы могли бы успешно предсказывать возможные результаты в реальных сложных ситуациях. Полная, непротиворечивая единая теория — это лишь первый шаг: наша цель — полное *понимание* всего происходящего вокруг нас и нашего собственного существования.

11
Заключение

Мы живем в удивительном мире. Нам хочется понять то, что мы видим вокруг, и спросить: каково происхождение Вселенной? какое место в ней занимаем мы, и откуда мы и она — все это взялось? почему все происходит именно так, а не иначе?

Для ответа на эти вопросы мы принимаем некую картину мира. Такой картиной может быть как башня из стоящих друг на друге черепах, несущих на себе плоскую Землю, так и теория суперструн. Обе они являются теориями Вселенной, но вторая значительно математичнее и точнее первой. Ни одна из этих теорий не подтверждена наблюдениями: никто никогда не видел гигантскую черепаху с нашей Землей на спине, но ведь и суперструну никто никогда не видел. Однако модель черепах нельзя назвать хорошей научной теорией, потому что она предсказывает возможность выпадения людей через край мира. Такая возможность не подтверждена экспериментально, разве что она окажется причиной предполагаемого исчезновения людей в Бермудском треугольнике!

Самые первые попытки описания и объяснения Вселенной были основаны на представлении, что событиями и явлениями природы управляют ду́хи, наделенные человеческими эмоциями и действующие совершенно как люди и абсолютно непредсказуемо.

Эти духи населяли такие природные объекты, как реки, горы и небесные тела, например, Солнце и Луну. Полагалось задабривать их и добиваться их расположения, чтобы обеспечить плодородие почвы и смену времен года. Но постепенно люди должны были подметить определенные закономерности: Солнце всегда вставало на востоке и садилось на западе независимо от того, была или не была принесена жертва богу Солнца. Солнце, Луна и планеты ходили по небу вдоль совершенно определенных путей, которые можно было предсказать наперед с хорошей точностью. Солнце и Луна все же могли оказаться богами, но богами, которые подчиняются строгим, по-видимому, не допускающим исключений законам, если, конечно, отвлечься от россказней вроде легенды о том, как ради Иисуса Навина остановилось Солнце.

Сначала закономерности и законы были обнаружены только в астрономии и еще в считанных случаях. Но по мере развития цивилизации, и особенно за последние триста лет, открывались все новые и новые закономерности и законы. Успешное применение этих законов в начале XIX в. привело Лапласа к доктрине научного детерминизма. Ее суть в том, что должна существовать система законов, точно определяющих, как будет развиваться Вселенная, по ее состоянию в один какой-нибудь момент времени.

Лапласовский детерминизм был неполным по двум причинам. В нем ничего не говорилось о том, как следует выбирать законы, и никак не определялось начальное состояние Вселенной. И то и другое предоставлялось решать Богу. Бог должен был решить, каким быть началу Вселенной и каким законам ей подчиняться, но с возникновением Вселенной его вмешательство

прекратилось. Практически Богу были оставлены лишь те области, которые были непонятны науке XIX в.

Сейчас мы знаем, что мечты Лапласа о детерминизме нереальны, по крайней мере в том виде, как это понимал Лаплас. В силу квантово-механического принципа неопределенности некоторые пары величин, например, положение частицы и ее скорость, нельзя одновременно абсолютно точно предсказать.

Квантовая механика в подобных ситуациях обращается к целому классу квантовых теорий, в которых частицы не имеют точно определенных положений и скоростей, а представляются в виде волн. Такие квантовые теории являются детерминистскими в том смысле, что они указывают закон изменения волн со временем. Поэтому, зная характеристики волны в один момент времени, мы можем рассчитать, какими они станут в любой другой момент времени. Элемент непредсказуемости и случайности возникает лишь при попытках интерпретации волны на основе представлений о положении и скорости частиц. Но в этом-то, возможно, и заключается наша ошибка: может быть, нет ни положений, ни скоростей частиц, а существуют одни только волны. И ошибка именно в том, что мы пытаемся втиснуть понятие волны в наши заскорузлые представления о положениях и скоростях, а возникающее несоответствие и есть причина кажущейся непредсказуемости.

И вот мы поставили иную задачу перед наукой: найти законы, которые позволяли бы предсказывать события с точностью, допускаемой принципом неопределенности. Однако все равно остается без ответа вопрос: как и почему производился выбор законов и начального состояния Вселенной?

В этой книге я особо выделил законы, которым подчиняется гравитация, потому что, хотя гравитационные силы самые слабые из существующих четырех типов сил, именно под действием гравитации формируется крупномасштабная структура Вселенной. Законы гравитации были несовместимы с еще недавно бытовавшей точкой зрения, что Вселенная не изменяется со временем: из того, что гравитационные силы всегда являются силами притяжения, вытекает, что Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. Согласно общей теории относительности, в прошлом должно было существовать состояние с бесконечной плотностью — большой взрыв, который и стал эффективно началом отсчета времени. Аналогичным образом, если вся Вселенная испытает повторный коллапс, то в будущем должно обнаружиться еще одно состояние с бесконечной плотностью — большой хлопок, который станет концом течения времени. Даже если вторичный коллапс Вселенной не произойдет, во всех локализованных областях, из которых в результате коллапса образовались черные дыры, все равно возникнут сингулярности. Эти сингулярности будут концом времени для любого, кто упадет в черную дыру. В точке большого взрыва и в других сингулярностях нарушаются все законы, а поэтому за Богом сохраняется полная свобода в выборе того, что происходило в сингулярностях и каким было начало Вселенной.

При объединении квантовой механики с общей теорией относительности возникает, по-видимому, новая, доселе неизвестная возможность: пространство и время могут вместе образовать конечное четырехмерное пространство, не имеющее сингулярностей

и границ и напоминающее поверхность Земли, но с бóльшим числом измерений. С помощью такого подхода удалось бы, наверное, объяснить многие из наблюдаемых свойств Вселенной, например, ее однородность в больших масштабах и одновременно отклонения от однородности, наблюдаемые в меньших масштабах, такие, как галактики, звезды и даже человеческие существа. С помощью этого подхода можно было бы объяснить даже существование наблюдаемой нами стрелы времени. Но если Вселенная полностью замкнута и не имеет ни сингулярностей, ни границ, то отсюда вытекают очень серьезные выводы о роли Бога как Создателя.

Однажды Эйнштейн задал вопрос: «Какой выбор был у Бога, когда он создавал Вселенную?» Если верно предположение об отсутствии границ, то у Бога вообще не было никакой свободы выбора начальных условий. Разумеется, у него еще оставалась свобода выбора законов, которым подчиняется Вселенная. Но их на самом деле не так уж много; существует, возможно, всего одна или несколько полных единых теорий, например, теория гетеротической струны, которые были бы непротиворечивы и допускали существование таких сложных структур, как человеческие существа, способных исследовать законы Вселенной и задавать вопросы о сущности Бога.

Даже если возможна всего одна единая теория — это просто набор правил и уравнений. Но что вдыхает жизнь в эти уравнения и создает Вселенную, которую они могли бы описывать? Обычный путь науки — построение математической модели — не может привести к ответу на вопрос о том, почему должна существовать Вселенная, которую будет описывать постро-

енная модель. Почему Вселенная идет на все хлопоты существования? Неужели единая теория так всесильна, что сама является причиной своей реализации? Или ей нужен создатель, а если нужен, то оказывает ли он еще какое-нибудь воздействие на Вселенную? И кто создал его?

Пока большинство ученых слишком заняты развитием новых теорий, описывающих, *что* есть Вселенная, и им некогда спросить себя, *почему* она есть. Философы же, чья работа в том и состоит, чтобы задавать вопрос «почему», не могут угнаться за развитием научных теорий. В XVIII в. философы считали все человеческое знание, в том числе и науку, полем своей деятельности и занимались обсуждением вопросов типа: было ли у Вселенной начало? Но расчеты и математический аппарат науки XIX и XX вв. стали слишком сложны для философов и вообще для всех, кроме специалистов. Философы настолько сузили круг своих запросов, что самый известный философ нашего века Виттгенштейн по этому поводу сказал: «Единственное, что еще остается философии, — это анализ языка». Какое унижение для философии с ее великими традициями от Аристотеля до Канта!

Но если мы действительно откроем полную теорию, то со временем ее основные принципы станут доступны пониманию каждого, а не только нескольким специалистам. И тогда все мы, философы, ученые и просто обычные люди, сможем принять участие в дискуссии о том, почему так произошло, что существуем мы и существует Вселенная. И если будет найден ответ на такой вопрос, это будет полным триумфом человеческого разума, ибо тогда нам станет понятен замысел Бога.

Альберт Эйнштейн

Как был связан Эйнштейн с политикой, основанной на ядерном оружии, хорошо известно: он подписал знаменитое письмо к президенту Рузвельту, которое заставило Соединенные Штаты серьезно оценить положение, а после войны он включился в движение за предотвращение ядерной войны. Это не было отдельными эпизодами в жизни ученого, втянутого в политику. Жизнь Эйнштейна, по его собственным словам, «делилась между политикой и уравнениями».

Ранняя политическая активность Эйнштейна возникла еще во время Первой мировой войны, когда он был профессором в Берлине. Убитый тем, что он считал напрасной потерей человеческих жизней, он примкнул к антивоенным демонстрациям. Его выступления в защиту гражданского неповиновения и публичное одобрение тех, кто отказывался от службы в армии, не могли снискать ему популярности среди коллег. После войны Эйнштейн направил свои усилия на примирение сторон и улучшение международных отношений. Такого рода деятельность тоже не способствовала популярности Эйнштейна и через некоторое время привела к тому, что ему стало трудно посещать Соединенные Штаты даже для чтений лекций.

Вторым важнейшим делом в жизни Эйнштейна был сионизм[1]. Будучи сам евреем по происхождению, Эйнштейн отрицал библейскую идею Бога. Но нарастающая волна антисемитизма как перед Первой мировой войной, так и после нее постепенно привела Эйнштейна к отождествлению себя с еврейской общиной, и он превратился в полного сторонника сионизма. В который раз падение популярности не остановило Эйнштейна перед открытым высказыванием своих взглядов. Его теории преследовались; возникла даже антиэйнштейновская организация. Один человек был предан суду за подстрекательство к убийству Эйнштейна (и оштрафован всего на шесть долларов). Но Эйнштейн сохранял спокойствие, а когда вышла книга «Сто авторов против Эйнштейна», он заметил: «Хватило бы и одного, если я был бы неправ!»

В 1933 г. к власти пришел Гитлер. Эйнштейн, который был в это время в Америке, заявил, что не вернется в Германию. Когда нацистские войска окружили его дом, а его банковский счет был конфискован, в одной из берлинских газет появился заголовок: «Хорошие новости — Эйнштейн не вернется». Перед лицом нацистской угрозы Эйнштейн отошел от пацифизма и в конце концов, опасаясь того, что немецкие ученые создадут атомную бомбу, предложил Соединенным Штатам разрабатывать свою собственную бомбу. Но еще до взрыва первой атомной бомбы он публично предупреждал об опасностях ядерной вой-

---

[1] В то время это означало борьбу за государственное объединение евреев, поддержанное ООН, и в частности СССР — *Прим. ред.*

ны и предлагал создать международный контроль за ядерными вооружениями.

На протяжении всей жизни Эйнштейна его миротворческие усилия не давали, по-видимому, прочных результатов и уж во всяком случае не прибавляли ему друзей. Однако публичные выступления Эйнштейна в защиту сионизма были по достоинству оценены в 1952 г., когда ему было предложено стать президентом Израиля. Эйнштейн отказался, заявив, что, по его мнению, он слишком наивен в политике. Но действительной причиной отказа, наверное, была другая. Процитируем его еще раз: «Для меня важнее уравнения, потому что политика нужна настоящему, а уравнения — это для вечности».

Галилео Галилей

Галилей, пожалуй, больше, чем кто-либо другой из отдельных людей, ответствен за рождение современной науки. Знаменитый спор с Католической Церковью занимал центральное место в философии Галилея, ибо он одним из первых объявил, что у человека есть надежда понять, как устроен мир, и, более того, что этого можно добиться, наблюдая наш реальный мир.

Галилей с самого начала верил в теорию Коперника (о том, что планеты обращаются вокруг Солнца), но начал ее публично поддерживать лишь тогда, когда нашел ее подтверждения. Работы, посвященные теории Коперника, Галилей писал по-итальянски (а не на принятой академической латыни), и вскоре его представления распространились далеко за пределы университетов. Это не понравилось приверженцам учения Аристотеля, которые объединились против Галилея, пытаясь заставить Католическую Церковь предать анафеме учение Коперника.

Взволнованный происходящим, Галилей отправился в Рим, чтобы посоветоваться с церковными авторитетами. Он заявил, что в цели Библии не входит какое бы то ни было освещение научных теорий и что надо принимать за аллегорию те места в Биб-

лии, которые вступают в противоречие со здравым смыслом. Но, боясь скандала, который мог помешать ее борьбе с протестантами, Церковь перешла к репрессивным мерам. В 1616 г. учение Коперника было провозглашено «ложным и ошибочным», а Галилею было навеки запрещено выступать в защиту или придерживаться этой доктрины. Галилей сдался.

В 1623 г. один из старых друзей Галилея стал Римским Папой. Галилей сразу начал добиваться отмены указа 1616 г. Он потерпел неудачу, но зато сумел получить разрешение написать книгу, обсуждающую как теорию Аристотеля, так и теорию Коперника. Ему было поставлено два условия: он не имел права принимать ни одну из сторон и должен был сделать вывод, что человек никогда не сможет узнать, как устроен мир, потому что Бог умеет вызывать одни и те же эффекты способами, не доступными воображению человека, который не может налагать ограничения на всемогущество Бога

Книга Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира» была завершена и издана в 1632 г. при полном одобрении цензуры и была сразу же отмечена по всей Европе как литературный и философский шедевр. Вскоре, однако, Папа понял, что эта книга воспринимается как убедительная поддержка теории Коперника, и пожалел, что разрешил ее издать. Папа заявил, что, несмотря на официальное благословение цензуры, Галилей все же нарушил указ 1616 г. Галилей предстал перед судом инквизиции и был приговорен к пожизненному домашнему аресту и публичному отречению от учения Коперника. Галилею пришлось покориться опять.

Оставаясь преданным католиком, Галилей не поколебался в своей вере в независимость науки. За четыре года до смерти, в 1642 г., находясь все еще под домашним арестом, он тайно переправил в голландское издательство рукопись своей второй крупной книги «Две новые науки». Именно эта работа, в большей степени, чем его поддержка Коперника, дала рождение современной науке.

Исаак Ньютон

Исаака Ньютона нельзя назвать симпатичным человеком. Широкую известность получили его плохие отношения с другими учеными, и последние годы своей жизни он провел в основном в резких спорах. После издания книги «Математические начала», оказавшейся, безусловно, самой влиятельной из всех когда-либо написанных книг по физике, Ньютон быстро приобрел общественное положение. Он был назначен президентом Королевского общества и стал первым ученым, посвященным в рыцарское звание.

Вскоре Ньютон поссорился с королевским астрономом Джоном Флэмстидом, который раньше снабжал Ньютона данными для «Математических начал», а теперь задерживал информацию, которая требовалась Ньютону. Ньютон не потерпел такого положения и сам включил себя в руководство королевской обсерватории, а затем начал добиваться немедленной публикации результатов. В конце концов ему удалось заполучить работу Флэмстида и договориться о ее издании со смертельным врагом Флэмстида Эдмондом Галлеем. Однако Флэмстид передал дело в суд, и суд успел принять решение в его пользу, запретив распространение украденной работы. Ньютона разозлило такое решение, и, чтобы отомстить Флэмстиду, он систематически снимал

в более поздних изданиях «Начал» все ссылки на работы Флэмстида.

Более серьезный спор разгорелся у Ньютона с немецким философом Готтфридом Лейбницем. Лейбниц и Ньютон независимо друг от друга развили область математики, называемую дифференциальным исчислением, составляющую основу большей части современной физики. Хотя, как мы теперь знаем, Ньютон открыл это исчисление на несколько лет раньше Лейбница, свою работу он опубликовал значительно позже. Возник грандиозный спор по поводу того, кто же был первым. Ученые рьяно защищали обоих соперников. Замечательно, что почти все статьи в защиту Ньютона были написаны им самим и лишь опубликованы под именами его друзей! Спор разгорался, и тут Лейбниц совершил ошибку, обратившись в Королевское общество с просьбой разрешить противоречие. Ньютон, будучи президентом общества, назначил для разбора дела «незаинтересованную» комиссию, «случайно» составленную целиком из друзей Ньютона! Но это было еще не все: затем Ньютон сам написал отчет комиссии и заставил общество его опубликовать, официально обвинив таким образом Лейбница в плагиате. Все еще не чувствуя себя удовлетворенным, Ньютон анонимно опубликовал сжатый пересказ этого отчета в газете Королевского общества. Говорят, что после смерти Лейбница Ньютон заявил, что он получил большое удовлетворение от того, что ему удалось «разбить сердце Лейбница».

Пока шли оба диспута, Ньютон покинул и Кембридж, и кафедру. Он принимал активное участие в антикатолическом движении сначала в Кембридж-

ском университете, а затем в парламенте и был вознагражден за это назначением на доходную должность хранителя Королевского монетного двора. Здесь он нашел более социально оправданное применение своему коварству и желчности, успешно проведя широкомасштабную кампанию по борьбе с фальшивомонетчиками и даже отправив нескольких человек на виселицу.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Абсолютный нуль температуры — самое низкое из всех возможных значений температуры. При абсолютном нуле вещество не обладает тепловой энергией.

Аннигиляция — процесс, при котором частица и ее античастица, сталкиваясь, взаимно уничтожают друг друга.

Античастица — у каждой частицы материи есть соответствующая античастица. При соударении частицы и античастицы происходит их аннигиляция, в результате которой выделяется энергия и рождаются другие частицы.

Антропный принцип — мы видим Вселенную такой, как она есть, потому что, будь она другой, нас бы здесь не было и мы бы не могли ее наблюдать.

Атом — наименьшая частица обычного вещества Атом состоит из крошечного ядра (составленного из протонов и нейтронов) и обращающихся вокруг него электронов.

Белый карлик — стабильная холодная звезда, находящаяся в равновесии благодаря тому, что в силу принципа исключения Паули между электронами действуют силы отталкивания.

Большой взрыв — сингулярность в момент возникновения Вселенной

Большой хлопóк — сингулярность в конечной точке существования Вселенной

Вес — сила, с которой на тело действует гравитационное поле Вес тела пропорционален массе тела, но не совпадает с ней.

Виртуальная частица — в квантовой механике — частица, которую невозможно зарегистрировать непосредственно, но существование которой подтверждается эффектами, поддающимися измерению.

Гамма- (γ-)излучение — электромагнитное излучение с очень малой длиной волны, испускаемое при радиоактивном распаде или при соударениях элементарных частиц.

Геодезическая — самый короткий (или самый длинный) путь между двумя точками.

Голая сингулярность — сингулярность в пространстве-времени, не находящаяся внутри черной дыры.

Горизонт событий — граница черной дыры.

Гравитационное взаимодействие — самое слабое из четырех фундаментальных взаимодействий, обладающее большим радиусом действия. В гравитационном взаимодействии участвуют все частицы материи.

Длина волны — расстояние между двумя соседними гребнями волны или между двумя ее соседними впадинами.

Закон сохранения энергии — закон науки, согласно которому энергия (или ее массовый эквивалент) не может ни создаваться, ни уничтожаться.

Квант — минимальная порция, которой измеряется испускание или поглощение волн.

Квантовая механика — теория, разработанная на основе квантово-механического принципа Планка и принципа неопределенности Гейзенберга

Квантово-механический принцип Планка (закон излучения Планка) — состоит в том, что свет (или любые другие классические волны) может испускаться или поглощаться только дискретными порциями — квантами — с энергией, пропорциональной их частоте.

Кварк — элементарная (заряженная) частица, участвующая в сильном взаимодействии. Протоны и нейтроны состоят каждый из трех кварков.

Конфайнмент — невылетание, удержание цветных кварков и глюонов внутри адронов.

Координаты — числа, определяющие положение точки в пространстве и во времени.

Космическая цензура — предположение о недопустимости голых сингулярностей.

Космологическая постоянная — математическая вспомогательная величина, введенная Эйнштейном для того, чтобы пространство-время приобрело тенденцию к расширению.

Космология — наука, занимающаяся изучением Вселенной как целого.

Красное смещение — вызванное эффектом Доплера покраснение света, испускаемого удаляющейся от нас звездой.

Магнитное поле — поле, создающее магнитные силы. Сейчас магнитное поле и электрическое поле объединяются в электромагнитное поле.

Масса — количество вещества, содержащееся в теле. Мера инерции тела или степень его сопротивления ускорению.

Мнимое время — время, измеряемое в мнимых единицах.

Нейтрино — легчайшая (возможно, безмассовая) элементарная частица вещества, участвующая только в слабых и гравитационных взаимодействиях.

Нейтрон — незаряженная частица, очень близкая по свойствам к протону. Нейтроны составляют более половины частиц, входящих в состав большинства атомных ядер.

Нейтронная звезда — холодная звезда, существующая вследствие отталкивания нейтронов, обусловленного принципом Паули.

Общая теория относительности — созданная Эйнштейном теория, в основе которой лежит предположение о том, что

законы науки должны быть одинаковы для всех наблюдателей независимо от того, как движутся эти наблюдатели. В ОТО существование гравитационного взаимодействия объясняется искривлением четырехмерного пространства-времени.

Первичная черная дыра — черная дыра, возникшая на очень ранней стадии развития Вселенной.

Позитрон — античастица (положительно заряженная) электрона.

Поле — нечто, существующее во всех точках пространства и времени, в отличие от частицы, которая существует только в одной точке в каждый момент времени.

Предел Чандрасекара — максимально возможная масса стабильной холодной звезды, выше которой звезда должна сколлапсировать в черную дыру.

Принцип исключения Паули — две одинаковые частицы со спином 1/2 не могут (в пределах, которые даются принципом неопределенности) обладать одновременно и одинаковыми положениями в пространстве, и разными скоростями.

Пропорциональность — утверждение «*X* пропорционально *Y*» означает, что при умножении *Y* на какое-нибудь число *X* умножается на это же число. Утверждение «*X* обратно пропорционально *Y*» означает, что при умножении *Y* на какое-нибудь число *X* делится на это же число.

Пространственное измерение — любое из трех пространственно-подобных измерений пространства-времени, т. е. любое измерение, кроме временно́го.

Пространство-время — четырехмерное пространство, точки которого отвечают событиям.

Протон — положительно заряженная частица. Протоны образуют примерно половину всех частиц, входящих в состав ядер большинства атомов.

Радиоактивиость — самопроизвольное превращение одного атомного ядра в другое.

Световая секунда (световой год) — расстояние, проходимое светом за одну секунду (за один год).

Световой конус — поверхность в пространстве-времени, которая ограничивает возможные направления световых лучей, проходящих через данное событие.

Сильиое взаимодействие — самое сильное и самое короткодействующее из четырех фундаментальных взаимодействий. Благодаря сильному взаимодействию кварки удержнваются внутри протонов и нейтронов, а протоны и нейтроны, собравшись вместе, образуют атомные ядра.

Сиигулярность — точка пространства-времени, в которой кривизна его становится бесконечной.

Слабое взаимодействие — второе по слабости из четырех известных взааимодействий. Обладает очень коротким радиусом действия. В слабом взаимодействии принимают участие все частицы материи, но в нем не участвуют частицы — переносчики взаимодействия.

Событие — точка в пространстве-времени, которая определяется положением в пространстве и во времени.

Спектр — расщепление волны (например, электромагнитной) на частотные компоненты.

Специальная теория относительиости — теория Эйнштейна, отправная точка которой состоит в том, что законы науки должны быть одинаковы для всех свободно движущихся наблюдателей независимо от их скоростей.

Спин (spin — вращаться, вертеться) — внутреннее свойство частицы, связанное с ее вращением вокруг собственной оси.

Стационарное состояние — состояние, не изменяющееся со временем: вращающийся с постоянной скоростью шар находится в стационарном состоянии, потому что, несмотря на вращение, в каждый момент он выглядит одинаково.

Теорема о сингулярности — теорема, в которой доказывается, что при определенных условиях сингулярность должна существовать и что, в частности, началом Вселенной должна быть сингулярность.

Теория великого объединения — теория, объединяющая электромагнитные, сильные и слабые взаимодействия.

Ускорение — скорость изменения скорости какого-либо объекта.

Ускоритель частиц — устройство, которое с помощью электромагнитов дает возможность ускорять движущиеся заряженные частицы, постоянно увеличивая их энергию.

Условие отсутствия границ — представление, согласно которому Вселенная конечна, но не имеет границ (в мнимом времени).

Фаза — для волны — положение точки в цикле в определенный момент времени: мера того, находится ли точка на гребне, во впадине или где-нибудь в промежутке.

Фон микроволнового излучения — излучение, возникшее при свечении горячей ранней Вселенной (называется реликтовым). Оно сейчас испытывает такое сильное красное смещение, что регистрируется не в виде света, а в виде волн микроволнового диапазона (радиоволны с сантиметровыми длинами волн).

Фотон — квант света

Частично-волиовой дуализм — лежащее в основе квантовой механики представление о том, что не существует различия между частицами и волнами, частицы могут иногда вести себя как волны, а волны — как частицы

Частота — для волны это число полных циклов в секунду.

Черенковское излучение — излучение света заряженной частицей при ее движении в веществе с постоянной скоростью, превышающей скорость распространения света в этом веществе.

Черная дыра — область пространства-времени, из которой ничто, даже свет, не может выбраться наружу, потому что в ней чрезвычайно сильно действие гравитации.

Электрический заряд — свойство частицы, благодаря которому она отталкивает (или притягивает) другие частицы, имеющие заряд того же (или противоположного) знака.

Электромагнитное взаимодействие — взаимодействие, которое возникает между частицами, обладающими электрическим зарядом. Второе по силе из четырех фундаментальных взаимодействий.

Электрон — частица, обладающая отрицательным электрическим зарядом и обращающаяся в атоме вокруг ядра.

Элементарная частица — частица, которая считается неделимой.

Энергия теории великого объединения — энергия, выше которой электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия предположительно должны стать неразличимыми.

Энергия электрослабой теории — энергия (около 100 ГэВ), выше которой исчезают различия между электромагнитными и слабыми взаимодействиями.

Эффект Доплера — изменение частоты волн при движении их источника и наблюдателя относительно друг друга.

Ядерный синтез — процесс соударения двух ядер и последующего их слияния в одно более тяжелое ядро.

Ядро — центральная часть атома, которая состоит только из протонов и нейтронов, удерживаемых в ядре сильным взаимодействием.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Книга С. Хокинга вышла одновременно в Канаде и США в апреле 1988 г. В мае появился в продаже ее итальянский перевод. В Англии дата была объявлена заранее — 18 июня. К этому времени уже появились первые рецензии. Так, читатели американского еженедельника «Newsweek» 13 июня были оповещены, что «прикованный к инвалидному креслу, лишенный даже дара речи, физик Стивен Хокинг ищет теорию великого объединения, которая объяснит Вселенную...»

А в конце июня Хокинг приехал в Ленинград на конференцию, посвященную 100-летию со дня рождения А. А. Фридмана, и привез свою новую книгу, один из экземпляров которой подарил мне.

В Ленинграде Хокинг проявлял необычайную активность — выступил с докладом, участвовал в дискуссии, прочел лекцию в Доме ученых, дал короткое интервью для журнала «Природа». При этом Хокинг не говорил: за него четким, но лишенным человеческой теплоты голосом говорил синтезатор речи. То, что он произносил, Хокинг набирал на дисплее маленького компьютера, прикрепленного к его инвалидной коляске. Активность Хокинга вне физики была столь же поразительна. Он совершал экскурсии по городу, ездил в своем кресле по Эрмитажу, общался с друзьями. И старался впитать в себя все, что его окружало.

Хокинг много путешествует, не раз он приезжал в нашу страну и обрел здесь друзей. Вся его жизнь — необычайный

пример того, как много может сотворить мозг, даже тогда, когда каналы его связи с внешним миром сведены до минимума.

Книга Хокинга необыкновенная, ее тема — рассказ о выборе цели его жизни и о трудном пути ее достижения, рассказ о поисках решения самой большой загадки, которая стоит перед естествоиспытателем. «Моя цель добиться полного понимания Вселенной, почему она такая, какая она есть, и почему она вообще существует», — пишет он о своих исканиях.

Такие вопросы человек задавал себе давно. Варианты ответов есть в мифах почти всех народов. Может быть, и рассуждения ученых нашего века также когда-нибудь будут считать легендами. У новых мифов есть авторы, один из них Хокинг. Его жизнь уже сейчас представляется легендой. Это легенда о человеке, силой мысли побеждающем немощь.

Хокингу сейчас 48 лет. В начале 60-х годов, когда он уже кончал университет в Оксфорде, появились первые признаки грозной болезни — бокового амиотрофического склероза. Настроение становилось мрачным, да и научные успехи были в это время не слишком впечатляющими. Д. Сиама, известный физик, руководитель его дипломной работы, заметил, что «вокруг оказалось не так уж много проблем, достойных человека с такими способностями». К счастью, проблема все же нашлась — это была теория черных дыр, которую Хокинг увидел в новом свете после появления работы Р. Пенроуза об особенностях уравнений тяготения.

В это время изменилась и личная жизнь Хокинга. В 1965 г. он женился на студентке-филологе Джейн Уайлд (ей он посвятил эту книгу). У них есть дочь и два сына.

1985 год принес новое несчастье. После операции на горле Хокинг потерял способность говорить. На помощь приходят друзья, и одна калифорнийская фирма преподносит ему коммуникационную систему компьютер + синтезатор. Об этом Хокинг сам рассказывает во введении к книге, желая выра-

зить благодарность тем, кто помогает ему жить. «Эта система изменила все: мне даже стало легче общаться, чем до того, как я потерял голос», — пишет он.

Существование в таких условиях требует не только воли к жизни, но и чувства юмора. Хокинг рассказывает много историй. Так, занимаясь черными дырами, но не имея пока наблюдательного доказательства их существования, Хокинг заключает пари с Торном. Условия пари подчинялись изысканной логике. Хокинг, веря, что во Вселенной должно быть много черных дыр, делает ставку против их существования. Если дыр не окажется, то в качестве компенсации за потерю смысла главной своей работы он получает четырехлетнюю подписку на английский юмористический журнал «Private Eye». Если же черные дыры есть, Торн получает годовую подписку на «Penthouse», а Хокинг (вполне вероятно) Нобелевскую премию.

Сейчас Хокинг — профессор Кембриджского университета. Он занимает кафедру, которую когда-то занимал Ньютон, а в наше время — Дирак. С 1974 г. Хокинг член Лондонского Королевского общества.

Чтобы начать, наконец, разговор о книге, полезно привести слова астронома К. Сагана, написавшего предисловие: «Книга о Боге... а может быть, об отсутствии Бога». Слово Бог повторяется часто. Хокинг отправляется на поиски ответа на знаменитый вопрос Эйнштейна, был ли у Бога какой-нибудь выбор, когда он создавал Вселенную. Хокинг стремится — он говорит об этом прямо — понять замысел Бога. Поиски приводят к неожиданному заключению, может быть, не окончательному: «..Вселенная без края в пространстве, без начала и конца во времени, без каких-либо дел для Создателя». Рассуждения о Боге, конечно, не новы. Вспомним Лапласа, который будто бы ответил Наполеону, что не нуждается в этой гипотезе.

Постепенно раскрывающаяся история Вселенной всегда изумляла естествоиспытателей. Эйнштейн выразил это в своей

обычной парадоксальной форме: «Когда я рассуждаю о физической теории, я спрашиваю себя, создавал ли бы я Вселенную таким же путем, если бы Богом был я?» Его вечный оппонент Нильс Бор ответил так: «Это совсем не наше дело предписывать Богу, каким образом он должен управлять миром».

Вопрос так и остается без ответа: случайно ли история Вселенной оказалась такой, какой она постепенно раскрывается перед человеком? Возможно ли, чтобы история была другой, или история определяется однозначно из принципов, которых мы еще не знаем? И наконец, «еще не знаем» или мы и не можем их узнать, ибо ответ может лежать за пределами познания человека. И все же чем глубже в прошлое и чем дальше в будущее проникает наука, тем меньше дела остается для мифических сил.

После того как гипотеза о рождении Вселенной в большом взрыве превратилась в почти общепринятую, вопрос о том, что было до рождения Вселенной, стал как бы незаконным. В этом смысле наука приблизилась ко многим мифам, в том числе и к библейскому варианту создания Вселенной. Поразительным было воображение древних, создававших мифы.

Прочитаем в первой главе Библии: «И назвал Бог свет днем, а тьму ночью. И был вечер, и было утро: день один». Иногда переводят: «день первый». Это неверно. Комментаторы канонического текста считают, что не могло быть сказано «день первый», так как не было последующего. По-видимому, идея, что время также должно было быть создано, занимала авторов Бнблии. Не только создание времени, но и конец времени представлялся в осмысленном понятии. В заключительной книге Библии, откровении Иоанна (10:6), ангел, объявляя о грядущем конце мира, говорит: «...и времени уже не будет».

Проблема времени привлекала внимание и христианских философов раннего Средневековья. В «Исповеди» Блаженно-

го Августина мы читаем: «Если же раньше неба и земли не было времени, зачем спрашивать, что Ты делал тогда. Когда не было времени, не было и тогда».

Наш век требует, чтобы мифы обрели математическое обличие. Это свершилось в Ленинграде, когда появилась работа А. А. Фридмана. Вселенная Фридмана начинается с «особенности» — мировой точки, в которой обращается в бесконечность кривизна, а с нею и плотность вещества. В этой точке теряют свою силу физические законы, и, оставаясь в рамках обычной модели Вселенной Фридмана, нельзя понять, что происходило в самом начале времени, как возник большой взрыв.

Это утверждение правильно, и физики не ошиблись, считая, что не имеет смысла сам вопрос о продолжении координаты времени за «особенность». Действительно, проблему нельзя даже сформулировать аккуратно на языке математики, если оставаться в рамках классической теории тяготения Эйнштейна. Доказано, что в этих рамках не существует решений уравнений общей теории относительности — уравнений Эйнштейна — Гильберта, которые бы не имели «особенностей».

«Особенности» появляются не только для всей Вселенной, но и для звезд, масса которых столь велика, что вещество не может преодолеть собственного гравитационного поля и падает к ее центру так, что поверхность звезды стягивается в конце концов в математическую точку — сингулярность. Происходит коллапс звезды, ее «схлопывание». Такая звезда и есть черная дыра, привлекшая внимание Хокинга.

Проблемой сингулярности занимался Р. Пенроуз, который показал, что начавшийся коллапс звезды не может прекратиться. Хокинг пишет, что он очень обрадовался новым идеям, считая их достойными развития. Его подстегивали и личные обстоятельства. Прогнозы врачей были мрачными.

Работа над докторской степенью казалась бессмысленной. Но прошло два года, и ухудшения не наступило. «Напротив, — говорит Хокинг, — дела мои пошли замечательно. Я стал женихом очаровательной девушки Джейн Уайлд. Но чтобы жениться, нужна была работа, для получения работы нужна была докторская степень. А тут подвернулась хорошая тема».

Хокинг увидел, что между задачей о черной дыре и задачей о большом взрыве есть большое сходство. Если черная дыра кончает свое существование в сингулярности, то, повернув в ее истории время, мы получим модель Вселенной, которая в сингулярности рождается. Это подтвердило старые предположения, и в 1970 г. Хокинг с Пенроузом опубликовали работу с доказательством того, что расширяющаяся Вселенная должна начать свою историю в сингулярности.

Между черной дырой и Вселенной есть принципиальная разница. Точнее, есть различие между положением наблюдателя в одном и другом случае. Коллапс черной дыры мы наблюдаем снаружи, и теория говорит, что для наблюдателя, покоящегося на бесконечности, т. е. в области, где гравитационное поле черной дыры сколь угодно мало, время полного коллапса, время достижения сингулярности, бесконечно велико. Строго говоря, наблюдатель никогда не увидит конца эволюции черной дыры. Во Вселенной наблюдатели находятся внутри, они разбегаются вместе с галактиками, и их возраст (считая от большого взрыва) конечен.

Но у обоих объектов есть общая черта: процесс коллапса и расширения Вселенной необратимы. Если необратимость расширения Вселенной представляется естественной (диссипативные процессы сопровождают эволюцию), то необратимость коллапса — теорема Пенроуза—Хокинга — не столь понятна. Диссипативные процессы приводят к необратимости, к росту энтропии системы. Но можно ли приписать энтропию

черной дыре? Как в детективной истории, Хокинг находит улику, она лежала почти на виду.

Когда вещество или излучение падает на черную дыру, площадь ее поверхности может только увеличиваться. Радиус черной дыры пропорционален ее массе, а поверхность — квадрату массы. Когда масса растет, растет и поверхность. Далее Хокинг замечает, что если две черные дыры сливаются в одну, то поверхность новой дыры становится больше, чем суммарная поверхность двух исходных. Можно отметить и очевидный факт. Если при коллапсе на черную дыру ничего не падает, т. е. поверхность (ее называют горизонтом) остается постоянной — поверхность определяется только массой.

Следующий шаг делает американец Дж. Бикенстин. Он высказывает смелое предположение, что для черной дыры можно ввести понятие энтропии и что энтропия черной дыры пропорциональна ее поверхности. Поверхность растет (или остается постоянной) со временем, хорошо имитируя поведение энтропии. Гипотеза, которая выглядела довольно сомнительной, в работе Хокинга превратилась в строгую теорему. Как выяснилось, она следовала из законов квантовой механики и общей теории относительности.

Открытие Хокинга повлекло за собой цепочку новых утверждений. Если у черной дыры есть энтропия, то должна быть и температура. Термодинамика позволяет вычислить, что если энтропия определяется квадратом энергии и не зависит, например, еще и от объема, то температура должна быть обратно пропорциональна энергии (или массе) черной дыры.

Немного подумав, можно понять, что такое заключение не очень согласуется с исходным представлением о черной дыре. Тело, падающее на черную дыру, описывается уравнениями механики (конечно, механики ОТО), и для энтропии в таком описании нет места. Но уравнения механики обратимы во времени, а звезда коллапсирует необратимо. В теории должны

были появиться энтропия и температура. Но дальше предъявляет свои обязательные требования термодинамика. Всякое тело, имеющее температуру, должно излучать по эакону Стефана—Больцмана (со спектром Планка). Значит, вопреки всему сказанному о безвозвратности коллапса и невозможности ничему вырваться иэ гравитационного поля, черная дыра иэлучает, и интенсивность излучения растет, как четвертая степень ее температуры. «Черные дыры не так уж черны» — так названа седьмая глава книги.

В чем физическая природа этого излучения? Было ясно, что ответ на новый вопрос нельзя искать в теории Эйнштейна и надо привлекать вторую королеву физики нашего века — квантовую механику. Конечно, вторжение квантовой механики было не так уж неожиданно. Уже в формуле для энтропии Бикенстина возникла трудность с размерностью коэффициента, обращающего площадь в безразмерную энтропию. Единственной величиной, с помощью которой разумно «обезразмерить» площадь, был квадрат планковской длины, равной 10–33 см и составленной из постоянной Планка и постоянной тяготения. Не вовлекая в игру постоянную Планка, написать формулу для энтропии не удается.

Первый вариант решения был предложен Я. Б. Зельдовичем и А. А. Старобинским: если черная дыра вращается, она должна излучать. Хокинг исследовал эту идею подробно после того, как авторы рассказали ему о ней в 1973 г. (Хороший пример того, как быстро и четко резонирует Хокинг на новые идеи.) Выяснилось, что для излучения звезде не обязательно вращаться: излучает вакуум, в который она погружена. Это почти мистическое свойство вакуума — пространства, в котором ничего нет. Но в квантовой механике «даже если ничего нет, что-то происходит», как заметил кто-то из физиков.

В «пустом» вакууме есть поля, и хотя величины полей, например магнитного, равны в среднем нулю, их квадраты (или

абсолютные значения) в нуль не обращаются даже в среднем (хотя бы потому, что они всегда положительны). Вблизи черной дыры такие флуктуации рождают пары. Масса таких пар почти равна нулю, так как большой (отрицательный) гравитационный потенциал практически компенсирует массу свободных электрона и позитрона.

У компонентов родившейся пары разные судьбы. Одна из частиц «проваливается» в черную дыру и перестает существовать для нас. Но частица не зря отдала свою жизнь. Ее энергия передалась второй частице и дала ей возможность вырваться из гравитационного плена. Это и есть излучение Хокинга. Вычисление спектра излучения привело к формуле Планка. Так было опровергнуто мнение, что черные дыры бессмертны. Правда, излучение существенно сокращает жизнь только маленькой черной дыры, черная дыра с радиусом протона (10–13 см), возникшая в процессе большого взрыва, не дожила бы до нашего времени. Но продолжительность жизни черной дыры растет, как куб ее радиуса. Для черной дыры с радиусом 3 км (гравитационный радиус Солнца) продолжительность жизни столь велика, что не стоит ее и подсчитывать.

Но тем не менее черной дыре предстоит исчезнуть. Как это произойдет, наука не знает. Можно лишь сказать, что конечных состояний может быть очень много, и предсказать, как погибнет черная дыра, никто сейчас не в состоянии. Как нельзя предсказать, на какие куски разобьется бутылка, упавшая на камень.

О черных дырах написано много, и мы можем не продолжать. Но прежде чем оставить эту тему, хотелось бы досказать историю, которую Хокинг упоминает в книге.

Первый раз речь о черной дыре завел в 1783 г. англичанин Дж. Мичелл, который написал, что если бы тело с плотностью, равной плотности Солнца, имело радиус в 500 раз

меньший, то свет, излученный таким телом, должен вернуться обратно из-за собственной тяжести. Мичелл размышлял об этом не просто так. Ему очень хотелось найти способ измерения массы дальних эвезд. Для него свет состоял иэ корпускул, которые, преодолевая гравитационное поле эвеэды (определяемое ее массой), теряют свою скорость. Именно так он и пришел к своему выводу. Но для него более важным было следствие обнаруженного им явления: чтобы определить массу звезды, надо измерить на Земле скорость света, приходящего к нам от этой звезды.

Сегодня мы понимаем, что измерять надо не изменение скорости света, а изменение его частоты — красное смещение. Но для своего времени идея была красивая.

Размышление о конце черной дыры с неизбежностью приводит к выводу, что без квантовой механики не обойтись. С такими сомнениями и результатами Хокинг в 1981 г. вернулся к попытке объяснить начало Вселенной. Но его занимают не математические вычисления (в уме их делать нелегко), а поиски самых глубоких истин.

Как установились начальные условия, приведшие к Вселенной, которую мы видим и в которой оказались сами? «Один возможный ответ — это сказать, что Бог выбрал начальную конфигурацию Вселенной из соображений, понять которые нам не дано... Но почему, выбрав такое странное начало, он все же решил, чтобы Вселенная развивалась по понятным нам законам?» Поскольку же эти законы понятны, то «естественно предположить, что этот порядок относится не только к законам науки, но и к условиям на границе пространства-времени, которые определяют исходное состояние Вселенной».

Так Хокинг вступает в спор с Богом, отнимая у него роль Создателя. Идея Хокинга носит еще достаточно смутный характер. В книге он совсем не пишет формул — издатель пред-

упредил его, что одна-единственная формула уполовинит тираж (формула $E = mc^2$ все же приводится, но это не помешало книге стать бестселлером). И свою новую идею Хокинг пытается объяснить словами. Кажется, все же в его мозгу есть более четкая картина, которую он просто еще не может передать компьютеру. Когда я говорю об этом, меня не покидает ощущение какого-то фантастического (или сюрреалистического) романа, в который я попал.

Почему и как возникла Вселенная — объяснить, оставаясь в рамках классической модели, нельзя, как нельзя объяснить свойства электрона, зная лишь одну-единственную его траекторию (или небольшой ее кусочек). Но квантовая механика благодаря принципу неопределенности имеет дело сразу со многими (или даже со всеми) возможными историями.

То, с чего начинает современная теория, — это некоторым образом определенная сумма по всем историям, которые, интерферируя друг с другом, создают нашу реальную (в каком-то смысле наиболее вероятную) Вселенную. Но математика отказывается реализовать такую идею. Чтобы теория была формально последовательной, надо отказаться от обычного времени. Для описания возможных историй вселенных приходится переходить от реального времени к мнимому, превращая пространство Минковского в более понятное четырехмерное пространство Евклида. В таком евклидовом четырехмерии исчезают особые точки (так полюсы Земли ничем геометрически не отличаются от точек экватора). У поверхности сферы, как и у любой другой замкнутой поверхности, «границ нет». Кавычки здесь поставлены потому, что это есть новое граничное условие. Совсем просто, но, к сожалению, не вполне понятно! Ведь история, начинающаяся с сингулярности, развивается вместе с нами в реальном времени, так что наше психологическое время оказывается не тем, в котором описывается развитие Вселенной. Надо еще думать, как совершить переход от мнимо-

го времени к реальному. Идея кажется заманчивой, но пройдет, наверное, еще немало времени (реального), пока (мы надеемся) она станет понятной.

Вся книга Хокинга написана им с целью подвести читателя к своей идее. Он не очень много может сказать в ее защиту. Он призывает читателя к раздумьям о самых общих законах, результатом которых (случайным или необходимым) стало появление жизни, читателя (и, конечно, книги Хокинга).

Есть и еще важный и, несомненно, великий эакон — эакон о направлении времени. «Стрела времени» — так называется девятая глава книги. Эта глава — великолепный научный этюд. Непростая для понимания идея о двух сосуществующих четырехмерных пространствах — евклидовом, в котором отбираются истории, и пространстве Минковского, в котором работают динамические уравнения и в котором протекает наша жизнь Если в этой «сумасшедшей» идее есть хоть крупица истины, то мы делаем шаг к совершенно новому этапу познания, но, может, все же идея не настолько сумасшедшая, чтобы стать истиной (по «критерию» Нильса Бора).

Здесь еще уместно добавить несколько слов о причинности Классическая механика дает право утверждать, что будущее можно предсказать с точностью и полнотой не лучшими, чем точность и полнота начальных данных

Почти к этому сводится и спор о полноте и вероятности в квантовой механике. Не имеет смысла обсуждать возможности измерения с бóльшими подробностями, если начальные данные ограничены принципом неопределенности Можно только утверждать, что информация, содержащаяся в начальных данных (по крайней мере для систем, у которых есть только дискретные уровни), не исчезает со временем (если, конечно, в системе нет трения и если система замкнута). Именно такую неопределенность квантовая механика вносит в теорию гравитации

Эффектная декларация Лапласа о том, что история предсказуема, если только известен полный набор начальных данных — координаты и импульсы всех тел (и полей, добавим сейчас), во Вселенной не имеет смысла. Нельзя собрать в конечное время все эти данные — передача данных требует времени (нет сигналов, распространяющихся со скоростью, большей скорости света), а количество необходимых данных бесконечно. Кроме того, требуются абсолютно точные данные, даже очень маленькие погрешности могут в корне изменить предсказание будущего (как говорят, задача неустойчива). Так что пример Лапласа выходит эа рамки реальности.

Мне хочется закончить словами автора — неисправимого оптимиста: «Если мы откроем полную теорию, то со временем ее основные принципы станут доступны пониманию каждого, а не только нескольким специалистам. И тогда мы все, философы, ученые и просто обычные люди, сможем принять участие в дискуссии о том, почему так произошло, что существуем мы и существует Вселенная».

Нам может нравиться или не нравиться ход мыслей Хокинга, но от поставленных им вопросов уйти нельзя... В некоем смысле мы подошли к границе познания, и мы смущены самой сутью: может ли система (Вселенная и мы) быть устроена так, что часть ее — человек — способна понять все ее законы, включая законы собственного познания. Основное положение науки состоит в том, что мир реален и познаваем. Но очевидно ли, что он познаваем человеком? Сомнения в этом нередко приводят к мысли о могучих разумом, нас изучающих инопланетянах. Нуждаемся ли мы в этой гипотезе? Возможно, на это ответит Хокинг.

Я. А. Смородинский

Декабрь 1989 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Благодарности 5
Предисловие 9
1. Наше представление о Вселенной 12
2. Пространство и время 30
3. Расширяющаяся Вселенная 56
4. Принцип неопределенности 80
5. Элементарные частицы и силы в природе 92
6. Черные дыры 117
7. Черные дыры не так уж черны 142
8. Рождение и гибель Вселенной 161
9. Стрела времени 200
10. Объединение физики 214
11. Заключение 233
Альберт Эйнштейн 239
Галилео Галилей 242
Исаак Ньютон 245
Словарь терминов 248
Послесловие 255

Литературно-художественное издание

СТИВЕН ХОКИНГ

Краткая история времени

От большого взрыва до черных дыр

Ответственный редактор *Марина Стукалина*
Художественный редактор *Алексей Горбачев*
Технический редактор *Татьяна Харитонова*
Корректор *Елена Байер*
Верстка *Наталии Нагиной*

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции ОК-005-93, том 2; 953000 — книги, брошюры.

Подписано в печать 07.06.2001.
Формат 80×100¹/₃₂. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 12,58. Доп. тираж 7000 экз.
Заказ № 874.

ИД № 02164 от 28.06.2000.
«Торгово-издательский дом „Амфора“».
197022, Санкт-Петербург, наб. реки Карповки, 23.
E-mail: amphora@mail.ru

Отпечатано с готовых фотоформ
в ФГУП «Печатный двор» им. А. М. Горького
Министерства РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 15.

торгово-издательский дом «Амфора» представляет

«Эврика!», серия книг, рассказывающих об истории и философии современной науки, выходит в издательстве «Амфора» с 2000 года. Эта серия была признана «Серией года» сразу несколькими экспертными советами.

В серии вышли:

Стивен Хокинг
«Краткая история времени»
(От большого взрыва до черных дыр)

•

Стивен Хокинг
«От черных дыр до молодых вселенных»

•

Поль де Крюи
«Охотники за микробами»
(Занимательная микробиология)

•

Айзек Азимов
«Краткая история химии»
(Развитие идей и представлений
в химии от алхимии до ядерной бомбы)



торгово-издательский дом «Амфора» представляет

Айзек Азимов
«Выбор катастроф»
(От гибели Вселенной
до энергетического кризиса)

•

Барри Паркер
«Мечта Эйнштейна»
(В поисках единой теории строения Вселенной)

•

Дж. Д. Макдугалл
«Краткая история планеты Земля»

•

Г. Франкфорт, Г. А. Франкфорт,
Дж. Уилсон и Т. Якобсен
«В преддверии философии»
(Духовные искания древнего человека)

•

Конрад Лоренц
«Агрессия»

•

Лео Дойель
«Завет вечности»
(В поисках библейских манускриптов)

•

Десмонд Моррис
«Голая обезьяна»



По вопросам поставок обращайтесь:

«Торгово-издательский дом „Амфора“»

Москва:

ул. Судостроительная, д. 30,

корп. 1, подъезд 4

(рядом с метро «Коломенская»)

Телефон/факс: (095) 116-68-06

Санкт-Петербург:

197022, наб. реки Карповки, д. 23

Телефон/факс: (812) 346-04-51, 346-22-71