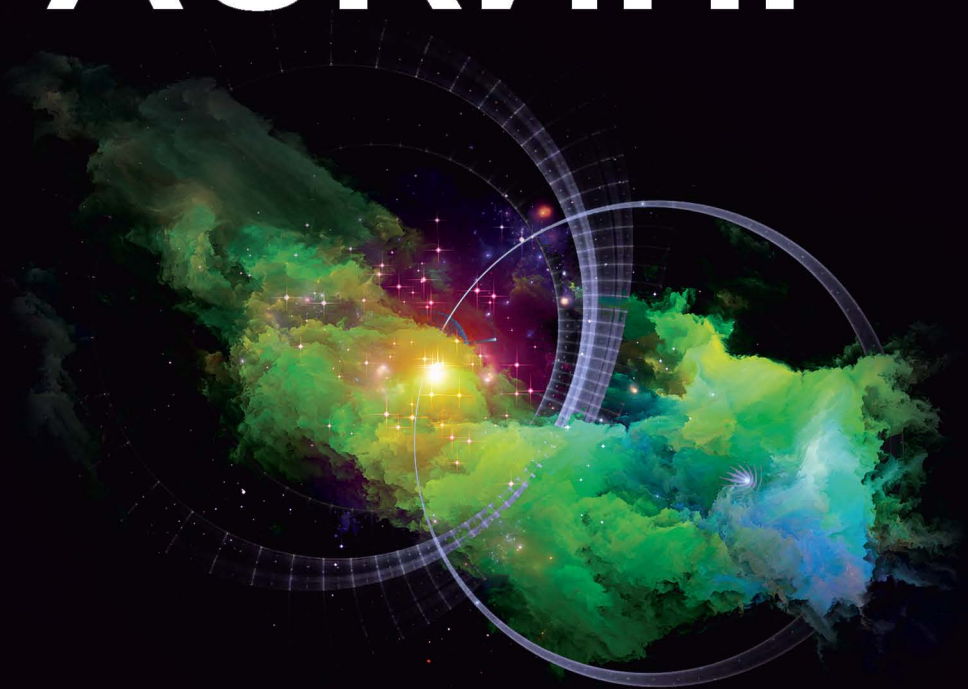


СТИВЕН ХОКИНГ



ТЕОРИЯ ВСЕГО

ОТ СИНГУЛЯРНОСТИ ДО БЕСКОНЕЧНОСТИ:
ПРОИСХОЖДЕНИЕ И СУДЬБА ВСЕЛЕННОЙ



СТИВЕН ХОКИНГ

ТЕОРИЯ ВСЕГО



ОГИЗ

Издательство АСТ



Вы смогли скачать эту книгу бесплатно и легально благодаря проекту **«Дигитека»**. [Дигитека](#) — это цифровая коллекция лучших научно-популярных книг по самым важным темам — о том, как устроены мы сами и окружающий нас мир. Дигитека создается командой научно-просветительской программы [«Всенаука»](#). Чтобы сделать умные книги бесплатными, достойно вознаградив авторов и издателей, Всенаука организовала всенародный сбор средств.

Мы от всего сердца благодарим всех, кто помог освободить лучшие научно-популярные книги из оков рынка! Наша особая благодарность — тем, кто сделал самые значительные пожертвования (имена указаны в порядке поступления вкладов):

Дмитрий Зимин
Екатерина Васильева
Зинаида Стаина
Иван Пономарев
Александр Боев
Николай Кочкин
Сергей Вязьмин
Сергей Попов
Алина Федосова
Роберт Имангулов
Алексей Волков
Анонимный жертвователь
Кирилл Крохмалев
Руслан Кундельский
Андрей Савченко
Владимир Валентинасов
Павел Дорожкин
Евгений Шевелев
Павел Мерзляков
Александра Прутова
Лада Сычева

Максим Кузьмич
Анастасия Коростелева

Мы также от имени всех читателей благодарим за финансовую помощь негосударственный институт развития «Иннопрактика» и Фонд поддержки культурных и образовательных проектов «Русский глобус».

Этот экземпляр книги предназначен только для личного использования. Его распространение, в том числе для извлечения коммерческой выгоды, не допускается.

УДК 524.8
ББК 22.68
X70

Перевод оригинального издания:

Stephen Hawking
The Theory of Everything

Печатается с разрешения *Waterside Productions Inc*
и литературного агентства «Синописис».

Хокинг, Стивен

X70 Теория всего / С. Хокинг; пер. с англ. Е. В. Шимановская. — Москва: АСТ, 2018. — 160 с.: ил. — (Мир Стивена Хокинга).

ISBN 978-5-17-102340-9 (ООО «Издательство АСТ»)

«Теория всего» — это история Вселенной, рассказанная Стивеном Хокингом в привычной — прозрачной и остроумной — манере и дополненная фантастическими снимками космического телескопа «Хаббл», от которых перехватывает дух. Иллюстрации и схемы, созданные специально для этой книги, помогут понять те самые теории и концепции, с которыми каждый день сражаются передовые ученые по всему миру.

Книга объединяет семь лекций, охватывающих широкий диапазон тем: от Большого взрыва и черных дыр до теории струн. Автор описывает представления о Вселенной — от постулата о том, что Земля имеет форму шара, до теории о расширении Вселенной, основанной на недавних наблюдениях.

Однако с особым азартом Стивен Хокинг рассуждает о непрекращающихся поисках теории всего, появление которой, по мнению автора, ознаменует триумф человеческого разума.

Эта книга для всех, кто когда-либо вглядывался в ночное небо и задавался вопросом о том, что скрывается в его чернильной синеве.

УДК 524.8
ББК 22.68

Оригинальное издание опубликовано
Phoenix Books and Audio.

ISBN 978-5-17-102340-9 (ООО «Издательство АСТ»)

© Phoenix Books and Audio, 2006
© ООО «Издательство АСТ», 2017
(перевод на русский язык)

Введение

В этой серии лекций я постараюсь в общих чертах рассказать о наших представлениях об истории Вселенной от Большого взрыва до образования черных дыр. Первая лекция посвящена краткому обзору идей о строении Вселенной, которых придерживались в прошлом, и рассказу о том, как была построена современная картина мира. Эту часть можно назвать историей развития представлений об истории Вселенной.

Во второй лекции я опишу, как теории гравитации Ньютона и Эйнштейна привели к пониманию того, что Вселенная не может быть неизменной — она должна либо расширяться, либо сжиматься. Из этого, в свою очередь, следует вывод, что в какое-то время в интервале от 10 до 20 млрд лет назад плотность Вселенной была бесконечной. Эта точка на оси времени называется Большим взрывом. По-видимому, этот момент и был началом существования Вселенной.

В третьей лекции я расскажу о черных дырах. Они образуются, когда массивная звезда или более крупное космическое тело коллапсирует под действием собственной гравитации. Согласно общей теории относительности Эйнштейна, каждый, кто окажется достаточно глуп,

чтобы угодить в черную дыру, останется там навсегда. Никто не сможет оттуда выбраться. В сингулярности истории существования любого объекта приходит конец. Однако общая теория относительности — это теория классическая, то есть в ней не учитывается квантовомеханический принцип неопределенности.

В четвертой лекции я объясню, как квантовая механика позволяет энергии ускользать из черной дыры. Черные дыры не так уж черны, «как их малюют».

В пятой лекции я расскажу о применении идей квантовой механики к решению вопросов, связанных с Большим взрывом и происхождением Вселенной. Это подведет нас к пониманию того, что пространство-время может быть конечным, но не иметь границы или края. Это напоминает поверхность Земли, но с добавлением еще двух измерений.

В шестой лекции я покажу, как на основе этого нового предположения о границе можно объяснить, почему прошлое так сильно отличается от будущего, хотя законы физики симметричны относительно времени.

Наконец, в седьмой лекции я расскажу о попытках сформулировать единую теорию, охватывающую квантовую механику, гравитацию и все остальные физические взаимодействия. Если нам это удастся, мы действительно сможем понять Вселенную и свое место в ней.

Лекция первая

Представления о Вселенной

Еще в 340 г. до н. э. Аристотель в своем трактате «О небе» сформулировал два веских довода в пользу того, что Земля имеет форму шара, а не является плоской, как тарелка. Во-первых, он понял, что лунные затмения вызваны прохождением Земли между Солнцем и Луной. Тень Земли на Луне — всегда круглая, а это возможно, только если Земля имеет сферическую форму. Если бы Земля представляла собой плоский диск, тень была бы вытянутой и имела бы форму эллипса, за исключением тех случаев, когда в момент затмения Солнце находится точно над центром диска.

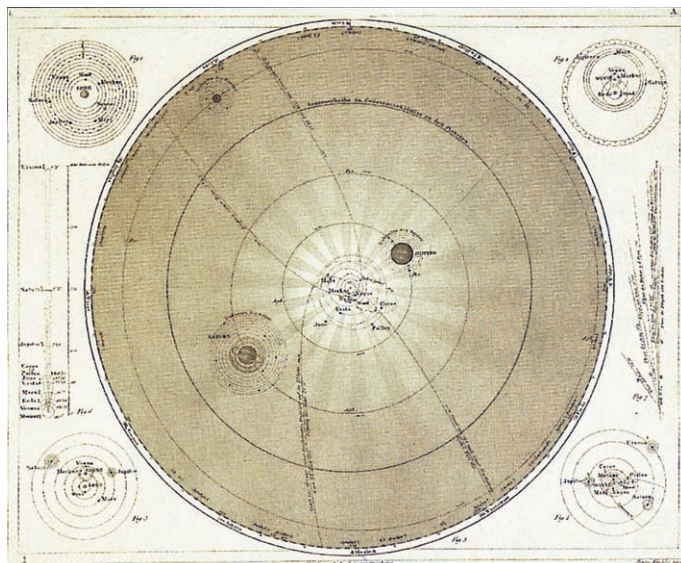
Во-вторых, из опыта своих путешествий греки знали, что в южных районах Полярная звезда находится ниже над горизонтом, чем в более северных. Опираясь на разницу видимых положений Полярной звезды в Египте и Греции, Аристотель даже приводит оценку длины окружности Земли — 400 тыс. стадиев. Чему равен один стадий — точно не известно (возможно, около 180 метров). Тогда оценка Аристотеля почти в два раза превосходит значение, принятое в настоящее время.

У древних греков был еще и третий аргумент в пользу того, что Земля должна иметь форму шара: иначе почему на горизонте сначала появляются паруса приближающегося корабля и только потом становится виден его корпус? Аристотель думал, что Земля неподвижна, а Солнце, Луна, планеты и звезды движутся по круговым орбитам вокруг нее. Он так считал, поскольку в силу мистических соображений был убежден, что Земля — центр Вселенной, а круговое движение — самое совершенное.

Аристотель считал, что Земля неподвижна, а Солнце, Луна, планеты и звезды движутся по круговым орбитам вокруг нее.

В I веке н. э. эта идея была развита Птолемеем в целостную космологическую модель. Земля располагается в центре, ее окружают восемь сфер, несущих на себе Луну, Солнце, звезды и пять планет, известных в то время: Меркурий, Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн. Планеты движутся по окружностям меньших радиусов, которые связаны с соответствующими сферами. Это требовалось, чтобы объяснить их достаточно сложные наблюдаемые траектории движения по небу. На внешней сфере расположены так называемые неподвижные звезды, которые сохраняют свои положения относительно друг друга, но все вместе совершают круговое движение по небу. Что находится за пределами внешней сферы — оставалось неясным, но эта часть Вселенной, несомненно, была недоступна для наблюдений.

Модель Птолемея давала возможность достаточно точно предсказывать положения небесных тел на небе.



Старинный рисунок, на котором изображены разные космологические модели, объяснявшие движение планет. На центральной схеме представлена гелиоцентрическая (в центре находится Солнце) модель движения шести известных в то время планет, их спутников и других небесных тел, обращающихся вокруг Солнца. Со второго века доминирующей моделью стала геоцентрическая (в центре находится Земля) система Птолемея (вверху слева). На смену ей пришла гелиоцентрическая система Коперника, опубликованная в 1543 г. (внизу справа). В египетской модели (внизу слева) и модели Тихо Браге (вверху справа) предпринимались попытки сохранить представление о неподвижной Земле как центре Вселенной. Подробные сведения об орбитах планет приведены слева и справа.

Из «Иллюстрированного атласа» Иоганна Георга Хека, 1860 г.

Но для этого Птолемею пришлось допустить, что иногда Луна подходит вдвое ближе к Земле, чем в другие моменты своего движения по предсказанной траектории. Это означало, что периодически Луна должна

казаться вдвое больше обычного. Птолемей знал об этом недостатке, но, несмотря на это, его модель была принята большинством, хотя и не всеми. Она получила одобрение христианской церкви, как картина мира, согласующаяся со Священным писанием. Ведь эта модель обладала огромным преимуществом, поскольку оставляла за сферой неподвижных звезд достаточно места для рая и ада.

Однако в 1514 г. польский священник Николай Коперник предложил гораздо более простую модель. Сначала, опасаясь обвинений в ереси, он опубликовал свою модель анонимно. Он считал, что в центре находится неподвижное Солнце, а Земля и планеты движутся вокруг него по круговым орбитам. К несчастью для Коперника, прошло почти сто лет, прежде чем его идеи были приняты всерьез. Тогда два астронома — немец Иоганн Кеплер и итальянец Галилео Галилей — публично выступили в поддержку теории Коперника несмотря на то, что орбиты, предсказанные на основе этой теории, несколько отличались от наблюдаемых. Конец господству теории Аристотеля-Птолемея был положен в 1609 г., когда Галилео Галилей начал изучать ночное небо с помощью недавно изобретенного телескопа.

В 1609 г. Галилео Галилей начал изучать ночное небо с помощью недавно изобретенного телескопа.

Наблюдая Юпитер, Галилей заметил, что планету сопровождают несколько небольших спутников (лун), которые обращаются вокруг нее. Это означало, что не все небесные тела должны обращаться вокруг Земли, как

думали Аристотель и Птолемей. Конечно, по-прежнему можно было считать, что Земля неподвижна и находится в центре Вселенной, а спутники Юпитера движутся по крайне сложным траекториям вокруг Земли, так что создается видимость их обращения вокруг Юпитера. Однако теория Коперника была гораздо проще.

В это же время Кеплер развил теорию Коперника, предположив, что планеты движутся не по круговым орбитам, а по эллиптическим. Теперь предсказания теории окончательно совпали с наблюдениями. Что касается Кеплера, эллиптические орбиты были лишь искусственной гипотезой, причем весьма досадной, поскольку эллипс считался менее совершенной фигурой, чем круг. Обнаружив (почти случайно), что эллиптические орбиты хорошо соответствуют наблюдениям, он не мог согласовать это со своей идеей о том, что планеты обращаются вокруг Солнца под действием магнитных сил.

Объяснение было найдено гораздо позднее, в 1687 г., когда Ньютон опубликовал свой труд *«Математические начала натуральной философии»*. Это, возможно, самый важный из когда-либо опубликованных трудов по физике. В нем Ньютон не только предложил теорию движения тел в пространстве и времени, но также разработал математический аппарат для анализа этого движения. Кроме того, он сформулировал закон всемирного тяготения. Этот закон гласит, что все тела во Вселенной притягиваются друг к другу с силой, которая тем больше, чем больше массы тел и чем ближе друг к другу они расположены. Это та же сила, которая заставляет объекты падать на землю. История с упавшим на Ньютона яблоком почти наверняка является вымышленной. Сам Ньютон упоминал лишь о том, что идея гравитации

пришла ему в голову, когда он пребывал в созерцательном настроении и заметил падение яблока.

Ньютон не только предложил теорию движения тел в пространстве и времени, но также разработал математический аппарат для анализа этого движения.

Затем Ньютон показал, что, согласно его закону, гравитация заставляет Луну двигаться по эллиптической орбите вокруг Земли, а Землю и другие планеты — следовать по эллиптическим траекториям вокруг Солнца. Коперниканская модель избавилась от небесных сфер Птолемея, а заодно и от представлений о том, что Вселенная имеет естественную границу. Так называемые неподвижные звезды не меняют свои видимые взаимные положения в процессе движения Земли вокруг Солнца. Поэтому естественно было предположить, что это такие же объекты, как наше Солнце, но расположенные гораздо дальше. Это рождало вопросы. Ньютон понимал, что, согласно его теории гравитации, звезды должны притягиваться друг к другу. То есть они не могут оставаться абсолютно неподвижными. Не упадут ли они все вместе в одну точку?

В письме, написанном в 1691 г. Ричарду Бентли, другому выдающемуся мыслителю того времени, Ньютон утверждал, что такое действительно случилось бы, будь число звезд конечным. С другой стороны, если в бесконечном пространстве более-менее равномерно распределено бесконечное число звезд, этого не произойдет, поскольку нет никакой центральной точки, в которую

они могли бы упасть. Этот аргумент — пример ловушки, в которую можно угодить, рассуждая о бесконечности.

В бесконечной Вселенной каждая точка может считаться центром, поскольку по любую сторону от нее находится бесконечное число звезд. Как стало ясно намного позднее, правильный подход заключается в том, чтобы рассматривать конечную область, в которой все звезды «падают» друг на друга. Возникает вопрос: что изменится, если добавить в рассмотрение другие звезды, практически равномерно распределенные за пределами этой области? По закону Ньютона, добавление звезд никак не повлияет на исходные звезды — они будут приближаться друг к другу с прежней скоростью. Мы можем добавить сколько угодно звезд, но коллапса не избежать. Теперь мы знаем, что невозможно построить модель бесконечной стационарной Вселенной, в которой гравитация всегда связана с притяжением.

Что интересно, до XX века общий образ мыслей был таков, что никто не предполагал, что Вселенная может расширяться или сжиматься. Считалось, что либо Вселенная существовала всегда в неизменном виде, либо была создана в определенный момент в прошлом примерно такой, какой мы видим ее сегодня. Отчасти это объясняется склонностью людей верить в вечные истины, а также находить утешение в мысли, что, хотя мы стареем и умираем, Вселенная всегда остается неизменной.

До XX века никто не предполагал, что Вселенная может расширяться или сжиматься.

Даже те, кто понимал, что в соответствии с теорией гравитации Ньютона Вселенная не может быть стацио-

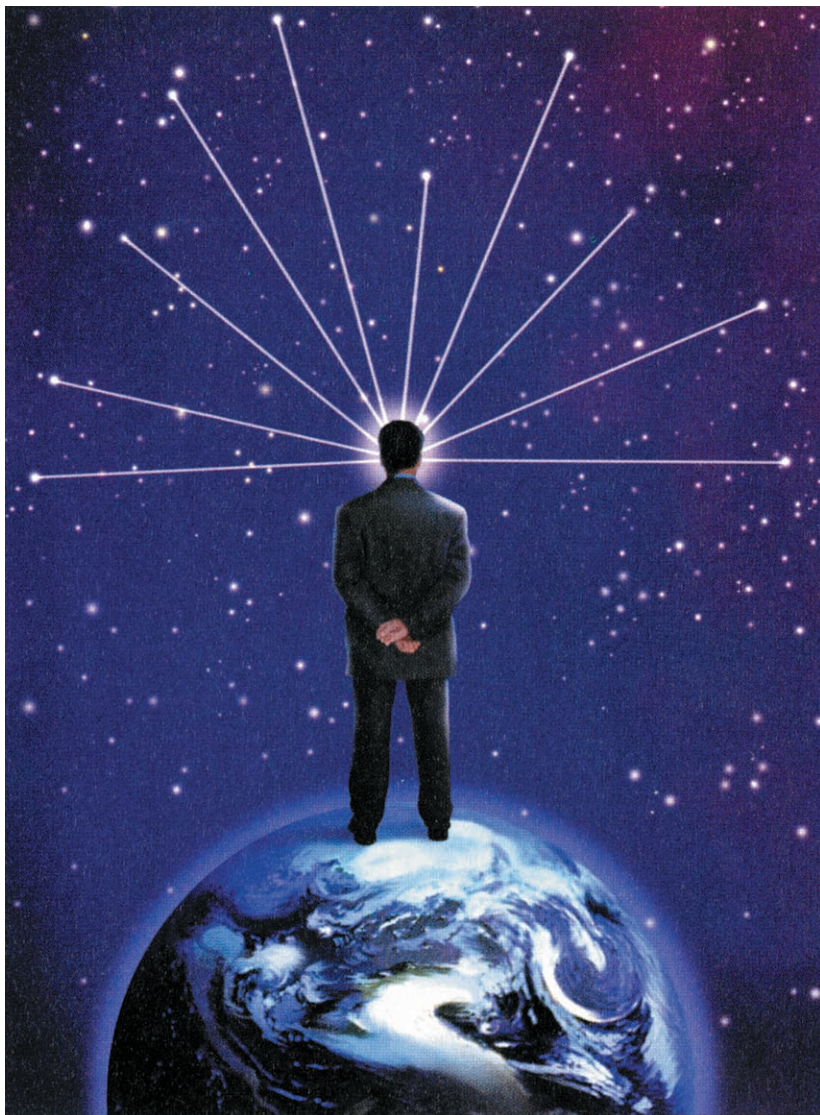


Когда-то люди считали, что бесконечное число звезд может находиться в равновесии, поскольку силы притяжения между близкими звездами уравновешиваются силами отталкивания между далекими. Однако сегодня мы понимаем, что такое равновесие было бы неустойчивым. Скопление Квинтоль, одно из крупнейших молодых звездных скоплений в нашей Галактике Млечный Путь, разрушится всего через несколько миллионов лет под действием гравитационных приливных сил в ядре Галактики. Но в течение короткого периода своего существования оно сияет ярче всех остальных звездных скоплений нашей Галактики.

нарной, не решались предположить, что она может расширяться. Вместо этого они пытались подправить теорию, приписывая силе гравитации свойство отталкивания на очень больших расстояниях. Это почти не сказывалось на прогнозах движения планет, но позволяло бесконечному числу звезд находиться в равновесии, поскольку силы притяжения между близко расположенными звездами уравнивались бы силами отталкивания между далекими.

Однако сегодня мы понимаем, что такое равновесие не могло быть устойчивым. Если звезды в некоторой области хотя бы немного приблизятся друг к другу, притяжение между ними станет сильнее и будет преобладать над отталкиванием. Это означает, что звезды продолжат сближаться. С другой стороны, если звезды слегка отдалятся друг от друга, возобладают силы отталкивания и звезды будут удаляться друг от друга.

Еще одно возражение против идеи бесконечной стационарной Вселенной обычно приписывают немецкому философу Генриху Ольберсу. На самом деле многие современники Ньютона обращали внимание на эту проблему, и статья Ольберса, опубликованная в 1823 г., не была первой из работ, содержащих убедительные рассуждения на эту тему. Однако она первой получила широкую известность. Трудность заключается в том, что в бесконечной стационарной Вселенной почти любой луч зрения должен упираться в поверхность звезды. Из этого следует, что все небо должно светиться так же ярко, как Солнце, даже ночью. Тогда Ольберс высказал мысль, что свет далеких звезд ослабляется из-за поглощения веществом, находящимся на его пути. Однако в таком случае межзвездное вещество со временем должно было бы нагреться и засиять так же ярко, как звезды.



Звезды в бесконечной стационарной Вселенной.

В бесконечной стационарной Вселенной почти любой луч зрения должен упираться в поверхность какой-нибудь звезды.

Избежать вывода о том, что ночное небо должно сиять так же ярко, как поверхность Солнца, можно только в том случае, если предположить, что звезды не светят вечно, а зажглись в какой-то определенный момент в прошлом. В таком случае, возможно, межзвездное вещество еще не успело нагреться или свет самых далеких звезд пока нас не достиг. И это подводит нас к вопросу о том, что заставило звезды зажечься.

ЗАРОЖДЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Разумеется, люди издревле размышляли о зарождении Вселенной. Во многих древних учениях о Вселенной, относящихся к еврейской, христианской или мусульманской традиции, Вселенная возникла в определенный конечный момент времени не так давно в прошлом. Одним из доводов в пользу такого начала было убеждение, что для существования Вселенной необходима первопричина.

Еще один довод выдвинул Блаженный Августин в своем труде «О граде Божьем». Он обратил внимание на развитие цивилизации и на то, что мы помним, кто совершил определенное деяние или создал какое-то изобретение. Значит, человечество, а также, возможно, и Вселенная существуют не так давно. Иначе мы бы ушли по пути прогресса гораздо дальше.

Опираясь на Книгу Бытия, Блаженный Августин относил сотворение Вселенной примерно к 5000 г. до н. э. Что любопытно, эта дата не так уж далека от окончания последнего ледникового периода (около 10 000 лет до н. э.), когда зародилась цивилизация. С другой стороны, Аристотелю и большинству древнегреческих философов не нравилась идея сотворения мира, поскольку она требовала слишком большого божественного вмешательства. Поэтому они верили, что человечество и мир вокруг нас существовали и, возможно, будут существовать вечно. Они тоже обдумывали упомянутый выше аргумент о прогрессе цивилизации и отвечали на него идеями о периодически происходящих наводнениях и других стихийных бедствиях, которые отбрасывают человечество к началу цивилизации.

В те времена, когда большинство людей верили в стационарную и неизменную Вселенную, вопрос о том, имеет ли она начало, относился к области метафизики или теологии. Каждый мог объяснять наблюдаемые явления по-своему. Кто-то верил, что Вселенная существует вечно, другие полагали, что она была приведена в движение в определенный момент времени, причем таким образом, что создается впечатление, будто она существовала всегда. Но в 1929 г. Эдвин Хаббл совершил революционное открытие, обнаружив, что в каком бы направлении мы ни посмотрели, далекие звезды стремительно удаляются от нас. Другими словами, Вселенная расширяется. Это означает, что в прошлом небесные тела находились ближе друг к другу. На самом деле складывалось впечатление, что примерно 10–20 млрд лет назад все они находились в одной точке пространства.

Это открытие окончательно перевело вопрос о зарождении Вселенной в сферу науки. Наблюдения Хаббла

свидетельствовали о том, что был момент, называемый Большим взрывом, когда Вселенная была бесконечно мала и, значит, не могла повлиять на то, что происходит в настоящее время. А тем, что не имеет никаких наблюдательных последствий, можно пренебречь.

Можно сказать, что время началось в момент Большого взрыва — то есть мы не можем определить, что было до него. Необходимо подчеркнуть, что этот момент начала времени существенно отличается от всего, что рассматривалось прежде. В неизменной Вселенной начало времени — это нечто, что должно быть установлено извне. Нет никакой физической необходимости существования такого начала. Можно представить, что Бог сотворил Вселенную практически в любой момент времени в прошлом. С другой стороны, если Вселенная расширяется, то могут быть физические причины существования момента начала. Кто-то может по-прежнему верить, что Бог создал Вселенную в момент Большого взрыва. Он даже мог создать ее позднее, но таким образом, чтобы казалось, будто произошел Большой взрыв. Однако бессмысленно было бы предполагать, что Вселенная создана до Большого взрыва. Расширяющаяся Вселенная не исключает возможность существования Творца, но накладывает ограничения на время, когда он мог выполнять свою работу.

Лекция вторая

Расширяющаяся Вселенная

Наше Солнце и ближайшие к нему звезды являются частью обширного звездного скопления — галактики Млечный Путь. Долгое время люди думали, что это и есть вся Вселенная. Только в 1924 г. американский астроном Эдвин Хаббл показал, что наша Галактика — не единственная во Вселенной. На самом деле существует много других галактик, разделенных огромными участками пустого пространства. Чтобы доказать это, ему потребовалось измерить расстояния до этих галактик. Мы можем определить расстояния до ближайших звезд, наблюдая изменение их положений на небе по мере обращения Земли вокруг Солнца. Но другие галактики находятся так далеко, что в отличие от ближайших звезд кажутся неподвижными. Поэтому Хабблу пришлось использовать косвенные методы измерения расстояний.

Видимый блеск звезды зависит от двух факторов — ее светимости и расстояния от нас. Для ближайших звезд мы можем измерить видимый блеск и расстояние, что позволяет рассчитать их светимость. И наоборот, если бы мы знали светимость звезд из других галактик, мы могли бы вычислить расстояния до них, измерив их

видимый блеск. Хаббл утверждал, что существуют определенные типы звезд, всегда имеющие одинаковую светимость (если удастся ее измерить благодаря тому, что эти звезды находятся достаточно близко от нас). Следовательно, если мы найдем такие звезды в другой галактике, мы можем предположить, что они имеют такую же светимость. Таким образом, мы могли бы вычислить расстояние до этой галактики. Если расстояния, рассчитанные для множества звезд из одной и той же галактики, совпадают, то мы можем быть вполне уверены в полученных результатах. Таким способом Эдвин Хаббл вычислил расстояния до девяти разных галактик.

Мы можем определить расстояния до ближайших звезд, наблюдая изменение их положений на небе по мере обращения Земли вокруг Солнца.

В настоящее время мы знаем, что наша Галактика — лишь одна из сотен миллиардов галактик, наблюдаемых с помощью современных телескопов и состоящих из сотен миллиардов звезд. Мы живем в медленно вращающейся Галактике размером около ста тысяч световых лет; звезды в ее спиральных рукавах обращаются вокруг ее центра с периодом около ста миллионов лет. Наше Солнце — самая обычная желтая звезда средних размеров, расположенная близ внешнего края одного из спиральных рукавов. Несомненно, мы продвинулись далеко вперед со времен Аристотеля и Птолемея, когда Земля считалась центром Вселенной.

Звезды находятся так далеко от нас, что кажутся всего лишь светящимися точками. Мы не можем определить их



В галактике NGC 4214, находящейся на расстоянии около 13 млн световых лет от Земли, идет процесс образования скоплений новых звезд из межзвездного газа и пыли. На этом снимке, полученном на телескопе «Хаббл», мы видим этапы образования и эволюции звезд и звездных скоплений. Самые молодые из этих звездных скоплений расположены в правом нижнем углу снимка, где они выглядят, как несколько ярких сгустков светящегося газа.

Здесь молодые, горячие звезды отображаются белым и голубоватым цветом, поскольку они имеют высокие поверхностные температуры — от 10 000 до 50 000 °С. Переводя взгляд от самых молодых скоплений по направлению к левому нижнему углу, мы видим более старое звездное скопление. Самый удивительный объект на этом снимке расположен поблизости от центра галактики NGC 4214 — это скопление, состоящее из сотен массивных голубых звезд, каждая из которых более чем в 10 тыс. раз ярче нашего Солнца.

размер или форму. Как же нам различать разные типы звезд? Для подавляющего большинства звезд наблюдению поддается только одна характеристика — цвет испу-

скаемого ею света. Ньютон открыл, что при прохождении через призму солнечный свет разделяется на цветные компоненты — спектр, — как в радуге. Наведя телескоп на конкретную звезду или галактику, можно наблюдать спектр света, идущего от этого объекта.

Как же нам различать разные типы звезд? Для подавляющего большинства звезд наблюдению поддается только одна характеристика — цвет испускаемого ею света.

Спектры звезд отличаются, но относительная яркость разных цветов спектра всегда соответствует той, которая наблюдается в свечении сильно раскаленных объектов. Следовательно, по спектру звезды мы можем оценить ее температуру. Более того, мы видим, что некоторые специфические цвета в спектре звезд отсутствуют, причем у разных звезд отсутствуют разные цвета. Мы знаем, что каждый химический элемент поглощает характерный только для него набор специфических цветов. Таким образом, сопоставляя эти цвета с теми, которые отсутствуют в спектре звезды, мы можем определить, какие химические элементы содержатся в атмосфере звезды.

В 1920-х годах, когда астрономы начали изучать спектры звезд из других галактик, они обнаружили удивительный факт: у этих звезд наблюдается такой же характерный набор отсутствующих спектральных линий, как и у звезд нашей Галактики, но эти линии смещены на одинаковую величину в сторону красной области спектра. Единственное разумное объяснение заключалось в том, что галактики удаляются от нас и частота излучаемых ими световых



На одном из снимков самых дальних уголков Вселенной, полученном с помощью космического телескопа «Хаббл», представлена популяция слабых голубых галактик, которые оказались самым распространенным классом объектов во Вселенной.

Они удалены от нас на расстояние от 3 до 8 млрд световых лет. Это говорит о том, что они в изобилии встречались, когда Вселенная была в несколько раз моложе, чем сейчас. Но в настоящее время они встречаются редко, и обнаружить их трудно, поскольку излучение их ослабло или они подверглись саморазрушению. Если удастся разгадать загадку образования и эволюции этих голубых карликовых галактик, то, возможно, это даст нам новый ключ к пониманию процесса эволюции галактик, включая образование нашей Галактики Млечный Путь. Эти галактики — голубые, поскольку в них происходят эпизоды интенсивного звездообразования, во время которых рождается много молодых, горячих, голубых звезд.

волн уменьшается вследствие эффекта Доплера (это явление называют красным смещением). Прислушайтесь к звуку автомобиля на дороге. Когда автомобиль приближается, звук его двигателя кажется выше, что соответствует более высокой частоте звуковых волн; а когда он проехал мимо и удаляется, звук двигателя кажется более низким. То же самое происходит и со световыми (или радиальными) волнами. На самом деле с помощью эффекта Доплера полиция измеряет скорость автомобилей по изменению частоты отраженного радиосигнала.

После того как Хаббл доказал существование других галактик, он занялся составлением каталога расстояний до них и наблюдением их спектров. В то время большинство ученых полагали, что галактики движутся достаточно хаотично, и поэтому надеялись найти примерно одинаковое число спектров, смещенных в синюю и красную область. Когда оказалось, что все галактики имеют красное смещение, это стало сенсацией. Получается, что все галактики удаляются от нас. Еще более удивительным был результат, опубликованный Хабблом в 1929 г.: даже величина красного смещения галактики не случайна, а прямо пропорциональна расстоянию до нее. Другими словами, чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется от нас. А это означало, что Вселенная не может быть стационарной, как думали раньше. В действительности она расширяется. Расстояние между галактиками все время растет.

Даже величина красного смещения галактики не случайна, а прямо пропорциональна расстоянию до нее — чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется от нас.

Открытие расширения Вселенной — одна из величайших интеллектуальных революций XX века. Когда знаешь об этом, кажется удивительным, что никто не догадался об этом раньше. Ньютон и другие мыслители должны были понять, что стационарная Вселенная вскоре начала бы сжиматься под действием гравитации. Но представьте, что Вселенная не стационарна, а расширяется. Если бы она расширялась достаточно медленно, со временем сила гравитации положила бы конец расширению, и Вселенная начала бы сжиматься. Однако если она расширялась бы со скоростью, превышающей некоторое критическое значение, силы гравитации никогда бы не стали настолько велики, чтобы остановить это расширение, и Вселенная продолжала бы расширяться вечно. Это напоминает запуск ракеты с поверхности Земли. Если скорость ракеты достаточно низкая, в определенный момент под действием гравитации ракета остановится и начнет падать обратно. С другой стороны, если ее скорость превышает некоторое критическое значение (приблизительно 11,2 км/с), сила притяжения не сможет «вернуть» ракету на Землю, и она будет удаляться от нашей планеты.

Такое поведение Вселенной можно было предсказать на основе ньютоновской теории гравитации в XIX или XVIII столетиях и даже в конце XVII века. Но вера в стационарность Вселенной была столь сильна, что эта концепция просуществовала до начала XX века. Даже Эйнштейн, когда сформулировал общую теорию относительности в 1915 г., был уверен в том, что Вселенная должна быть стационарной. Поэтому он модифицировал свою теорию, введя в уравнения так называемую космологическую постоянную. Это была новая сила «антигравитации», которая, в отличие от других сил, не имела



Чтобы определить, прекратится ли расширение Вселенной и начнет ли она со временем сжиматься или будет расширяться вечно, можно сравнить ее с ракетой, удаляющейся от Земли. Если скорость ракеты достаточно низкая, со временем под действием гравитации она остановится и начнет падать обратно на Землю. Если же скорость ракеты превышает критическое значение (около 11,2 км/с), сила притяжения не сможет «вернуть» ракету на Землю, и она будет удаляться от нашей планеты вечно. Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) успешно запустило более двухсот искусственных спутников, обращающихся вокруг Земли, в том числе восьмую орбитальную солнечную обсерваторию Годдарда, которая находилась на борту этой ракеты «Дельта», стартовавшей 21 июня 1975 г. с мыса Канаверел во Флориде.

конкретного источника, но была встроена в саму ткань пространства-времени. Эта космологическая постоянная наделяла пространство-время внутренней тенденцией к расширению и позволяла уравновесить взаимное притяжение всей материи во Вселенной и сделать возможным существование стационарной Вселенной.

По-видимому, в те времена лишь один человек был готов принять общую теорию относительности за чистую монету. Пока Эйнштейн и другие физики искали способы обойти предсказание общей теории относительности о нестационарности Вселенной, русский физик Александр Фридман занялся объяснением этого предсказания.

Даже Эйнштейн, когда сформулировал общую теорию относительности в 1915 г., был уверен в том, что Вселенная должна быть стационарной.

МОДЕЛИ ФРИДМАНА

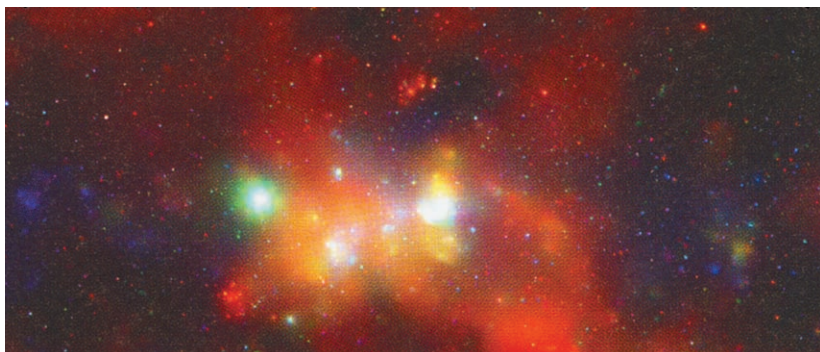
Уравнения общей теории относительности, описывающие эволюцию Вселенной, слишком сложны, чтобы решать их во всех подробностях. Поэтому Фридман сделал два очень простых предположения: в каком бы направлении мы ни посмотрели, Вселенная выглядит одинаково, причем то же предположение верно при наблюдении из любой другой точки пространства. На основе общей теории относительности и двух этих предположений Фридман показал, что Вселенная не может

быть стационарной. Получается, что в 1922 г. Фридман предсказал именно то, что спустя несколько лет открыл Эдвин Хаббл.

Фридман сделал два очень простых предположения о природе Вселенной: в каком бы направлении мы ни посмотрели, Вселенная выглядит одинаково, причем то же предположение верно при наблюдении из любой другой точки.

Предположение о том, что Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях, очевидно, не соответствует действительности. Например, остальные звезды нашей галактики образуют на ночном небе отчетливо различимую светящуюся полосу, называемую Млечным Путем. Но если мы посмотрим на далекие галактики, нам покажется, что в любом направлении их число примерно одинаково. То есть Вселенная почти одинакова во всех направлениях, если рассматривать ее в космических масштабах, сопоставимых с расстояниями между галактиками.

Долгое время это было достаточным подтверждением правильности предположения Фридмана как грубой аппроксимации реальной Вселенной. Но сравнительно недавно счастливый случай доказал, что на самом деле предположение Фридмана поразительно точно описывает нашу Вселенную. В 1965 г. два американских физика Арно Пензиас и Роберт Уилсон работали в Лабораториях Белла в Нью-Джерси над проектом очень чувствительного микроволнового приемника для связи с орбитальными искусственными спутниками. Их беспокоило, что прибор улавливает больше шума, чем следовало бы, при-



С помощью Космической рентгеновской обсерватории «Чандра» удалось получить удивительную высокоэнергетичную панораму центральных областей нашей Галактики Млечный Путь. На этом кадре размером 400×900 световых лет, составленном из нескольких снимков, можно увидеть сотни белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр, плавающих в раскаленном тумане из газа с температурой много миллионов градусов.

чем этот шум приходил не с какого-то определенного направления. Сначала они проверили, нет ли на приемнике птичьего помета, и поискали другие возможные неисправности, но вскоре поняли, что дело не в этом. Им было известно, что если источник шума находится в атмосфере, то шум будет сильнее, когда приемник направлен не вертикально вверх, поскольку под углом к вертикали толщина атмосферы выше.

Дополнительный шум оставался одинаковым независимо от того, в каком направлении поворачивали приемник. Следовательно, источник шума должен был находиться за пределами атмосферы. Кроме того, шум оставался неизменным днем и ночью на протяжении всего года, и это при том, что Земля вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца. Следовательно, источ-

ник этого излучения должен находиться за пределами Солнечной системы и даже вне нашей Галактики, ведь в противном случае сигнал менялся бы по мере того, как в процессе движения Земли приемник оказывался бы ориентирован в разных направлениях.

Дополнительный шум оставался одинаковым независимо от того, в каком направлении поворачивали приемник. Следовательно, источник шума должен был находиться за пределами атмосферы.

На самом деле мы знаем, что на пути к нам это излучение должно было пересечь большую часть наблюдаемой Вселенной. Коль скоро оно одинаково в разных направлениях, то и Вселенная должна быть одинакова во всех направлениях, по крайней мере на больших масштабах. В настоящее время нам известно, что в каком бы направлении мы ни повернули приемник, колебания этого шума никогда не превышают 0,01 %. Таким образом, Пензиас и Уилсон случайно наткнулись на поразительно точное подтверждение первого предположения Фридмана.

Примерно в то же время два американских физика Боб Дик и Джим Пиблс из соседнего Принстонского университета также заинтересовались микроволновым излучением. Они работали над гипотезой Джорджа Гамова (в прошлом — студента Александра Фридмана) о том, что Вселенная на ранних стадиях своей эволюции была очень плотной и горячей, раскаленной добела. Дик и Пиблс утверждали, что мы все еще можем наблюдать это свечение, поскольку свет из самых далеких уголков

ранней Вселенной только-только достигает нас сейчас. Однако из-за расширения Вселенной этот свет должен иметь очень большое красное смещение и должен восприниматься нами как микроволновое излучение. Дик и Пиблс занимались поисками этого излучения, когда Пензиас и Уилсон узнали об их работе и поняли, что уже нашли его. За это открытие Пензиас и Уилсон в 1978 г. были удостоены Нобелевской премии, что представляется несколько несправедливым по отношению к Дику и Пиблсу.

На первый взгляд, все эти доказательства того, что Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях, порождают идею о нашем особом месте во Вселенной. В частности, может показаться, что если все остальные галактики удаляются от нас, то мы находимся в центре Вселенной. Однако существует и другое объяснение: Вселенная может выглядеть одинаково во всех направлениях и при наблюдении из любой другой галактики. Как мы знаем, таково было второе предположение Фридмана.

Может показаться, что если все остальные галактики удаляются от нас, то мы находимся в центре Вселенной.

У нас нет никаких доказательств, подтверждающих или опровергающих это предположение. Мы принимаем его на веру только из скромности. Было бы в высшей степени удивительно, если бы Вселенная выглядела одинаковой во всех направлениях вокруг нас, но вела себя по-другому вокруг любой другой точки. В модели Фридмана все галактики удаляются друг от друга. Эта ситуация

напоминает непрерывно надуваемый воздушный шарик, на котором нарисовано множество пятнышек. При надувании шарика расстояние между любыми двумя пятнышками увеличивается, но ни одно из них нельзя назвать центром расширения. Более того, чем больше расстояние между пятнышками, тем быстрее они удаляются друг от друга. Так же и в модели Фридмана скорость разбегания любых двух галактик пропорциональна расстоянию между ними. Следовательно, величина красного смещения галактики должна быть прямо пропорциональна ее удаленности от нас, что и обнаружил Хаббл.

Несмотря на то, что модель Фридмана была удачной и позволила предсказать результаты наблюдений Хаббла, работа Фридмана долгое время оставалась почти неизвестной на Западе. О ней узнали лишь после того, как в 1935 г. подобные модели были разработаны американским физиком Говардом Робертсоном и английским математиком Артуром Уолкером для объяснения равномерного расширения Вселенной, открытого Хабблом.

Фридман предложил только одну модель, однако на основе двух его фундаментальных предположений можно построить три разных вида моделей. В первой модели, которую и сформулировал Фридман, Вселенная расширяется достаточно медленно, так что гравитационное притяжение между галактиками замедляет его, а со временем приводит и к его прекращению. Затем галактики начинают двигаться по направлению друг к другу, и Вселенная сжимается. Сначала расстояние между двумя соседними галактиками равно нулю, затем оно увеличивается до некоторого максимального значения, а потом снова уменьшается до нуля.

Во втором решении Вселенная расширяется настолько быстро, что гравитационное притяжение никогда не

сможет его остановить, хотя и немного замедляет его. В этой модели расстояние между соседними галактиками сначала равно нулю, а в конечном итоге они разбегаются с постоянной скоростью.

Наконец, существует третье решение, в котором скорость расширения Вселенной достаточна лишь для того, чтобы предотвратить обратное сжатие. В этом случае расстояние между галактиками сначала равно нулю, и оно постоянно растет. Однако скорость разбегания галактик все время уменьшается, но никогда не достигает нуля.

Замечательной особенностью первой модели Фридмана была идея о том, что Вселенная не бесконечна в пространстве, но пространство не имеет границ. Гравитация настолько сильна, что пространство искривляется, замыкаясь само на себя наподобие поверхности Земли. Путешествуя по поверхности Земли в определенном направлении, человек никогда не встретит непреодолимого препятствия и не упадет за край, но в конечном итоге вернется в исходную точку. В первой модели Фридмана пространство устроено так же, но имеет три измерения вместо двух, присущих поверхности Земли. Четвертое измерение — время — также является конечным, но напоминает линию с двумя краями или границами, началом и концом. Далее мы увидим, что если объединить общую теорию относительности с квантовомеханическим принципом неопределенности, пространство и время могут быть конечны, но при этом не иметь краев или границ. Идея путешествия вокруг Вселенной с возвращением в исходную точку хороша для научной фантастики, но не имеет практической ценности, поскольку можно доказать, что еще до завершения такого путешествия Вселенная сжалась

бы обратно до нулевого размера. Чтобы вернуться в исходную точку до того, как Вселенная перестанет существовать, необходимо двигаться быстрее света, а это невозможно.

В первой модели Фридмана гравитация настолько сильна, что пространство искривляется, замыкаясь само на себя наподобие поверхности Земли.

Так какая из моделей Фридмана описывает нашу Вселенную? Прекратит ли Вселенная расширяться и начнет сжиматься, или она будет расширяться вечно? Чтобы ответить на этот вопрос, нам необходимо знать скорость расширения Вселенной и ее среднюю плотность в настоящее время. Если эта плотность меньше некоторого критического значения, зависящего от скорости расширения, гравитационное притяжение будет слишком слабым для того, чтобы остановить расширение. Если плотность больше этого критического значения, рано или поздно гравитация остановит расширение и заставит Вселенную сжиматься.

Мы можем определить современную скорость расширения Вселенной, измерив скорости, с которыми другие галактики удаляются от нас, с помощью эффекта Доплера. Это можно проделать с высокой точностью. Однако расстояния до галактик известны не очень точно, поскольку мы можем измерить их лишь косвенно. Поэтому мы знаем только то, что Вселенная расширяется на 5–10 % за каждый миллиард лет. Впрочем, текущая средняя плотность Вселенной известна нам с еще меньшей точностью.

Мы можем определить современную скорость расширения Вселенной, измерив скорости, с которыми другие галактики удаляются от нас, с помощью эффекта Доплера.

Если суммировать массы всех наблюдаемых звезд нашей и других галактик, получается меньше сотой доли значения, необходимого для того, чтобы остановить расширение Вселенной, даже при использовании нижней оценки скорости расширения. Однако нам известно, что в нашей и других галактиках должно содержаться большое количество темной материи, которую мы не можем наблюдать непосредственно, но о существовании которой мы знаем благодаря влиянию ее гравитационного притяжения на орбиты звезд и газ в галактиках. Более того, большинство галактик образуют скопления, и мы можем предположить наличие еще большего количества темного вещества между галактиками в этих скоплениях по его влиянию на движение галактик. Сложив все это темное вещество, мы все равно получим лишь одну десятую величины, необходимой для остановки расширения. Впрочем, может существовать какая-то другая форма материи, которую мы пока не обнаружили и которая может увеличить среднюю плотность Вселенной до критического значения, необходимого для того, чтобы остановить расширение. Таким образом, современные наблюдения дают основания предполагать, что Вселенная будет расширяться вечно. Но не стоит делать на это ставку. Мы можем быть уверены лишь в том, что если Вселенная все-таки начнет сжиматься, это произойдет не раньше чем через десять миллиардов лет, поскольку по меньшей

мере столько времени она расширяется. Не стоит напрасно беспокоиться по этому поводу, поскольку к тому времени человечество уже давно погибнет вместе с нашим Солнцем, если не создаст колонии за пределами Солнечной системы.

Если Вселенная начнет сжиматься, это произойдет не раньше чем через десять миллиардов лет.

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

Характерной особенностью всех решений Фридмана является то, что в некоторый момент в прошлом, от 10 до 20 млрд лет назад, расстояние между соседними галактиками должно было равняться нулю. В тот момент, который мы называем Большим взрывом, плотность Вселенной и кривизна пространства-времени были бесконечными. Это означает, что общая теория относительности, на основе которой построены решения Фридмана, предсказывает существование во Вселенной точки сингулярности.

Все научные теории основываются на предположении о том, что пространство-время является гладким и почти плоским, то есть все эти теории теряют силу в сингулярности Большого взрыва, когда кривизна пространства-времени бесконечна. Это означает, что даже если до Большого взрыва и происходили какие-то события, их нельзя использовать для определения того, что случится после него, поскольку в момент Большого взры-

ва предсказуемость нарушается. Соответственно, если нам известно только то, что произошло после Большого взрыва, мы не можем определить, что происходило до него. Применительно к нам события до Большого взрыва не имеют никаких последствий, поэтому не могут быть частью научной модели Вселенной. Таким образом, мы должны исключить их из модели и сказать, что началом времени является момент Большого взрыва.

Предпринималось множество попыток избежать вывода о существовании Большого взрыва.

Многим не нравится идея о том, что время имеет начало, вероятно, потому, что она отдает божественным вмешательством. (Католическая церковь, наоборот, ухватилась за модель Большого взрыва и в 1951 г. официально провозгласила, что эта модель соответствует Библии.) Предпринималось множество попыток избежать вывода о существовании Большого взрыва. Широкую поддержку получила теория стационарной Вселенной. Она была предложена в 1948 г. двумя учеными, бежавшими из оккупированной нацистами Австрии, Германом Бонди и Томасом Голдом, в соавторстве с британским ученым Фредом Хойлом, который в годы войны работал вместе с ними над усовершенствованием радаров. Идея заключалась в том, что по мере удаления галактик друг от друга в промежутках между ними постоянно образуются новые галактики из новой материи, которая непрерывно создается. В этом случае Вселенная будет выглядеть примерно одинаково в любой момент времени и в любой точке пространства.

Теория стационарной Вселенной требовала так изменить общую теорию относительности, чтобы допустить возможность непрерывного создания новой материи, но скорость ее образования была настолько низкой (примерно одна частица на кубический километр в год), что она не противоречила экспериментальным данным. Это была хорошая научная теория в том смысле, что она была проста, и ее предсказания можно было проверить с помощью наблюдений. Одно из таких предсказаний заключалось в том, что число галактик или подобных им объектов в любом заданном объеме пространства должно быть одним и тем же в любой момент времени и в любой точке Вселенной.

В конце 50-х — начале 60-х гг. XX века группа астрономов из Кембриджа под руководством Мартина Райла исследовала источники радиоволн, приходящих из космоса. Они выяснили, что большинство таких радиоисточников должны находиться за пределами нашей Галактики и что слабых источников гораздо больше, чем сильных. Они решили, что слабые источники находятся дальше от нас, а сильные — поблизости. Затем обнаружилось, что в единице объема близких источников меньше, чем далеких.

Это могло означать, что мы находимся в центре большой области Вселенной, в которой таких источников меньше, чем в других областях. Или то, что в прошлом, когда эти радиоволны только начали свой путь к нам, таких источников было больше, чем в настоящее время. Оба объяснения противоречили предсказаниям теории стационарной Вселенной. Более того, открытие микроволнового излучения, совершенное Пензиасом и Уилсоном в 1965 г., указывало на то, что в прошлом плотность Вселенной была гораздо выше. Поэтому, как ни печально, от теории стационарной Вселенной пришлось отказаться.

Еще одна попытка избежать вывода о существовании Большого взрыва и начала времени была предпринята русскими учеными Евгением Лифшицем и Исааком Халатниковым в 1963 г. Они предположили, что Большой взрыв может представлять собой специфическую особенность моделей Фридмана, которые, в конце концов, являются лишь приблизительным описанием реальной Вселенной. Возможно, из всех моделей, приближенно описывающих реальную Вселенную, лишь модели Фридмана содержат сингулярность Большого взрыва. В моделях Фридмана все галактики прямолинейно удаляются друг от друга. Поэтому неудивительно, что когда-то в прошлом все они находились в одной точке. Однако в реальной Вселенной галактики не просто удаляются друг от друга по прямой — их скорости имеют небольшую поперечную компоненту. Так что в действительности они должны были располагаться не в одной точке, а просто очень близко друг к другу. Тогда, возможно, наблюдаемая в настоящее время расширяющаяся Вселенная возникла не из сингулярности Большого взрыва, а из более ранней фазы сжатия. В процессе коллапса Вселенной не все частицы столкнулись друг с другом, некоторые смогли избежать столкновения и разлететься, создав современную картину расширяющейся Вселенной. Можно ли тогда утверждать, что реальная Вселенная началась с Большого взрыва?

Лифшиц и Халатников изучали модели Вселенной, которые были похожи на фридмановские, но учитывали неоднородности и случайное распределение скоростей галактик в реальной Вселенной. Они показали, что такие модели могли бы начинаться с Большого взрыва даже в том случае, если галактики не всегда удаляются друг от друга по прямолинейным траекториям. Но они утвер-

ждали, что такое возможно только в особенных моделях, в которых все галактики движутся особым, «правильным» образом. Лифшиц и Халатников утверждали, что раз моделей, подобных фридмановским, без сингулярности Большого взрыва гораздо больше, чем моделей с сингулярностью, мы должны сделать вывод, что вероятность Большого взрыва крайне мала. Однако в дальнейшем они поняли, что существует гораздо более общий класс моделей, подобных фридмановским, которые содержат сингулярности и в которых галактики не должны двигаться каким-то особым образом. Поэтому в 1970 г. они отказались от своего утверждения.

В реальной Вселенной галактики не просто удаляются друг от друга по прямой — их скорости имеют небольшую поперечную компоненту.

Работа, проделанная Лифшицем и Халатниковым, была важна, поскольку показала, что Вселенная могла иметь сингулярность — Большой взрыв, — если общая теория относительности верна. Однако они не ответили на решающий вопрос: предсказывает ли общая теория относительности существование Большого взрыва, начала времени? Ответ на этот вопрос был дан в рамках совершенно иного подхода, который в 1965 г. предложил британский физик Роджер Пенроуз. Он использовал поведение световых конусов в общей теории относительности и тот факт, что гравитация всегда вызывает притяжение, чтобы показать, что звезда, испытывающая коллапс под действием собственной гравитации, заключена в область, границы которой в итоге сжимаются до

нулевого размера. Это означает, что все вещество звезды окажется в области нулевого объема, так что плотность вещества и кривизна пространства-времени становятся бесконечными. Другими словами, получается сингулярность, содержащаяся в области пространства-времени, известной под названием «черная дыра».

Роджер Пенроуз использовал поведение световых конусов в общей теории относительности и тот факт, что гравитация всегда вызывает притяжение, чтобы показать, что звезда, испытывающая коллапс под действием собственной гравитации, заключена в область, границы которой в итоге сжимаются до нулевого размера.

На первый взгляд, результат Пенроуза не проливал свет на вопрос, существовала ли в прошлом сингулярность Большого взрыва. Однако в то самое время, когда Пенроуз доказал свою теорему, я, будучи аспирантом, упорно искал задачу для завершения своей диссертации. Я понял, что если изменить направление течения времени в теореме Пенроуза на обратное (чтобы коллапс стал расширением), условия этой теоремы останутся прежними, если в настоящее время Вселенная на больших масштабах приблизительно соответствует модели Фридмана. Из теоремы Пенроуза следовало, что коллапс любой звезды должен заканчиваться сингулярностью, а рассуждения с обращением направления времени показали, что любая расширяющаяся Вселенная, соответствующая модели Фридмана, берет свое начало в сингулярности. По техническим причинам теорема Пенроуза требовала,

чтобы Вселенная была бесконечна в пространстве. Я мог использовать это для доказательства того, что сингулярность возникает только в том случае, если Вселенная расширяется достаточно быстро, чтобы избежать последующего коллапса, поскольку только эта модель Фридмана была бесконечна в пространстве.

В течение нескольких следующих лет я разрабатывал новые математические методы, позволяющие исключить это и другие технические условия из теорем, доказывающих необходимость существования сингулярности. Результатом стала опубликованная Пенроузом и мной в 1970 г. совместная статья, в которой доказывалось, что сингулярность Большого взрыва должна была существовать при выполнении всего двух условий: что общая теория относительности верна и что Вселенная содержит столько материи, сколько мы наблюдаем.

Сингулярность Большого взрыва должна была существовать при выполнении всего двух условий: что общая теория относительности верна и что Вселенная содержит столько материи, сколько мы наблюдаем.

Наша работа вызвала много возражений, частично со стороны советских ученых, придерживавшихся «линии партии», сформулированной Лифшицем и Халатниковым, частично со стороны тех, кто питал отвращение к самой идее сингулярностей, нарушающих красоту теории Эйнштейна. Но с математической теоремой трудно поспорить. Поэтому в настоящее время считается общепризнанным, что Вселенная должна иметь начало.

Лекция третья

Черные дыры

Термин «черная дыра» появился совсем недавно. Он был придуман в 1969 г. американским ученым Джоном Уилером для наглядного описания идеи, появившейся более двухсот лет назад. В те времена существовало две теории о природе света. В одной из них говорилось, что свет состоит из частиц, а в другой — из волн. В настоящее время мы знаем, что верны обе теории. Согласно принципу корпускулярно-волнового дуализма, принятому в квантовой механике, свет может рассматриваться и как волна, и как частица. Теория волновой природы света не проясняет, как на него действует гравитация. Но если свет состоит из частиц, можно ожидать, что гравитация действует на них так же, как на пушечные ядра, ракеты и планеты.

В 1783 г. кембриджский преподаватель Джон Мичелл опубликовал в журнале «Философские труды Лондонского королевского общества» статью, посвященную этой гипотезе. В этой статье он обратил внимание на то, что достаточно массивная и компактная звезда должна обладать настолько сильным гравитационным полем, что свет не сможет его преодолеть. Свет, излу-

чаемый с поверхности звезды, не сможет преодолеть гравитационное притяжение звезды и удалиться от нее на значительное расстояние. Мичелл предположил, что таких звезд может быть много. Мы не можем их увидеть, поскольку их свет не достигает нас, однако мы можем «почувствовать» их гравитационное притяжение. Сейчас мы называем такие объекты черными дырами, и это название очень точно отражает их суть, поскольку это черные пустоты в космическом пространстве.

Согласно принципу корпускулярно-волнового дуализма, принятому в квантовой механике, свет может рассматриваться и как волна, и как частица.

Несколько лет спустя, независимо от Мичелла, такую же гипотезу высказал французский ученый маркиз де Лаплас. Примечательно, что он включил ее только в первое и второе издания своей книги «Изложение системы мира» и исключил из последующих изданий, видимо, сочтя эту идею слишком безумной. На самом деле, не очень логично рассматривать свет, как пушечные ядра в ньютоновской теории гравитации, поскольку скорость света постоянна. Ядро, выпущенное из пушки вверх, замедлится под действием силы тяжести, затем остановится и упадет обратно. Фотон же должен продолжать лететь вверх с постоянной скоростью. Как же воздействует на свет ньютоновская сила тяжести? Последовательной теории воздействия гравитации на свет не существовало до тех пор, пока Эйнштейн не представил в 1915 г. свою общую теорию относитель-



Достаточно массивная и компактная звезда обладает настолько сильным гравитационным полем, что свет не может его преодолеть. Такую звезду называют черной дырой. Систематической теории воздействия гравитации на свет не существовало до тех пор, пока Эйнштейн не сформулировал в 1915 г. общую теорию относительности.

ности. И даже после этого прошло еще немало времени до того, как были сформулированы выводы этой теории для массивных звезд.

Чтобы понять, как образуется черная дыра, необходимо разобраться в жизненном цикле звезды. Звезда образуется, когда большое количество газа, преимущественно водорода, начинает сжиматься под действием

собственной гравитации. По мере сжатия атомы газа все чаще сталкиваются друг с другом и приобретают все большую скорость — газ нагревается. Со временем газ нагреется до такой температуры, что атомы водорода при столкновении не будут разлетаться в разные стороны, а начнут сливаться, образуя атомы гелия. Именно тепло, которое выделяется во время этой реакции, напоминаящей контролируемый взрыв водородной бомбы, и заставляет светиться звезды. Этот дополнительный нагрев ведет также к увеличению давления газа до тех пор, пока оно не уравновесит гравитационное притяжение — тогда газ прекратит сжиматься. Нечто подобное происходит с воздушным шариком: давление воздуха, находящегося внутри него, стремится его растянуть, а силы упругости резиновой оболочки стремятся сделать его меньше.

В таком устойчивом состоянии, когда воздействие тепла, выделяющегося при ядерных реакциях, уравнивается силой гравитации, звезды могут пребывать длительное время. Однако со временем у звезды закончится водород и другое ядерное топливо. И, как ни парадоксально, чем больше топлива изначально было у звезды, тем быстрее оно закончится. Дело в том, что чем массивнее звезда, тем больше тепла ей требуется для противодействия гравитации. А чем она горячее, тем быстрее она израсходует свое топливо. Нашему Солнцу, по-видимому, хватит топлива еще примерно на пять миллиардов лет, но более массивные звезды могут израсходовать свое топливо всего за один миллиард лет, что гораздо меньше возраста Вселенной. Когда у звезды кончается топливо, она начинает остывать и сжиматься. Что может произойти потом, начали понимать лишь в конце 1920-х годов.



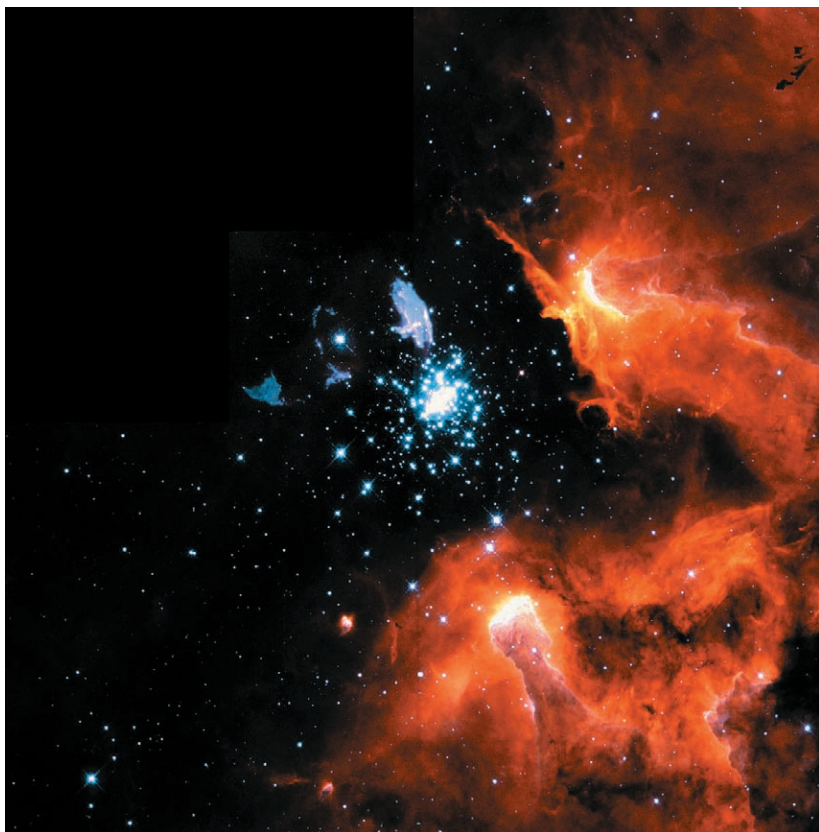
Художественное изображение Кольца Эйнштейна, наблюдаемого, когда два массивных объекта находятся на одном луче зрения. Здесь черная дыра (в центре) находится между Землей и некоторой галактикой. Свет, идущий от далекой галактики, отклоняется при прохождении вблизи черной дыры под действием сильнейшего гравитационного поля последней, образуя световое кольцо. Это явление называют гравитационным линзированием. Идея искривления траектории света под действием гравитации была высказана Альбертом Эйнштейном в общей теории относительности (1915 г.). За последние несколько лет было открыто множество гравитационных линз.

Чем больше топлива было у звезды изначально, тем быстрее оно закончится. Когда у звезды кончается топливо, она начинает остывать и сжиматься.

В 1928 г. индийский аспирант Субраманьян Чандрасекар отплыл в Англию, чтобы обучаться в Кембридже у британского астронома сэра Артура Эддингтона, который был специалистом по общей теории относительности. Рассказывают, что в начале 1920-х годов



На этой комбинации из 1999 снимков загадочной сложной структуры в туманности Киля, полученных на телескопе «Хаббл», можно разглядеть множество темных глобул малых размеров, которые могут находиться в процессе гравитационного сжатия, ведущего к образованию новых звезд. Два газопылевых облака впечатляющих размеров с резко очерченными краями расположены внизу в центре и около левой верхней границы изображения. Возможно, со временем эти большие темные облака испарятся или, если в них имеются достаточно плотные сгущения, породят небольшие звездные скопления. Туманность Киля диаметром более 200 световых лет является одним из интереснейших объектов Млечного Пути в небе Южного полушария.



На этом изображении, полученном в естественных цветах, космический телескоп «Хаббл» (NASA) зафиксировал разные стадии жизненного цикла звезд. Выше и левее центра расположен проэволюционировавший голубой сверхгигант SHER 25. Около центра изображения находится так называемое молодое звездное скопление, где доминируют молодые, горячие звезды Вольфа-Райе и ранние звезды O-класса. Мощный поток ионизирующего излучения и быстрые звездные ветры от этих массивных звезд создали большое пустое пространство вокруг этой группы. Темные облака в правом верхнем углу — это так называемые глобулы Бока, которые, вероятно, находятся на более ранней стадии звездообразования.



Планетарная туманность NGC 6369 известна астрономам-любителям под названием «Маленький призрак», поскольку она выглядит как небольшое, похожее на привидение облако, окружающее слабую, умирающую центральную звезду. Когда звезда с массой порядка массы Солнца приближается к концу своего существования, ее размер увеличивается и она превращается в красный гигант. Стадия красного гиганта заканчивается, когда звезда сбрасывает свои внешние оболочки в космос и вокруг нее образуется слабо светящаяся туманность. Ядро звезды, оставшееся в центре, посылает поток ультрафиолетового излучения (УФ) в окружающий газ. Далеко за пределами основного тела туманности можно разглядеть еще более тусклые клочки газа, потерянные звездой в начале процесса сброса внешних оболочек. На месте нашего Солнца тоже может когда-нибудь образоваться подобная туманность, но в течение ближайших 5 млрд лет этого не произойдет. Облако газа будет расширяться, удаляясь от звезды со скоростью несколько десятков километров в секунду, и через несколько десятков тысяч лет растворится в межзвездном пространстве. После этого «тлеющий уголек» звезды, расположенный в центре, будет постепенно остывать в течение миллиардов лет в виде крошечного белого карлика и со временем погаснет.

один журналист сказал Эддингтону, что, по его данным, всего три человека в мире поняли общую теорию относительности. В ответ Эддингтон поинтересовался: «Кто же третий?»

Во время своего путешествия из Индии Чандрасекар рассчитал, насколько большой может быть звезда, способная противостоять собственной гравитации после того, как она выработала все топливо. Его идея заключалась в следующем: когда размер звезды уменьшается, расстояние между частицами вещества сокращается. Но принцип запрета Паули гласит, что две частицы вещества не могут занимать одно и то же положение в пространстве и при этом иметь одинаковые скорости. Следовательно, скорости этих частиц должны существенно различаться. Это заставляет частицы разлетаться, что приводит к расширению звезды. Таким образом, звезда может сохранять постоянный радиус благодаря равновесию между притяжением, вызванным гравитацией, и отталкиванием, обусловленным принципом запрета, подобно тому как на предыдущих этапах эволюции звезды гравитация уравнивалась нагревом.

Однако Чандрасекар понимал, что отталкивание, обусловленное принципом запрета, имеет свой предел. Согласно теории относительности, максимальная разность скоростей частиц вещества звезды не может превышать скорость света. Это означает, что, когда плотность звезды достигает определенного значения, отталкивание, связанное с принципом запрета, становится слабее гравитационного притяжения. Чандрасекар рассчитал, что холодная звезда, масса которой больше порядка полутора масс Солнца, не может сопротивляться собственной гравитации. Эта масса получила название *предел Чандрасекара*.

Чандрасекар рассчитал, что холодная звезда, масса которой больше порядка полутора масс Солнца, не может сопротивляться собственной гравитации. Эта масса получила название предел Чандрасекара.

Этот вывод имеет огромное значение для судьбы массивных звезд. Если масса звезды меньше предела Чандрасекара, в какой-то момент она может перестать сжиматься и перейти в возможную финальную фазу, то есть стать *белым карликом* с радиусом в несколько тысяч километров и плотностью порядка сотен тонн в кубическом сантиметре. Существование белого карлика поддерживается благодаря отталкиванию между электронами вещества, обусловленному принципом запрета. Мы наблюдаем множество таких белых карликов. Одним из первых открытых белых карликов стала звезда, вращающаяся вокруг Сириуса — самой яркой звезды ночного неба.

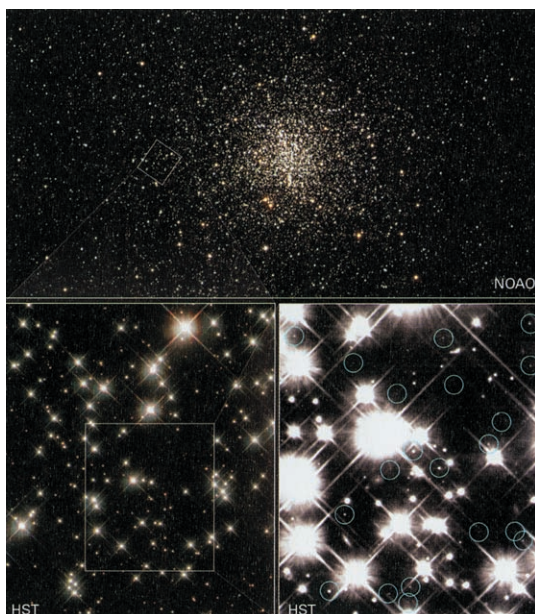
Ученые также понимали, что возможна еще одна финальная стадия эволюции звезды с массой, не превышающей порядка полутора масс Солнца, но имеющих более скромные размеры по сравнению с белым карликом. Существование этих звезд могло бы поддерживаться отталкиванием, обусловленным принципом Паули, но не между электронами, а между протонами и нейтронами. Такие звезды стали называть нейтронными. Их радиус должен составлять около пятнадцати километров, а плотность — порядка сотен миллионов тонн в кубическом сантиметре. Во времена, когда ученые предсказали существование таких звезд, не было никакой возможности наблюдать их.

Прошло много времени, прежде чем нейтронные звезды были обнаружены.

Звезды, массы которых превышают предел Чандрасекара, сталкиваются с большой проблемой, когда их ядерное топливо заканчивается. В некоторых случаях они могут взорваться, или, возможно, им удастся сбросить достаточно вещества, чтобы их масса стала меньше предельного значения. Однако было трудно поверить, что такое происходит всегда, сколь бы велика ни была звезда. Как ей «понять», что пора «сбросить вес»? Пусть даже каждой звезде удастся потерять достаточно массы, но что произойдет, если добавить к белому карлику или нейтронной звезде столько вещества, чтобы их масса превысила предельное значение? Будет ли тогда звезда коллапсировать, то есть сжиматься, до бесконечной плотности?

Эддингтон был потрясен этими выводами и отказался поверить результатам Чандрасекара. Он считал, что звезда просто не может сжаться до размеров точки. Таково же было мнение большинства ученых. Даже Эйнштейн написал статью, в которой утверждал, что звезды не могут сжиматься до нулевого размера. Неприятие со стороны других ученых, особенно Эддингтона, его бывшего наставника и ведущего авторитета в вопросе строения звезд, заставили Чандрасекара прекратить работу в этом направлении и обратиться к решению других астрономических задач. Однако Нобелевской премией, полученной в 1983 г., он, по крайней мере отчасти, обязан своей ранней работе о предельной массе холодных звезд.

Чандрасекар показал, что принцип запрета не может остановить сжатие звезды с массой, превышающей предел Чандрасекара. Но разобраться в том, что произойдет



Если масса звезды меньше предела Чандрасекара, в какой-то момент она может перестать сжиматься и перейти в возможную финальную фазу, то есть стать белым карликом. Мы наблюдаем такие белые карлики в нашей Галактике Млечный Путь. Эти небольшие звезды, расположенные в шаровом скоплении M4, имеют возраст порядка 12–13 млрд лет. Добавив 1 млрд лет, ушедших на образование скопления после Большого взрыва, астрономы вычислили, что возраст белых карликов согласуется с предыдущими оценками возраста Вселенной — от 13 до 14 млрд лет. В верхней части представлен панорамный снимок всего скопления, состоящего из нескольких сотен тысяч звезд, заключенных в объеме с поперечными размерами от 10 до 30 световых лет. Снимок сделан с помощью наземного телескопа (1995 г.). В поле слева представлен снимок небольшой области скопления, полученный с помощью телескопа «Хаббл». Пример еще более компактной области представлен внизу справа. На этом небольшом участке «Хаббл» нашел множество тусклых белых карликов. Они отмечены голубыми кружками. Для того чтобы обнаружить эти очень тусклые звезды, потребовалось накапливать сигнал в общей сложности почти восемь дней в течение 67-дневного периода наблюдений.



Этот звездный рой называется M80 (NGC 6093). Это одно из самых густонаселенных из 147 известных шаровых звездных скоплений в галактике Млечный Путь. Расположенное на расстоянии 28 тыс. световых лет от Земли, скопление M80 содержит сотни тысяч звезд, удерживаемых вместе взаимным тяготением. Шаровые скопления особенно полезны для изучения эволюции звезд, поскольку все звезды скопления — одного возраста (в данном случае около 15 млрд. лет), но имеют разные массы. Все звезды, которые можно увидеть на этом изображении, либо находятся на более позднем этапе своей эволюции, либо (в редких случаях) являются более массивными, чем наше Солнце. Особенно заметны яркие красные гиганты — звезды с массой, аналогичной массе Солнца, которые приближаются к концу своего существования.

с такой звездой в соответствии с общей теорией относительности, не удавалось до 1939 г., когда появилась работа молодого американского ученого Роберта Оппенгеймера. Правда, его результаты говорили о том, что никаких наблюдаемых последствий, которые можно было бы обнаружить с помощью телескопов, не будет. Вскоре началась война, и Оппенгеймер стал активным участником проекта создания атомной бомбы. А после войны проблема гравитационного коллапса была надолго забыта, поскольку в те времена большинство ученых интересовались происходящим в масштабах атома и его ядра. Однако в 1960-х гг. интерес к крупномасштабным проблемам астрономии и космологии возродился благодаря значительному росту числа астрономических наблюдений и расширению их диапазона за счет применения современных технологий. Работа Оппенгеймера была открыта заново и получила развитие в трудах многих ученых.

Картина, которую мы теперь можем построить на основе работ Оппенгеймера, выглядит следующим образом. Гравитационное поле звезды изменяет траектории лучей света в пространстве-времени относительно траекторий в отсутствие звезды. Световые конусы, соответствующие траекториям вспышек света, испущенного из их вершин, в пространстве и времени слегка отклоняются внутрь около поверхности звезды. Это можно наблюдать по искривлению траектории света от далеких звезд во время солнечного затмения. По мере сжатия звезды гравитационное поле на ее поверхности усиливается и световые конусы еще больше отклоняются внутрь. Свету становится все труднее ускользнуть от звезды, и удаленному наблюдателю он кажется все слабее и краснее.

По мере сжатия звезды гравитационное поле на ее поверхности усиливается и световые конусы еще большие отклоняются внутрь. Свету становится все труднее ускользнуть от звезды, и удаленному наблюдателю он кажется все слабее и краснее.

В итоге, когда звезда сжимается до определенного критического радиуса, гравитационное поле на ее поверхности становится настолько сильным, что отклонение световых конусов достигает той степени, которая уже не позволяет свету ускользнуть от звезды. В соответствии с теорией относительности ничто не может двигаться быстрее света. Таким образом, если даже свет не может ускользнуть от звезды, значит, и ничто другое не может. Все притягивается обратно гравитационным полем. Итак, существует совокупность событий, область пространства-времени, из которой невозможно выбраться, чтобы достичь удаленного наблюдателя. Эту область мы теперь и называем черной дырой, а ее границу — горизонтом событий. Он совпадает с траекториями световых лучей, которые не могут вырваться из черной дыры.

Чтобы понять, что бы мы увидели, если бы наблюдали коллапс звезды и образование черной дыры, следует вспомнить, что в теории относительности нет абсолютно-го времени. Каждый наблюдатель имеет свою меру времени. Время на звезде будет отличаться от времени наблюдателя, находящегося на расстоянии от нее, из-за влияния гравитационного поля звезды. Этот эффект был измерен на Земле с помощью эксперимента с часами, расположенными на вершине и возле основания водонапорной баш-

ни. Предположим, что находящийся на поверхности коллапсирующей звезды бесстрашный астронавт, ориентируясь по своим часам, каждую секунду посылает сигнал на свой космический корабль, находящийся на орбите. В некоторый момент времени по его часам, например в 11 часов утра, радиус сжимающейся звезды становится меньше критического, при котором гравитационное поле усиливается настолько, что сигналы больше не достигают космического корабля.

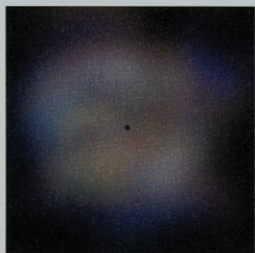
Экипаж корабля, наблюдающий за его сигналами, отметит, что по мере приближения к 11 часам интервалы между последовательными сигналами астронавта становятся все длиннее и длиннее. Впрочем, до 10:59:59 эффект был бы очень незначительным. Между сигналами, переданными по часам астронавта в 10:59:58 и 10:59:59, для экипажа на орбите прошло бы чуть больше секунды, но сигнала, отправленного в 11 часов, им пришлось бы ждать вечно. Световые волны, испущенные с поверхности звезды между 10:59:59 и 11:00:00 по часам астронавта, для наблюдателей на борту корабля будут распространяться в течение бесконечного периода времени.

Временной интервал между приемом последовательных сигналов на космическом корабле будет становиться все продолжительнее, а свет звезды будет казаться все краснее и слабее. Со временем звезда станет настолько тусклой, что уже не будет видна с корабля. Останется только черная дыра в космическом пространстве. Однако гравитационное поле звезды по-прежнему будет действовать на космический корабль. Звезда, по крайней мере в принципе, будет все еще видимой для наблюдателей на корабле. Просто свет от ее поверхности претерпевает такое большое красное смещение под действием гравитационного поля звезды, что звезда становится

Три способа вырастить черную дыру

Первичный коллапс балджа

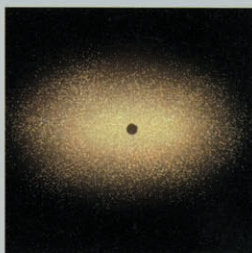
1. Первичное облако водорода коллапсирует вокруг небольшой «затравочной» черной дыры.



2. Падающий газ питает черную дыру, увеличивая ее массу, и образует звезды.



3. В результате коллапса формируется гигантская эллиптическая галактика. Рост черной дыры прекращается.



Столкновения галактик

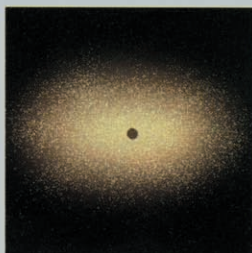
1. Две дисковые галактики с центральными черными дырами сближаются.



2. Галактики сталкиваются, и их ядра и черные дыры начинают сливаться.



3. В результате слияния образуется гигантская эллиптическая галактика с центральной черной дырой, масса которой пропорционально возросла.



Псевдобалдж

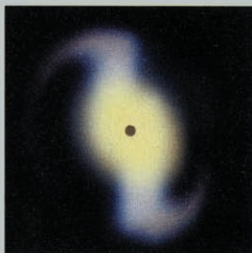
1. Образуется дисковая галактика с (самое большое) «затравочной» черной дырой.



2. Газ из диска падает в центр галактики и наращивает псевдобалдж, который похож на первичный балдж, но на самом деле является частью диска.



3. С ростом псевдобалджа формируется черная дыра, масса которой растет за счет псевдобалджа.



неразличимой. Однако само гравитационное поле звезды не подвержено красному смещению. Таким образом, корабль продолжит обращаться вокруг черной дыры.

Работа, проделанная Роджером Пенроузом и мной между 1965 и 1970 гг., показала, что согласно общей теории относительности внутри черной дыры должна находиться сингулярность с бесконечной плотностью. Это напоминает Большой взрыв в начале времени, только для коллапсирующего объекта и астронавта это будет концом времени. В этой сингулярности законы физики и наша способность предсказывать будущее нарушаются. Однако на наблюдателя, оставшегося за пределами черной дыры, это нарушение предсказуемости не подействует, поскольку ни свет, ни любой другой сигнал из сингулярности не сможет достичь его.

В этой сингулярности законы физики и наша способность предсказывать будущее нарушаются.

Поразмыслив об этом замечательном факте, Роджер Пенроуз предложил гипотезу космической цензуры, которую можно перефразировать следующим образом: «Бог не терпит голой сингулярности». Иными словами, сингулярности, образующиеся в результате гравитационного коллапса, появляются только в таких местах, как черные дыры, где они надежно скрыты от постороннего взгляда горизонтом событий. Если быть точным, это то, что называется слабой гипотезой космической цензуры: наблюдатели, находящиеся за пределами черной дыры, защищены от последствий нарушения предсказуемости в сингулярности. Но для несчастного астронавта, попав-

шего в черную дыру, никакой защиты нет. Не должен ли Бог защитить его?

Уравнения общей теории относительности имеют несколько решений, в которых наш астронавт может увидеть голую сингулярность. Вместо того чтобы попасть в нее, он может провалиться в «кротовую нору» и оказаться в другой части Вселенной. Это открыло бы широкие возможности для путешествий в пространстве и времени, но, к сожалению, все эти решения могут оказаться крайне неустойчивыми. Небольшое возмущение, например присутствие астронавта, может настолько изменить решение, что астронавт не увидит сингулярность, пока не попадет в нее, и его время закончится. Другими словами, сингулярность всегда находится в его будущем и никогда — в прошлом.

Сильный вариант гипотезы космической цензуры гласит, что в реалистичном решении сингулярности всегда лежат либо целиком в будущем, как сингулярности гравитационного коллапса, либо целиком в прошлом. Хочется надеяться, что какая-то из версий гипотезы космической цензуры верна, поскольку вблизи голых сингулярностей может оказаться возможным путешествие в прошлое. Это хорошо для писателей-фантастов, однако это также означает, что ничья жизнь не находится в полной безопасности. Некто может отправиться в прошлое и убить кого-либо из ваших родителей до того, как вы будете зачаты.

Находясь поблизости от голых сингулярностей, можно путешествовать в прошлое. Это хорошо для писателей-фантастов, однако это также означает, что ничья жизнь не находится в полной безопасности.

При образовании черной дыры в результате гравитационного коллапса движения будут ограничены излучением гравитационных волн. Поэтому можно ожидать, что черная дыра довольно скоро перейдет в стационарное состояние. Принято считать, что это конечное стационарное состояние будет зависеть от параметров объекта, коллапс которого породил черную дыру. Эта черная дыра может иметь любую форму или размер, причем ее форма может не оставаться неизменной, а пульсировать.

Между тем в 1967 г. Вемер Израэль из Дублина опубликовал статью, совершившую переворот в исследовании черных дыр. Израэль показал, что любая невращающаяся черная дыра должна иметь идеально круглую или сферическую форму. Более того, ее размер зависит только от ее массы. Фактически, она может описываться частным решением уравнений Эйнштейна, которое было найдено Карлом Шварцшильдом в 1917 г. вскоре после создания общей теории относительности. Изначально результаты Израэля интерпретировались многими (включая его самого) как подтверждение того, что черные дыры образуются только в результате коллапса идеально круглых или сферических объектов. Поскольку в действительности ни один объект не может иметь идеально сферическую форму, гравитационный коллапс в общем случае должен приводить к образованию «голых» сингулярностей. Однако существовала и другая интерпретация результатов Израэля, которую поддерживали, в частности, Роджер Пенроуз и Джон Уиллер. Она заключалась в том, что черная дыра должна вести себя, как шарик жидкости. Изначально объект может иметь несферическую форму, однако в процессе коллапса, порождающего черную дыру, он переходит в сферическое состояние вследствие излучения гравитационных волн. Дальнейшие рас-



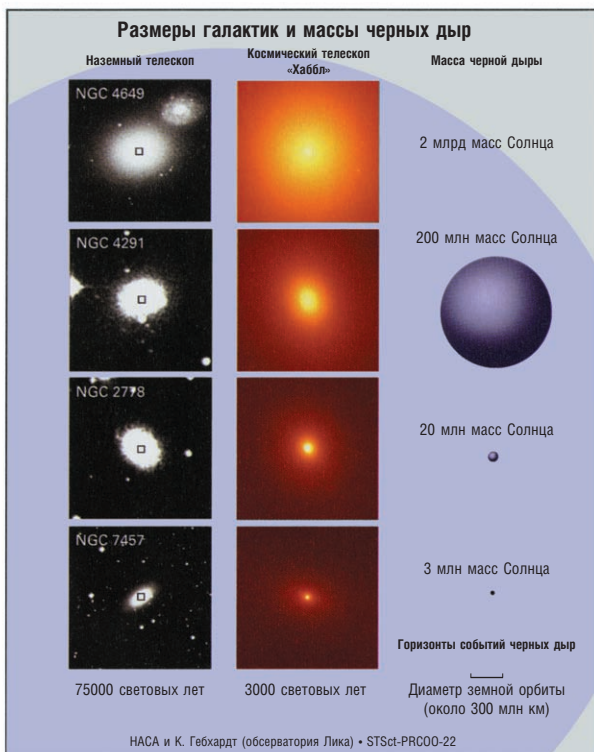
Гипотеза космической цензуры, которую можно перефразировать как «Бог не терпит голых сингулярностей», гласит, что сингулярности, образующиеся в результате гравитационного коллапса, появляются только в таких местах, как черные дыры, где они надежно скрыты от посторонних взглядов горизонтом событий. Даже парящий в космосе астронавт может не увидеть сингулярность, пока не попадет в нее и его время не закончится.

четы подтвердили эту точку зрения, и она стала общепризнанной.

Израэль показал, что любая невращающаяся черная дыра должна иметь идеально круглую или сферическую форму.

Результат Израэля относился только к черным дырам, которые образовались из невращающихся объектов. По аналогии с шариком жидкости можно ожидать, что черная дыра, образовавшаяся в результате коллапса вращающегося объекта, не будет иметь идеально сферическую форму. У нее будет выпуклость вокруг экватора, вызванная вращением. Такая небольшая выпуклость, вызванная вращением с периодом около 25 суток, наблюдается у Солнца. В 1963 г. новозеландец Рой Керр получил для черных дыр набор решений уравнений общей теории относительности, причем более общих, чем решения Шварцшильда. Такие «керровские» черные дыры вращаются с постоянной скоростью, их размер и форма зависят только от их массы и скорости вращения. При нулевой скорости вращения черная дыра имеет идеально сферическую форму и решение для нее совпадает с решением Шварцшильда. Но если скорость вращения отлична от нуля, черная дыра вспучивается в экваториальной области. Поэтому естественно будет предположить, что конечное состояние вращающегося объекта, переживающего коллапс с образованием черной дыры, будет описываться решением Керра.

В 1970 г. мой коллега и сокурсник по аспирантуре Брэндон Картер сделал первый шаг к подтверждению этой гипотезы. Он показал, что если стационарная вра-



Это сравнение центральных областей четырех эллиптических галактик показывает, что чем массивнее центральный балдж галактики, тем тяжелее ее черная дыра. В левом столбце представлены черно-белые снимки галактик, полученные на наземных телескопах. Квадратиками отмечены центральные области галактик. В центральном столбце приведены увеличенные изображения этих областей, полученные с помощью Широкоугольной планетарной камеры 2 космического телескопа «Хаббл». В правом столбце представлены массы черных дыр и соответствующие диаметры горизонта событий. Массу каждой черной дыры астрономы определяли путем измерения параметров движения звезд вокруг нее. Чем меньше расстояние между звездами и черной дырой, тем выше их скорость. Астрономы открыли поразительную связь между массой черной дыры и средней скоростью движения звезд в центральном балдже галактики. Чем быстрее движутся звезды, тем массивнее черная дыра. Это открытие означает, что гигантские черные дыры не были предшественниками рождения галактик, а эволюционировали вместе с ними, захватывая определенный процент массы звезд и газа центральной области галактики.

щающаяся черная дыра обладает осью симметрии, как вращающийся волчок, то ее размер и форма будут зависеть только от ее массы и скорости вращения. Затем в 1971 г. я доказал, что любая стационарная вращающаяся черная дыра должна иметь такую ось симметрии. Наконец, в 1973 г. Дэвид Робинсон из лондонского Королевского колледжа показал (используя наши с Картером результаты), что гипотеза верна: такая черная дыра действительно должна представлять собой решение Керра.

Таким образом, после гравитационного коллапса черная дыра должна перейти в состояние, в котором она вращается, но не пульсирует. Более того, ее размер и форма будут зависеть только от ее массы и частоты вращения, а не от природы объекта, в результате коллапса которого она образовалась. Этот результат стал известен в виде принципа «У черной дыры нет волос». Это означает, что при образовании черной дыры очень большой объем информации об объекте, претерпевшем коллапс, должен быть потерян, поскольку после этого все, что мы можем узнать об этом объекте, — это его масса и частота вращения. Я объясню значение этого вывода в следующей лекции. Теорема «об отсутствии волос» имеет также огромное практическое значение, поскольку накладывает ограничения на возможные типы черных дыр. Следовательно, можно строить подробные модели объектов, содержащих черные дыры, и сравнивать предсказания этих моделей с наблюдениями.

Принцип «у черной дыры нет волос» означает, что при образовании черной дыры очень большой объем информации об объекте, претерпевшем коллапс, должен быть потерян.

Черные дыры — один из редких случаев в истории науки, когда теория была детально разработана в виде математической модели еще до того, как появились какие-либо наблюдательные подтверждения ее справедливости. На самом деле, это был главный аргумент противников черных дыр. Разумно ли верить в существование объектов, единственным доказательством которого служат расчеты на основе сомнительной теории — общей теории относительности?

Между тем в 1963 г. Мартин Шмидт, астроном из Паломарской обсерватории, расположенной в Калифорнии, обнаружил слабый звездообразный объект в направлении источника радиоизлучения 3C273 (это источник номер 273 в третьем выпуске Кембриджского каталога радиоисточников). Измерив красное смещение этого объекта, он обнаружил, что оно слишком велико для того, чтобы быть результатом действия гравитационного поля. Если бы это красное смещение было вызвано гравитацией, этот объект оказался бы настолько массивным и близким к нам, что его присутствие влияло бы на орбиты планет Солнечной системы. Следовательно, красное смещение могло быть вызвано расширением Вселенной, а значит, объект находится очень далеко. Чтобы можно было наблюдать столь далекий объект, он должен быть очень ярким и излучать огромное количество энергии.

Единственный механизм, придуманный учеными для производства такого большого количества энергии, — это гравитационный коллапс, причем не просто звезды, а всей центральной части галактики. С тех пор было открыто множество других подобных «квазизвездных объектов» (квазаров) с большими красными смещениями. Но все они расположены слишком далеко

и слишком сложны для наблюдений, чтобы представить неопровержимые доказательства существования черных дыр.

С тех пор было открыто множество других подобных «квазизвездных объектов» (квазаров) с большими красными смещениями. Но все они расположены слишком далеко и слишком сложны для наблюдений, чтобы представить неопровержимые доказательства существования черных дыр.

Следующим обнадеживающим свидетельством существования черных дыр стало открытие, совершенное в 1967 г. аспиранткой Кембриджского университета Джослин Белл: она обнаружила на небе объекты, испускающие регулярные импульсы радиоволн. Сначала Джослин и ее научный руководитель Энтони Хьюиш подумали, что, возможно, они вступили в контакт с инопланетной цивилизацией из нашей Галактики. И правда, докладывая о своем открытии на семинаре, они, помнится, называли первые четыре обнаруженных источника *LGM 1-4*, где аббревиатура *LGM* означала *Little Green Men* — маленькие зеленые человечки.

В итоге, однако, и они, и все остальные пришли к менее фантастическому выводу о том, что эти объекты, получившие название «пульсары», представляют собой всего лишь вращающиеся нейтронные звезды. Они испускают импульсы радиоволн из-за сложного взаимодействия их магнитных полей и окружающей материи. Это стало неприятной новостью для авторов космических вестернов, но очень обнадеживающим результатом для нас — небольшой груп-

пы ученых, веривших в те времена в существование черных дыр. Это было первым доказательством существования нейтронных звезд. Радиус нейтронной звезды составляет около 15 км, это всего в несколько раз больше критического радиуса, при котором звезда становится черной дырой. Если звезда могла сжаться до столь малого размера, нет ничего неразумного в том, чтобы ожидать, что другие звезды могли сжаться до еще более компактных размеров и стать черными дырами.

Можно ли надеяться обнаружить черную дыру, если она по определению не излучает никакого света? Это похоже на поиски черной кошки в темной комнате. К счастью, способ обнаружить черные дыры существует, поскольку, как отметил Джон Мичелл в своей пионерской работе 1783 г., гравитационное поле черной дыры воздействует на близлежащие объекты. Астрономы наблюдали множество систем, в которых две звезды вращаются одна вокруг другой под воздействием гравитации. Кроме того, они наблюдали системы, в которых только одна видимая звезда вращается вокруг невидимого компаньона.

Можно ли надеяться обнаружить черную дыру, если она по определению не излучает никакого света?

Конечно, нельзя с ходу утверждать, что этим компаньоном является черная дыра. Это может быть звезда настолько тусклая, что мы не можем ее увидеть. Однако некоторые из таких систем, например система X-1 в созвездии Лебедя, являются также источниками мощного рентгеновского излучения. Наиболее правдоподоб-

ное объяснение этого явления заключается в том, что рентгеновское излучение генерируется веществом, которое выбрасывается с поверхности видимой звезды. Когда оно падает в направлении невидимого компаньона, создается спиральное движение, как при сливании воды из ванны, и вещество нагревается и испускает рентгеновские лучи. Чтобы этот механизм работал, невидимый объект должен быть очень маленьким, как белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра.

Итак, по наблюдаемому движению видимой звезды можно определить минимальную возможную массу невидимого объекта. В случае системы Лебедь X-1 эта масса примерно в шесть раз больше массы Солнца. Согласно результатам Чандрасекара, это слишком много для того, чтобы невидимый объект был белым карликом. Для нейтронной звезды эта масса также слишком велика. Так что, по-видимому, это должна быть черная дыра.

Существуют и другие модели, объясняющие поведение системы Лебедь X-1 без привлечения черной дыры, но все они подходят лишь с натяжкой. Присутствие черной дыры кажется единственным разумным объяснением наблюдаемой картины. Несмотря на это, я поспорил с Кипом Торном из Калифорнийского технологического института, что на самом деле в системе Лебедь X-1 нет черной дыры. Для меня это как страховка. Я много работал над изучением черных дыр, и все мои усилия окажутся напрасными, если они не существуют. Но в этом случае у меня будет утешение в виде выигранного пари и четырехлетней подписки на сатирический журнал *Private Eye*. Если же черные дыры все-таки существуют, Кип получит подписку на *Penthouse* всего на один год, поскольку при заключении пари в 1975 г. мы были на 80 процентов уверены, что в системе Лебедь X-1 есть черная

дыра. Можно сказать, что сегодня мы уверены на 95 процентов, но наш спор еще не разрешен.

Свидетельства существования черных дыр обнаружены во многих других системах нашей Галактики, а также в центрах других галактик и квазаров (там черные дыры, по-видимому, гораздо крупнее). Кроме того, не исключена возможность существования черных дыр с массами гораздо меньшими, чем масса Солнца. Такие черные дыры не могли возникнуть в результате гравитационного коллапса, поскольку их массы меньше предела Чандрасекара. Звезды столь малой массы способны противостоять собственной гравитации, даже когда они израсходовали все свое ядерное топливо. Таким образом, черные дыры малой массы могли бы образоваться только в том случае, если вещество было сжато до огромной плотности под воздействием очень большого внешнего давления. Такие условия могут быть созданы в очень большой водородной бомбе. Физик Джон Уилер подсчитал, что если взять всю тяжелую воду из всех океанов мира, то можно создать водородную бомбу, которая сожмет вещество в центре настолько, что может появиться черная дыра. Однако, к сожалению, не останется никого, кто мог бы ее увидеть.

Если взять всю тяжелую воду из всех океанов мира, то можно создать водородную бомбу, которая сожмет вещество в центре настолько, что может появиться черная дыра.

Более реалистичная возможность заключается в том, что такие маломассивные черные дыры могли образоваться при высоких температурах и давлениях на самых

ранних этапах эволюции Вселенной. Черные дыры могли образоваться, если ранняя Вселенная не была абсолютно гладкой и однородной, поскольку тогда небольшая область с плотностью выше средней могла быть сжата таким образом, что в результате возникла бы черная дыра. А мы знаем, что неоднородности должны были существовать, поскольку в противном случае материя во Вселенной была бы распределена абсолютно равномерно и в современную эпоху, а не скапливалась бы, образуя звезды и галактики.

Черные дыры, в конце концов, не так уж черны. Они светятся, как нагретое тело, и чем меньше их размер, тем ярче их свечение.

Привели бы неоднородности, необходимые для формирования звезд и галактик, к образованию значительного числа таких первичных черных дыр или нет — зависит от условий, существовавших в ранней Вселенной. Если бы мы могли подсчитать текущее количество первичных черных дыр, мы бы многое узнали о ранних этапах эволюции Вселенной. Первичные черные дыры с массами, превышающими миллиарды тонн (масса высокой горы), можно обнаружить только по их гравитационному воздействию на другую видимую материю или на расширение Вселенной. Однако, как мы узнаем из следующей лекции, черные дыры, в конце концов, не так уж черны. Они светятся, как нагретое тело, и чем меньше их размер, тем ярче их свечение. Поэтому, как ни парадоксально, может оказаться так, что небольшие черные дыры обнаружить проще, чем крупные.

Лекция четвертая

Черные дыры не так уж черны

Д о 1970 г. мои исследования в сфере общей теории относительности были сосредоточены на вопросе, существовала ли сингулярность Большого взрыва. Между тем в один ноябрьский вечер того года, вскоре после рождения моей дочери Люси, я начал размышлять о черных дырах, готовясь ко сну. Из-за проблем со здоровьем это был довольно медленный процесс, так что у меня хватало времени на раздумья. В то время еще не существовало четкого определения того, какие точки пространства-времени лежат внутри черной дыры, а какие — за ее пределами.

Мы уже обсуждали с Роджером Пенроузом идею определения черной дыры как совокупности событий, из которой невозможно ускользнуть на большое расстояние. Сегодня это общепринятое определение. Оно означает, что граница черной дыры (горизонт событий) формируется лучами света, которым не удастся покинуть черную дыру. Они остаются в ней навечно, «болтаясь» на границе черной дыры. Это напоминает попытку убежать от полицейских, когда вам удается

опередить их на шаг, но не получается окончательно оторваться от погони.

Горизонт событий формируется лучами света, которым не удается покинуть черную дыру. Они остаются в ней навечно, «болтаясь» на границе черной дыры.

Внезапно я понял, что траектории этих световых лучей не могут сближаться, поскольку в противном случае они бы пересеклись. Это как встретить другого человека, убегающего от полиции в противоположном направлении. Оба беглеца были бы схвачены, а лучи света — попали бы в черную дыру. Но если бы эти лучи света были поглощены черной дырой, они не могли бы оказаться на ее границе. Таким образом, лучи света на горизонте событий должны всегда двигаться параллельно или удаляться друг от друга. По-другому можно представить горизонт событий (границу черной дыры) как край тени. Это — край света, ускользающего на далекие расстояния, и одновременно край тени, означающей неизбежную гибель. Если взглянуть на тень, которую отбрасывает предмет в лучах источника света, расположенного на далеком расстоянии, например Солнца, вы увидите, что лучи света на краю тени не приближаются друг к другу. Если световые лучи, образующие горизонт событий (границу черной дыры), никогда не могут сблизиться, площадь горизонта событий остается неизменной или увеличивается с течением времени. Она никогда не сокращается, поскольку в противном случае по меньшей мере некоторые световые лучи на границе должны были бы сблизиться. На самом деле эта

площадь увеличивается всякий раз, когда вещество или излучение попадает в черную дыру.

Если световые лучи, образующие горизонт событий, никогда не могут сблизиться, площадь горизонта событий остается неизменной или увеличивается с течением времени.

Представьте, что две черные дыры столкнулись и слились в одну. Тогда площадь горизонта событий этой новой черной дыры будет больше, чем сумма площадей горизонтов событий исходных черных дыр. Это свойство неубывания площади горизонта событий налагает важное ограничение на возможное поведение черных дыр. Я был так взволнован своим открытием, что почти не спал той ночью.

На следующий день я позвонил Роджеру Пенроузу, и он согласился со мной.

Думаю, на самом деле ему было известно об этом свойстве площади горизонта событий. Однако он использовал несколько иное определение черной дыры. Он просто не осознавал, что оба определения дают одни и те же границы черной дыры при условии, что она находится в стационарном состоянии.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Неубывание площади черной дыры заставляет вспомнить о свойстве энтропии — физической величины, которая служит мерой неупорядоченности системы. Как

показывает жизненный опыт, если вещи предоставлены сами себе, беспорядок возрастает; чтобы увидеть это, достаточно перестать ремонтировать что-либо в доме. Можно создать порядок из беспорядка — например, можно покрасить дом. Однако на это требуется затратить энергию, что приведет к уменьшению количества доступной нам упорядоченной энергии.

При объединении двух систем энтропия объединенной системы превышает сумму энтропий отдельных систем.

Точная формулировка этой идеи носит название второго закона термодинамики. Он гласит, что энтропия изолированной системы никогда не уменьшается. Более того, при объединении двух систем энтропия объединенной системы превышает сумму энтропий отдельных систем. Например, рассмотрим систему молекул газа в сосуде. Молекулы могут рассматриваться как крошечные бильярдные шары, непрерывно сталкивающиеся друг с другом и отскакивающие от стенок сосуда. Допустим, сначала эти молекулы находились в левой части сосуда и были отделены перегородкой. Если убрать перегородку, молекулы распространятся по всему объему и займут обе половины сосуда. Спустя некоторое время они могли бы случайно все оказаться в правой или в левой части сосуда. Но гораздо более вероятно, что в обеих половинах будет приблизительно одинаковое число молекул. Такое состояние является менее упорядоченным, чем исходное, в котором все молекулы были собраны в одной половине. В таком случае говорят, что энтропия газа увеличилась.

Теперь представьте, что имеется две емкости: одна содержит молекулы кислорода, а другая — молекулы азота. Если соединить эти емкости и убрать разделяющую перегородку, молекулы кислорода и азота начнут перемешиваться. Через некоторое время в обеих емкостях, скорее всего, будет содержаться вполне однородная смесь молекул кислорода и азота. Это состояние будет менее упорядоченным, а следовательно, будет обладать более высокой энтропией, чем исходное состояние системы из двух отдельных емкостей.

Второй закон термодинамики занимает особое место среди законов физики. Другие законы, такие как закон всемирного тяготения Ньютона, являются абсолютными — они выполняются всегда. В отличие от них второй закон термодинамики является статистическим — он выполняется не всегда, а в подавляющем большинстве случаев. Вероятность того, что все молекулы газа в какой-то момент окажутся в одной половине сосуда, меньше одного к триллиону, но такое может случиться.

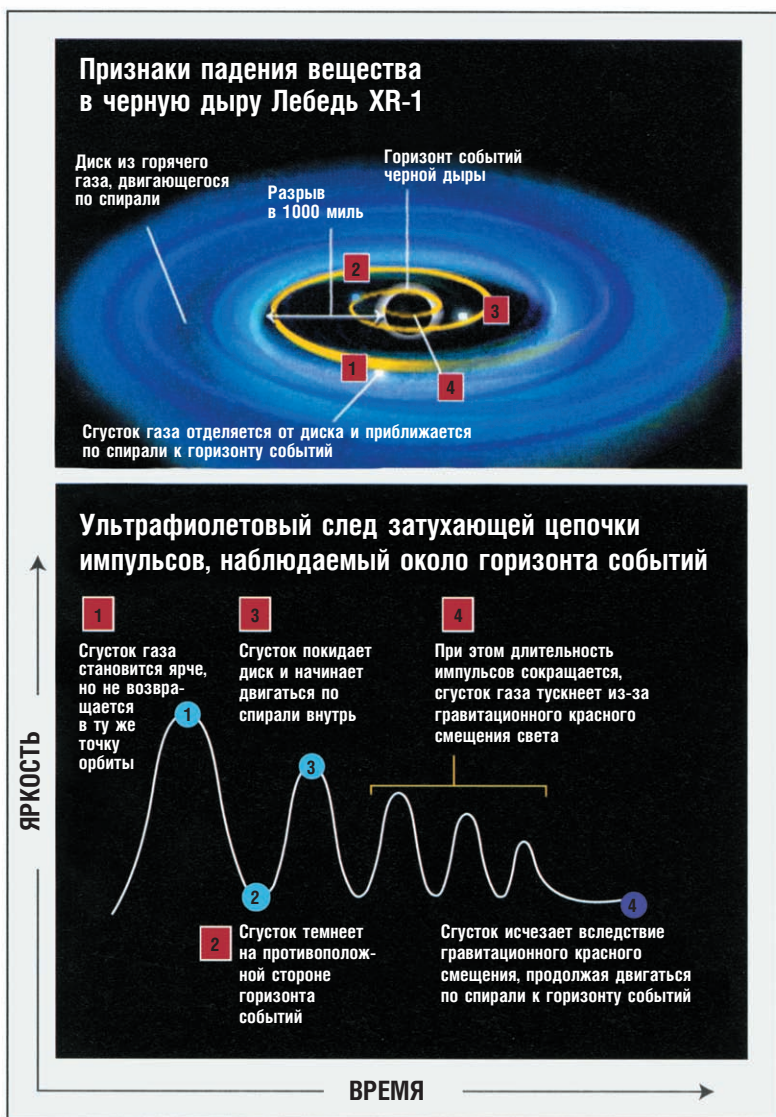
Однако если поблизости есть черная дыра, существует гораздо более простой способ нарушить второй закон термодинамики: просто бросьте в черную дыру некоторое количество вещества с высокой энтропией, например емкость с газом. Полная энтропия вещества вне черной дыры понизится. Конечно, можно возразить, что полная энтропия, включающая энтропию внутри черной дыры, не уменьшится. Но поскольку заглянуть в черную дыру невозможно, мы не можем узнать, какова энтропия вещества внутри нее. Было бы неплохо, если бы по какой-то характеристике черной дыры наблюдатели, находящиеся за ее пределами, могли оценить ее энтропию. Она должна возрастать всякий раз, когда вещество, обладающее энтропией, попадает в черную дыру.

Энтропия должна возрастать всякий раз, когда вещество, обладающее энтропией, попадает в черную дыру.

Опираясь на мою идею о том, что площадь горизонта событий возрастает всякий раз, когда вещество попадает в черную дыру, аспирант Принстонского университета Джейкоб Бекенштейн предложил считать площадь горизонта событий мерой энтропии черной дыры. Когда вещество, обладающее энтропией, попадает в черную дыру, площадь горизонта событий возрастает, так что сумма энтропии вещества вне черных дыр и площади горизонтов событий никогда не уменьшается.

Казалось, что в большинстве случаев это предложение исключает нарушение второго закона термодинамики. Однако у него был один существенный недостаток: если черная дыра обладает энтропией, она должна иметь и температуру. Но физическое тело с ненулевой температурой должно испускать излучение определенной интенсивности. Жизненный опыт подсказывает, что если нагреть кочергу в пламени, она раскалется докрасна и испускает излучение. Но и тела с более низкой температурой испускают излучение; обычно мы его не замечаем, так как оно очень слабое. Это излучение необходимо, чтобы не нарушался второй закон термодинамики. Поэтому черные дыры должны испускать излучение. Но они по определению представляют собой объекты, не излучающие ничего. Следовательно, судя по всему, площадь горизонта событий черной дыры не может служить мерой ее энтропии.

В 1972 г. мы с Брэндоном Картером и нашим американским коллегой Джимом Бардиным написали статью



Астрономы могли найти подтверждение существования черных дыр, наблюдая, как вещество (например, сгусток горячего газа) исчезает, попадая за горизонт событий массивного компактного объекта Лебедь XR-1. Когда вещество падает в черную дыру, площадь горизонта событий увеличивается.

на эту тему. Мы показали, что, несмотря на сходство энтропии и площади горизонта событий, существует эта очевидная неустраняемая трудность. Должен признаться, что при написании этой статьи мною отчасти руководило раздражение по отношению к Бекенштейну, поскольку я чувствовал, что он неправильно использовал мое открытие, связанное с увеличением площади горизонта событий. Однако позднее выяснилось, что по сути он был прав, хотя и в неожиданном для него самого смысле.

ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНЫХ ДЫР

В сентябре 1973 г. во время своей поездки в Москву я обсудил проблему черных дыр с двумя ведущими советскими специалистами — Яковом Зельдовичем и Александром Старобинским. Они убедили меня в том, что в соответствии с принципом неопределенности квантовой механики вращающиеся черные дыры должны порождать и испускать элементарные частицы. Я был согласен с их аргументами с физической точки зрения, но мне не понравились математические методы, с помощью которых они рассчитывали параметры излучения. Поэтому я приступил к разработке более удобного математического аппарата, о котором рассказал на неформальном семинаре в Оксфорде в конце ноября 1973 г. На тот момент я еще не проделал расчеты для выяснения параметров излучения. Я предполагал, что найду то же излучение, которое предсказали Зельдович и Старобинский для вращающихся черных дыр. Однако, проделав вычисления, к собственному удивлению и досаде я обнаружил, что даже невращающиеся черные дыры должны порождать и испускать элементарные частицы с постоянной скоростью.

В соответствии с принципом неопределенности квантовой механики вращающиеся черные дыры должны порождать и испускать элементарные частицы.

Сначала я связал это излучение с тем, что одно из использованных мною приближений было ошибочным. Я опасался, что, узнав о моих расчетах, Бекенштейн использует это как еще один аргумент в пользу своей идеи об энтропии черных дыр, которая мне по-прежнему не нравилась. Однако чем больше я размышлял об этом, тем сильнее крепла моя уверенность в том, что использованные мною приближения верны. Окончательно же меня убедило в реальности излучения черных дыр то, что спектр излучаемых элементарных частиц в точности совпадает со спектром излучения нагретого тела.

Черная дыра испускала частицы именно с той скоростью, которая обеспечивала соблюдение второго закона термодинамики.

С тех пор аналогичные вычисления были проделаны в разных видах другими учеными. Все они подтверждали, что черная дыра должна испускать элементарные частицы и излучение, как если бы это было нагретое тело с температурой, зависящей только от массы черной дыры: чем больше масса, тем ниже температура. Это излучение можно представить себе следующим образом. То, что кажется нам пустым пространством, не может быть абсолютно пустым, поскольку это означало бы, что все поля, такие как гравитационное и электромагнитное, должны быть равны нулю. Однако напряженность поля и скорость ее изменения подобны положению и скорости элементарной частицы. Принцип неопреде-

ленности подразумевает, что чем точнее мы знаем одну из этих величин, тем менее точно знаем другую.

Таким образом, в пустом пространстве поле не может постоянно быть в точности нулевым, поскольку это означало бы, что точно известна его напряженность (ноль) и точно известна скорость его изменения (также ноль). Вместо этого должна существовать некоторая минимальная неопределенность напряженности поля, или квантовые флуктуации. Можно представить эти флуктуации в виде пары частиц света или гравитации, которые появляются вместе в какой-то момент времени, разлетаются в разные стороны, а затем снова сближаются и аннигилируют. Эти частицы называются виртуальными. В отличие от реальных частиц их невозможно наблюдать напрямую с помощью детектора элементарных частиц. Тем не менее их косвенное влияние, например небольшие изменения энергии атомов и орбит электронов, можно измерить, и оно соответствует теоретическим предсказаниям с замечательной степенью точности.

По закону сохранения энергии одна из пары виртуальных частиц будет обладать положительной энергией, а другая — отрицательной. Виртуальная частица с отрицательной энергией обречена на недолгую жизнь. Это связано с тем, что реальные частицы при обычных условиях всегда имеют положительную энергию. Поэтому она должна найти свою пару и аннигилировать. Однако гравитационное поле внутри черной дыры настолько сильно, что даже реальная частица может обладать в нем отрицательной энергией.

Поэтому при наличии черной дыры виртуальная частица с отрицательной энергией может попасть в нее и стать реальной. В этом случае ей больше не требуется аннигилировать со своей парной частицей. Покинутая ею

парная частица также может попасть в черную дыру. Но поскольку она обладает положительной энергией, то может ускользнуть в бесконечность в виде реальной частицы. Для удаленного наблюдателя это будет выглядеть так, будто она испущена черной дырой. Чем меньше черная дыра, тем меньше расстояние, которое придется преодолеть частице с отрицательной энергией, чтобы стать реальной. Таким образом, интенсивность излучения будет больше и наблюдаемая температура черной дыры — выше.

По закону сохранения энергии одна из пары виртуальных частиц будет обладать положительной энергией, а другая — отрицательной.

Положительная энергия испускаемого излучения должна компенсироваться потоком частиц с отрицательной энергией, попадающих в черную дыру. В соответствии со знаменитым уравнением Эйнштейна $E = mc^2$ энергия эквивалентна массе. Поэтому приток отрицательной энергии в черную дыру уменьшает ее массу. По мере уменьшения массы черной дыры площадь ее горизонта событий сокращается, но это уменьшение энтропии черной дыры с лихвой компенсируется энтропией испущенного излучения, так что второй закон термодинамики не нарушается.

ВЗРЫВЫ ЧЕРНЫХ ДЫР

Чем меньше масса черной дыры, тем выше ее температура. Поэтому по мере уменьшения массы черной дыры ее температура и интенсивность излучения растут. Следовательно, она теряет массу еще быстрее. Что происходит,

когда масса черной дыры становится бесконечно малой, не совсем ясно. Наиболее разумное предположение заключается в том, что она полностью исчезнет в грандиозном финальном всплеске излучения, эквивалентном по мощности взрыву миллионов водородных бомб.

По мере уменьшения массы черной дыры ее температура и интенсивность излучения растут.

Черная дыра с массой, в несколько раз превосходящей массу Солнца, должна иметь температуру, равную всего одной десятиллионной доле градуса выше абсолютного нуля. Это гораздо меньше температуры микроволнового излучения, заполняющего Вселенную (около 2,7 градуса выше абсолютного нуля), поэтому такие черные дыры должны излучать меньше энергии, чем поглощают, хотя и это очень мало. Если Вселенная обречена расширяться вечно, со временем температура микроволнового излучения снизится и станет меньше температуры такой черной дыры. Тогда черная дыра будет поглощать меньше энергии, чем излучает, и начнет терять массу. Но даже в этом случае ее температура будет настолько мала, что на полное испарение понадобится около 10^{66} лет. Это гораздо больше возраста Вселенной, составляющего всего около 10^{10} лет.

С другой стороны, как вы узнали из прошлой лекции, могут существовать первичные черные дыры с гораздо меньшими массами, образовавшиеся в результате коллапса неоднородностей на самых ранних этапах эволюции Вселенной. Такие черные дыры должны иметь более высокую температуру и испускать излучение гораздо

интенсивнее. Время жизни первичной черной дыры с начальной массой в миллиард тонн должно приблизительно равняться возрасту Вселенной. Первичные черные дыры с начальными массами меньше этого значения должны были уже полностью испариться. Однако первичные черные дыры с чуть большей массой должны до сих пор испускать излучение в виде рентгеновских и гамма-лучей. Эти лучи аналогичны световым, но имеют гораздо более короткие длины волн. Такие черные дыры не заслуживают эпитета «черные». Они раскалены добела и излучают энергию с мощностью около десяти тысяч мегаватт.

Время жизни первичной черной дыры с начальной массой в миллиард тонн должно приблизительно равняться возрасту Вселенной.

Одна такая черная дыра могла бы заменить десять крупных электростанций, если бы мы научились использовать ее энергию. Однако добиться этого довольно сложно. Такая черная дыра имела бы массу горы, сжатой до размеров атомного ядра. Если бы одна из таких черных дыр оказалась на поверхности Земли, предотвратить ее падение сквозь пол к центру Земли было бы невозможно. Она стала бы колебаться, пролетая сквозь Землю туда и обратно, пока со временем не остановилась бы в центре. Таким образом, единственным местом для такой черной дыры, где мы смогли бы использовать ее энергию, является орбита вокруг Земли. А единственный способ поместить ее на околоземную орбиту — «заманить» ее туда с помощью массивного объекта, расположенного

перед черной дырой и притягивающего ее, как морковь, подвешенная перед носом ослика. Это звучит не очень практично, по крайней мере для ближайшего будущего.

ПОИСК ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

Даже если мы не можем использовать излучение этих первичных черных дыр, каковы наши шансы наблюдать их? Мы могли бы поискать гамма-излучение, испускаемое первичными черными дырами на протяжении почти всего времени их существования. Излучение большинства из них может быть очень слабым из-за их удаленности, однако суммарное излучение от всех первичных черных дыр может поддаваться обнаружению. И мы на самом деле наблюдаем такое фоновое гамма-излучение. Однако оно может быть связано с процессами, не имеющими отношения к первичным черным дырам. Кто-то может утверждать, что наблюдения фонового гамма-излучения никак не доказывают существование первичных черных дыр. Но они указывают на то, что, в среднем, в каждом кубическом световом годе Вселенной не может существовать больше трехсот небольших черных дыр. Эта предельная цифра означает, что первичные черные дыры могут составлять не более одной миллионной доли средней плотности массы во Вселенной.

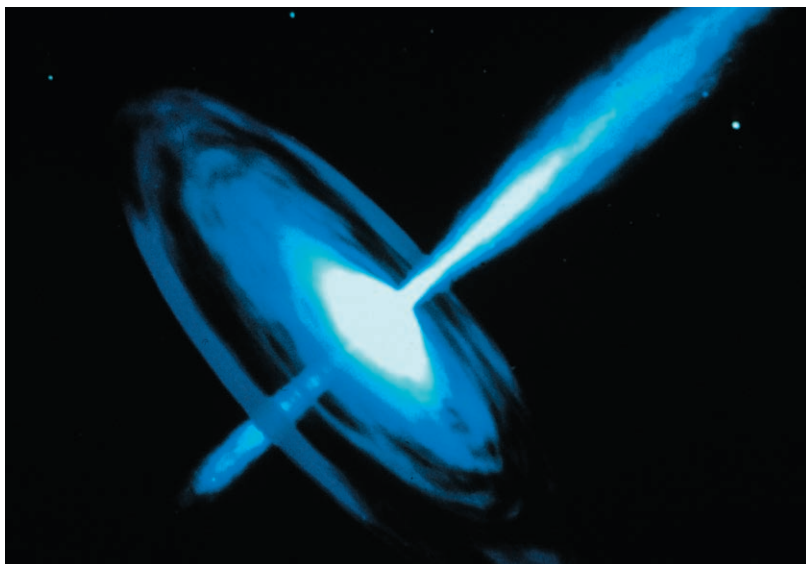
Может показаться, что раз первичные черные дыры столь редки, вряд ли одна из них окажется достаточно близко от нас, чтобы мы могли ее наблюдать. Но поскольку гравитация притягивает первичные черные дыры к любой материи, в галактиках они должны встречаться чаще. Если бы они встречались в галактиках в миллион раз чаще, то ближайшая к нам черная дыра находилась

бы на расстоянии около миллиарда километров от нас, примерно как Плутон — один из самых далеких объектов Солнечной системы. На таком расстоянии было бы все еще очень трудно зарегистрировать устойчивое излучение черной дыры, даже если его мощность составляла бы десять тысяч мегаватт.

Если бы они встречались в галактиках в миллион раз чаще, то ближайшая к нам черная дыра находилась бы на расстоянии около миллиарда километров от нас, примерно как Плутон.

Для наблюдения первичной черной дыры необходимо в течение достаточного периода времени, например недели, зарегистрировать несколько квантов гамма-излучения, приходящих с одного направления. В противном случае это может быть просто часть фонового излучения. Но в соответствии с принципом квантования Планка каждый квант гамма-излучения обладает очень высокой энергией, поскольку гамма-лучи имеют очень высокую частоту. Поэтому для излучения даже десяти тысяч мегаватт не требуется много квантов. Для регистрации этих нескольких квантов, приходящих с расстояния, на котором расположен Плутон, необходим более крупный приемник гамма-лучей, чем любой из построенных к настоящему времени. Более того, этот приемник должен располагаться в космосе, поскольку гамма-лучи не могут проникать через атмосферу.

Разумеется, если черная дыра, расположенная на расстоянии Плутона, достигнет конца своего существования и взорвется, зарегистрировать конечный всплеск



Это художественное представление космического фейерверка во вращающейся массивной черной дыре. Черная дыра подпитывается непрерывным падением в нее газа и звезд, расположенных поблизости. Процесс гравитационной аккреции гораздо эффективнее преобразует массу в энергию, чем процессы термоядерного синтеза, питающие отдельные звезды. Из-за чрезвычайно высоких значений давления и температуры около черной дыры часть падающего газа выбрасывается в направлении оси вращения черной дыры, создавая галактический джет.

излучения будет несложно. Однако если черная дыра испускала излучение последние 10 или 20 млрд лет, вероятность того, что она закончит свое существование в течение ближайших нескольких лет, крайне мала. Это с одинаковой вероятностью могло произойти как несколько миллионов лет назад, так и может случиться через несколько миллионов лет в будущем. Чтобы иметь достаточно хорошие шансы наблюдать взрыв черной

дыры до того, как истечет срок вашего исследовательского гранта, вам придется изобрести способ регистрации любых взрывов, происходящих на расстоянии порядка одного светового года. И вы все равно столкнетесь с проблемой создания крупного приемника гамма-лучей, способного зарегистрировать небольшое число гамма-квантов от этого взрыва. Однако в этом случае не потребуется определять, что все кванты пришли с одного и того же направления. Чтобы можно было считать, что они порождены одним взрывом, достаточно будет убедиться, что все они достигли приемника в течение очень короткого интервала времени.

Уникальным приемником гамма-лучей, способным обнаружить первичные черные дыры, является атмосфера Земли. (В любом случае, маловероятно, что мы сможем построить более крупный приемник.) Когда обладающий высокой энергией гамма-квант сталкивается с атомом в атмосфере Земли, рождаются пары электрон-позитрон. Когда они в свою очередь сталкиваются с другими атомами, образуются новые пары электрон-позитрон. Начинается так называемый электронный ливень, результатом которого является некая форма света, называемая излучением Черенкова. Следовательно, можно наблюдать гамма-всплески в виде вспышек света на ночном небе.

Разумеется, существует множество других явлений, порождающих вспышки на небе, например разряды молнии. Однако гамма-всплески отличаются от подобных эффектов тем, что гамма-всплески наблюдаются одновременно в двух или нескольких пунктах, находящихся на достаточно большом расстоянии друг от друга. Два ученых из Дублина, Нил Портер и Тревор Уикс, провели поиск таких гамма-всплесков с помощью телескопов, установ-

ленных в Аризоне. Они зарегистрировали множество вспышек, но ни одну из них нельзя было с уверенностью приписать всплескам гамма-излучения первичных черных дыр.

Уникальным приемником гамма-лучей, способным обнаружить первичные черные дыры, является атмосфера Земли.

Даже если поиски первичных черных дыр окажутся безрезультатными (что весьма вероятно), они дадут нам важную информацию о самых ранних стадиях эволюции Вселенной. Если ранняя Вселенная была хаотичной или неоднородной или если давление вещества было низким, в ней должно было образоваться значительно больше первичных черных дыр, чем предельное число, установленное по наблюдениям фонового гамма-излучения. Отсутствие наблюдаемых первичных черных дыр можно объяснить, только если ранняя Вселенная была очень гладкой и однородной и если давление в ней было велико.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Излучение черных дыр стало первым примером предсказания, зависящего от обеих великих теорий XX века — общей теории относительности и квантовой механики. Поначалу оно породило множество возражений, поскольку противоречило общепринятой точке зрения. «Как черная дыра может что-либо излучать»? Когда я впервые

рассказал о результатах своих вычислений на конференции в лаборатории им. Резерфорда, расположенной поблизости от Оксфорда, мои выводы были встречены всеобщим недоверием. По окончании моего доклада председатель заседания Джон Дж. Тейлор из лондонского Королевского колледжа назвал все мои результаты вздором. Он даже написал об этом статью.

Однако в конце концов большинство людей, включая Джона Тейлора, пришли к выводу, что черные дыры должны испускать излучение, как нагретые тела, если наши представления об общей теории относительности и квантовой механике верны. Таким образом, даже если мы пока не обнаружили ни одной первичной черной дыры, большинство ученых согласны с тем, что если таковая будет найдена, она должна обладать мощным гамма- и рентгеновским излучением. Если мы найдем ее, я получу Нобелевскую премию.

Существование излучения черных дыр, по-видимому, означает, что гравитационный коллапс не является таким уж окончательным и необратимым процессом, как мы предполагали. Если астронавт упадет в черную дыру, ее масса увеличится. Когда-нибудь энергия, эквивалентная этой дополнительной массе, вернется во Вселенную в виде излучения. Так что астронавт в некотором смысле подвергнется «переработке». Впрочем, это будет не очень приятный вариант бессмертия, поскольку личное ощущение времени для астронавта почти наверняка перестанет существовать, когда он будет раздавлен в черной дыре. Даже элементарные частицы, испущенные впоследствии черной дырой, будут в общем случае отличаться от тех, из которых состоял астронавт. Все, что сохранится от астронавта при попадании в черную дыру, — это его масса (или энергия).

Существование излучения черных дыр, по-видимому, означает, что гравитационный коллапс не является таким уж окончательным и необратимым процессом, как мы предполагали.

Приближения, использованные мною для оценки излучения черных дыр, должны хорошо подходить для черных дыр с массой, превышающей доли грамма. Однако они не работают, когда жизненный цикл черной дыры подходит к концу и ее масса становится очень маленькой. Кажется, что наиболее вероятным исходом будет простое исчезновение черной дыры, по крайней мере из нашей области Вселенной. Она исчезнет вместе с астронавтом и любой сингулярностью, которая может в ней заключаться. Это было первым признаком того, что квантовая механика может устранить сингулярности, предсказанные общей теорией относительности. Однако методы, которыми я и другие исследователи пользовались в 1974 г. для изучения квантовых эффектов гравитации, не давали ответов на такие вопросы, как возможность появления сингулярностей в квантовой теории гравитации.

Любое личное ощущение времени для астронавта почти наверняка перестанет существовать, когда он будет раздавлен в черной дыре.

Поэтому начиная с 1975 г. я занялся разработкой более эффективного подхода к квантовой гравитации на основе идеи суммирования по траекториям, предложен-



Если астронавт упадет в черную дыру, ее масса увеличится. Когда-нибудь энергия, эквивалентная этой дополнительной массе, вернется во Вселенную в виде излучения.

ной Фейнманом. Ответы на вопросы о происхождении и судьбе Вселенной, полученные в рамках этого подхода, будут описаны в следующих двух лекциях. Мы увидим, что квантовая механика допускает, что Вселенная может иметь начало, отличное от сингулярности. То есть законы физики могут не нарушаться в момент рождения Вселенной. Состояние Вселенной и ее содержимое, включая нас, полностью определяются законами физики вплоть до предела, установленного принципом неопределенности. Вот вам и свобода воли.

Лекция пятая

Происхождение и судьба Вселенной

На протяжении 1970-х гг. я в основном работал над проблемой черных дыр. Однако в 1981 г. во время конференции по космологии в Ватикане во мне вновь проснулся интерес к вопросам происхождения Вселенной. Католическая церковь совершила во времена Галилея большую ошибку, когда попыталась диктовать свои условия в вопросах науки, провозгласив, что Солнце обращается вокруг Земли. А теперь, столетия спустя, деятели Католической церкви решили пригласить специалистов, чтобы посоветоваться по вопросам космологии.

По окончании конференции ее участники были удостоены аудиенции у Папы Римского. Он сказал нам, что нет ничего дурного в том, чтобы изучать эволюцию Вселенной после Большого взрыва, но мы не должны углубляться в изучение самого Большого взрыва, поскольку это был момент творения, а значит, деяние Божие.

Он сказал нам, что нет ничего дурного в том, чтобы изучать эволюцию Вселенной после Большого взрыва, но мы не должны углубляться в изучение самого Большого взрыва.

Я был рад, что он не знает тему доклада, представленного мной на конференции. Мне не хотелось разделить судьбу Галилея; я очень сочувствую ему, отчасти потому, что родился три столетия спустя после его смерти.

Модель горячего Большого взрыва

Чтобы объяснить содержание моей статьи, я сначала изложу общепринятые взгляды на историю Вселенной в соответствии с моделью, известной под названием «модель горячего Большого взрыва». В ней подразумевается, что Вселенная с момента Большого взрыва описывается моделью Фридмана. В таких моделях расширение Вселенной сопровождается снижением температуры материи и излучения. Поскольку температура — это всего лишь мера средней энергии частиц, это остывание Вселенной будет сильно влиять на содержащуюся в ней материю. При очень высоких температурах частицы будут двигаться настолько быстро, что смогут преодолеть любое взаимное притяжение, обусловленное ядерными или электромагнитными силами. Однако можно ожидать, что при охлаждении частицы, притягивающиеся друг к другу, начнут слипаться.

В момент Большого взрыва размер Вселенной был равен нулю, а значит, она была бесконечно горячей. Но

по мере расширения Вселенной температура излучения уменьшалась. Через одну секунду после Большого взрыва она упала до десяти миллиардов градусов. Это примерно в тысячу раз больше температуры в центре Солнца, такие температуры бывают при взрыве водородной бомбы. В то время Вселенная состояла в основном из фотонов, электронов, нейтрино и соответствующих им античастиц, а также из некоторого числа протонов и нейтронов.

В момент Большого взрыва размер Вселенной был равен нулю, а значит, она была бесконечно горячей. Но по мере расширения Вселенной температура излучения уменьшалась.

По мере расширения Вселенной и снижения ее температуры скорость образования электронов и электронных пар при столкновении частиц становилась ниже скорости их разрушения в результате аннигиляции. Поэтому большинство электронов и антиэлектронов аннигилировали, порождая больше фотонов и оставляя совсем немного электронов.

Приблизительно через сто секунд после Большого взрыва температура должна была снизиться до одного миллиарда градусов, что соответствует температуре внутри самых горячих звезд. При такой температуре у протонов и нейтронов уже не хватает энергии, чтобы преодолеть притяжение, обусловленное сильным ядерным взаимодействием. Они начинают объединяться, образуя ядра атомов дейтерия (тяжелого водорода), состоящие из одного протона и одного нейтрона. Затем ядра дейтерия объединяются с другими протонами и нейтронами, обра-

зуя ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Появляется также небольшое количество ядер более тяжелых элементов — лития и бериллия.

Можно подсчитать, что в модели горячего Большого взрыва около четверти протонов и нейтронов должны превратиться в ядра гелия, а также в небольшое количество ядер тяжелого водорода и других элементов. Оставшиеся нейтроны распадаются на протоны, представляющие собой ядра атомов обычного водорода. Эти предсказания очень хорошо согласуются с наблюдениями.

Модель горячего Большого взрыва также предсказывает, что мы должны наблюдать излучение, оставшееся от горячих ранних этапов развития Вселенной. Однако из-за расширения Вселенной его температура должна была снизиться до нескольких градусов выше абсолютного нуля. Это объясняет происхождение микроволнового фонового излучения, открытого Пензиасом и Уилсоном в 1965 г. Поэтому мы вполне уверены в том, что построили правильную картину развития Вселенной, по крайней мере начиная с одной секунды после Большого взрыва. Всего лишь через несколько часов после Большого взрыва образование гелия и других элементов должно было прекратиться. А затем, на протяжении последующего миллиона лет или около того, Вселенная просто продолжала расширяться без каких-либо особенных событий. По прошествии некоторого времени, когда температура упала до нескольких тысяч градусов, электроны и ядра уже не обладали достаточной энергией, чтобы сопротивляться электромагнитному притяжению между ними. И они начали объединяться в атомы.

Вселенная как единое целое продолжала расширяться и остывать. Однако в областях, где плотность слегка превышала средний уровень, расширение замедлялось допол-

нительным гравитационным притяжением. Из-за этого со временем расширение в некоторых областях должно было остановиться и смениться сжатием. По мере сжатия сила притяжения материи за пределами этих областей могла заставить их медленно вращаться. Чем меньше становилась сжимающаяся область, тем быстрее она вращалась — так фигуристы ускоряют свое вращение, прижимая руки к телу. В итоге, когда эта область стала достаточно мала, частота вращения увеличилась настолько, что удалось уравновесить гравитационное притяжение. Так возникли вращающиеся дисковидные галактики.

Всего лишь через несколько часов после Большого взрыва образование гелия и других элементов должно было прекратиться. А затем, на протяжении последующего миллиона лет или около того, Вселенная просто продолжала расширяться без каких-либо особенных событий.

Со временем газ в этих галактиках распадается на облака, сжимающиеся под действием собственной гравитации. По мере сжатия температура газа увеличивается, пока он не нагревается настолько, что запускаются ядерные реакции. Водород превращается в гелий, а выделяющееся при этом тепло приводит к увеличению давления, что останавливает дальнейшее сжатие облаков. Они могут оставаться в таком состоянии долгое время, подобно нашему Солнцу, сжигая водород и превращая его в гелий и излучая энергию в виде тепла и света.

Более массивные звезды должны иметь более высокую температуру, чтобы сопротивляться более сильному



Это изображение величественной спиральной галактики NGC 4414 было получено на космическом телескопе «Хаббл» в 1995 г. Тщательно измерив блеск переменных звезд в этой галактике, астрономы смогли с высокой точностью определить расстояние до нее. Полученное расстояние (около 60 млн световых лет), а также определенные аналогичным способом расстояния до других ближайших галактик помогают астрономам больше узнать о скорости расширения Вселенной. В 1999 г. участники Комитета по наследию телескопа «Хаббл» повторно изучили снимки NGC 4414 и создали потрясающее полноцветное изображение этой пылевой спиральной галактики. На этом новом изображении видно, что центральные области этой галактики населяют в основном более старые желтые и красные звезды, что типично для большинства спиральных галактик. Внешние спиральные рукава — значительно голубее из-за продолжающегося формирования молодых голубых звезд, самые яркие из которых можно рассмотреть индивидуально благодаря высокому разрешению камер телескопа «Хаббл».

гравитационному притяжению. При этом термоядерные реакции ускоряются настолько, что такие звезды израсходуют весь свой водород всего за сто миллионов лет. Затем они слегка сжимаются и, разогреваясь, начинают преобразовывать гелий в более тяжелые элементы, такие как углерод или кислород. Однако при этом выделяется не намного больше энергии, поэтому наступает кризис, описанный мною в лекции, посвященной черным дырам.

Что происходит дальше — не совсем ясно, но, вероятно, центральные области звезды сжимаются до состояния очень высокой плотности, характерного для нейтронных звезд или черных дыр. Внешние оболочки звезды могут быть разрушены чудовищным взрывом — вспышкой сверхновой, яркость которой затмит сияние всех остальных звезд галактики. Некоторые из более тяжелых элементов, образовавшихся в конце жизни звезды, будут выброшены обратно в галактический газ. Они станут исходным материалом для следующего поколения звезд.

Внешние оболочки звезды могут быть разрушены чудовищным взрывом — вспышкой сверхновой, яркость которой затмит сияние всех остальных звезд галактики.

Наше Солнце содержит примерно 2 % таких более тяжелых элементов, поскольку это звезда второго или третьего поколения. Оно образовалось около 5 млрд лет назад из облака вращающегося газа, содержащего остатки более ранних сверхновых. Большая часть газа в этом облаке пошла на образование Солнца или была выброшена вовне. Однако небольшое количество более тяже-

лых элементов объединилось, и образовались небесные тела, которые теперь обращаются вокруг Солнца в виде планет, таких как наша Земля.

НЕРЕШЕННЫЕ ВОПРОСЫ

Картина Вселенной, которая сначала была очень горячей и остывала по мере расширения, согласуется со всеми наблюдениями, имеющимися к настоящему времени. Тем не менее она оставляет без ответа ряд важных вопросов. Во-первых, почему ранняя Вселенная была такой горячей? Во-вторых, почему Вселенная так однородна на больших масштабах — почему она выглядит одинаково из всех точек пространства и во всех направлениях?

В-третьих, почему скорость расширения на начальном этапе эволюции Вселенной была столь близка к критическому значению, что едва позволяла избежать обратного сжатия? Если бы скорость расширения через одну секунду после Большого взрыва была хотя бы на одну стомиллиардную от миллионной доли меньше, Вселенная снова сжалась бы и никогда не достигла бы своего текущего состояния. С другой стороны, если бы скорость расширения в ту секунду была на такую же мельчайшую долю больше, расширение привело бы к тому, что в настоящее время она была бы практически пустой.

В-четвертых, несмотря на тот факт, что Вселенная столь однородна и единообразна на больших масштабах, она содержит локальные скопления материи, такие как звезды и галактики. Полагают, что они развились из небольших отклонений плотности вещества в разных областях ранней Вселенной. Как возникли эти флуктуации плотности?

Если бы скорость расширения через одну секунду после Большого взрыва была хотя бы на одну стомиллиардную от миллионной доли меньше, Вселенная снова сжалась бы никогда не достигла бы своего текущего состояния.

Объяснить эти особенности или ответить на эти вопросы, опираясь только на общую теорию относительности, невозможно. Она предсказывает лишь то, что вначале Вселенная имела бесконечную плотность, это была сингулярность Большого взрыва. В этой сингулярности общая теория относительности и другие физические законы не действуют. Невозможно предсказать, что появится из сингулярности. Как я уже объяснял, это означает, что мы можем исключить из теории все события, происходившие до Большого взрыва, поскольку они не влияют на то, что мы наблюдаем. Пространство-время имеет границу — начало в момент Большого взрыва. Почему Вселенная должна была начаться с Большого взрыва именно таким образом, который привел ее к состоянию, наблюдаемому сегодня? Почему Вселенная столь однородна и расширяется именно с той критической скоростью, которая позволяет ей избежать обратного сжатия? Было бы неплохо, если бы удалось показать, что к современному состоянию Вселенной могли привести несколько различных начальных конфигураций.

Если дело обстоит именно так, то Вселенная, которая развивалась из случайных начальных условий, должна содержать ряд областей, похожих на те, что мы наблюдаем. Могли также существовать и иные области, сильно отличающиеся от наблюдаемых нами. Однако эти области,

вероятно, не подойдут для формирования галактик и звезд. Это важные условия для возникновения разумной жизни, по крайней мере в той форме, которая нам известна. Таким образом, в этих областях не будет никаких существ, которые могли бы увидеть, что эти области отличаются.

Говоря о космологии, необходимо учитывать принцип отбора, который заключается в том, что мы живем в области Вселенной, пригодной для разумной жизни. Это достаточно простое и очевидное соображение иногда называют антропным принципом. Предположим, с другой стороны, что начальное состояние Вселенной должно выбираться крайне осмотнительно, чтобы достигнуть состояния, похожего на наблюдаемое нами сегодня. Тогда во Вселенной вряд ли найдется область, где может появиться жизнь.

Начальное состояние Вселенной действительно должно было выбираться со всей тщательностью, если модель горячего Большого взрыва верна на отрезке от сегодняшнего дня до момента начала времени.

В описанной ранее модели горячего Большого взрыва в ранней Вселенной было недостаточно времени для передачи тепла от одной области к другой. Это означает, что разные области Вселенной должны были иметь абсолютно одинаковую начальную температуру, чтобы можно было объяснить тот факт, что микроволновое фоновое излучение имеет одинаковую температуру во всех направлениях. Кроме того, начальная скорость расширения должна была выбираться с высокой точностью, чтобы Вселенная не сжалась обратно к настоящему моменту.

Это означает, что начальное состояние Вселенной действительно должно было выбираться со всей тщательностью, если модель горячего Большого взрыва верна на отрезке от сегодняшнего дня до момента начала времени.

Очень трудно объяснить, почему Вселенная зародилась именно так, не прибегая к идее Божественного творения, целью которого было создание существ, подобных нам.

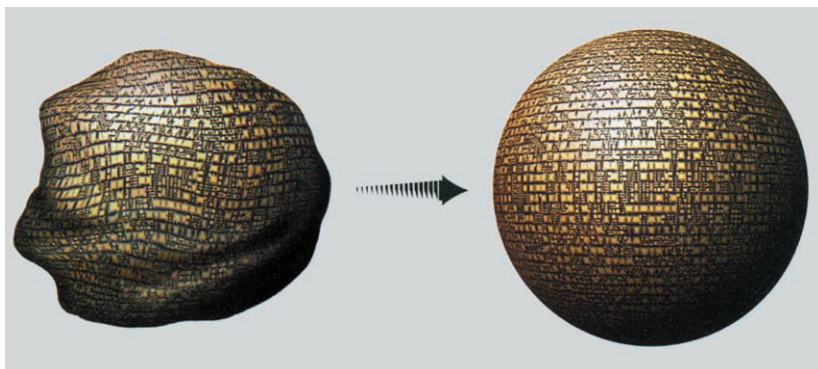
ИНФЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Чтобы избежать трудностей, связанных с начальными этапами в модели горячего Большого взрыва, Алан Гут из Массачусетского технологического института предложил новую модель. В ней несколько различных начальных конфигураций могли привести к состоянию, аналогичному современному состоянию Вселенной. Он предложил идею о том, что на начальных этапах развития Вселенной был период очень быстрого (экспоненциального) расширения. Такое расширение называют инфляционным — по аналогии с инфляцией цен, происходящей в большей или меньшей степени в любой стране. Мировой рекорд инфляции был, вероятно, установлен в Германии после Первой мировой войны, когда за несколько месяцев цена буханки хлеба выросла с одной марки до одного миллиона. Но инфляция, которая, как мы думаем, произошла в масштабах Вселенной, была гораздо больше — за мельчайшую долю секунды Вселенная выросла в миллион миллионов миллионов миллионов миллионов раз. Разумеется, это случилось до прихода к власти современного правительства.

Гут предположил, что Вселенная после Большого взрыва была очень горячей. Можно ожидать, что при таких высоких температурах сильное и слабое ядерные взаимодействия, а также электромагнитное взаимодействие представляли собой одну силу. По мере расширения Вселенная остывала и энергия частиц уменьшалась. Со временем произошел так называемый фазовый переход, и симметрия между взаимодействиями нарушилась. Сильное взаимодействие отделилось от слабого и электромагнитного. Типичным примером фазового перехода является замерзание воды (превращение ее в лед) при охлаждении. Вода симметрична — в любой точке и в любом направлении она одинакова. А образующиеся при замерзании воды кристаллы льда будут занимать определенные положения в пространстве и выстраиваться в некотором направлении. Это нарушает симметрию воды.

Проявив старание, воду можно «переохладить» — охладить ее до температуры, находящейся на шкале ниже точки замерзания, без образования льда. Гут предположил, что Вселенная может вести себя аналогичным образом: ее температура может опускаться ниже критического значения без нарушения симметрии между взаимодействиями. Если бы это произошло, Вселенная оказалась бы в нестабильном состоянии, энергия которого была бы больше, чем энергия состояния с нарушенной симметрией. Можно показать, что эта особая избыточная энергия имела бы антигравитационный эффект и действовала бы, как космологическая постоянная.

Эйнштейн ввел космологическую постоянную в общую теорию относительности, когда пытался построить стационарную модель Вселенной. Однако в данном случае Вселенная уже расширяется. Эффект отталкивания, связанный с этой космологической посто-



Вселенная могла достичь современного гладкого и однородного состояния при множестве различных неоднородных начальных состояний.

янной, заставил бы Вселенную расширяться с постоянно возрастающей скоростью. Даже в тех областях, где содержание частиц материи превышает среднее значение во Вселенной, отталкивание, обусловленное эффективной космологической постоянной, перевесило бы гравитационное притяжение материи. Так что и эти области расширялись бы в ускоренном, инфляционном режиме.

Можно охладить воду до температуры, находящейся на шкале ниже точки замерзания, без образования льда. Гут предположил, что Вселенная может вести себя аналогичным образом...

По мере расширения Вселенной расстояние между частицами материи увеличивается. Так можно получить расширяющуюся Вселенную, где едва ли содержится хоть одна частица. Вселенная все еще будет находиться в пере-

охлажденном состоянии, в котором симметрия взаимодействий не нарушена. Любые неоднородности во Вселенной будут попросту сглажены расширением, как разглаживаются складки на воздушном шарике, когда вы его надуваете. Таким образом, Вселенная могла достичь современного гладкого и однородного состояния при множестве различных неоднородных начальных состояний. Скорость расширения также могла стремиться к критическому значению, достаточному для того, чтобы избежать обратного коллапса.

Более того, идея инфляции позволяет также объяснить, почему во Вселенной так много материи. В наблюдаемой нами области Вселенной содержится примерно 10^{80} частиц. Откуда они взялись? Ответ на этот вопрос дает квантовая теория, согласно которой частицы могут рождаться из энергии в виде пар частица-античастица. Но тогда возникает вопрос: откуда появилась энергия? Ответ заключается в том, что общая энергия Вселенной в точности равна нулю.

Любые неоднородности во Вселенной будут попросту сглажены расширением, как разглаживаются складки на воздушном шарике, когда вы его надуваете.

Материя во Вселенной создана из положительной энергии. Однако вся материя притягивается под действием гравитации. Два куска материи, находящиеся близко друг к другу, обладают меньшей энергией, чем те же самые куски материи, разделенные большим расстоянием. Это связано с тем, что необходимо затратить энергию, чтобы разделить их. Требуется преодолеть силу гравитации, притяги-

вающую их друг к другу. Получается, что в некотором смысле гравитационное поле обладает отрицательной энергией. Что касается Вселенной в целом, можно показать, что эта отрицательная гравитационная энергия в точности компенсирует положительную энергию материи. Следовательно, суммарная энергия Вселенной равна нулю.

Когда размер Вселенной удваивается, положительная энергия материи и отрицательная энергия гравитации также удваиваются, так что суммарная энергия остается равной нулю.

Итак, дважды ноль будет ноль. Таким образом, во Вселенной может удвоиться количество положительной энергии материи и удвоиться количество отрицательной гравитационной энергии, причем закон сохранения энергии не нарушается. Такого не происходит при обычном расширении Вселенной, при котором плотность энергии вещества уменьшается с увеличением размеров Вселенной. Однако это происходит при инфляционном расширении, поскольку плотность энергии в переохлажденном состоянии остается постоянной, тогда как Вселенная расширяется. Когда размер Вселенной удваивается, положительная энергия материи и отрицательная энергия гравитации также удваиваются, так что суммарная энергия остается равной нулю. Во время инфляционной фазы размер Вселенной сильно увеличивается. Следовательно, общее количество энергии, доступной для образования частиц, становится очень большим. Как отметил Гут: «Говорят, что бесплатных обедов не бывает, но Вселенная — это самый настоящий бесплатный обед».

КОНЕЦ ИНФЛЯЦИИ

В настоящее время Вселенная уже не расширяется в инфляционном режиме. Поэтому должен был существовать некий механизм, исключающий очень большую эффективную космологическую постоянную. Он должен был изменить скорость расширения с возрастающей на ту скорость, которая наблюдается сейчас, то есть замедленную гравитацией. Можно ожидать, что со временем, по мере расширения и остывания Вселенной, симметрия между взаимодействиями нарушается, подобно тому как переохлажденная вода в конце концов всегда замерзает. Тогда избыточная энергия состояния с ненарушенной симметрией высвобождается и вновь нагревает Вселенную. Затем Вселенная продолжает расширяться и остывать, совсем как в модели горячего Большого взрыва. Однако теперь у нас будет объяснение, почему Вселенная расширялась именно с критической скоростью и почему разные области имели одинаковую температуру.

В первоначальной модели Гута предполагалось, что переход к состоянию с нарушенной симметрией происходит внезапно, подобно появлению кристаллов льда в очень холодной воде. Идея заключалась в том, что «пузырьки» нового фазового состояния с нарушенной симметрией могли сформироваться в старом фазовом состоянии, как пузырьки пара в кипящей воде. Предполагалось, что пузырьки расширяются и сливаются друг с другом, пока вся Вселенная не окажется в новой фазе. Проблема заключалась в том, что, как заметили я и другие ученые, Вселенная расширялась настолько быстро, что пузырьки не успевали бы слиться, так как удалялись бы друг от друга слишком быстро.

Вселенная оказалась бы в очень неоднородном состоянии, в котором в некоторых областях все еще сохранялась бы симметрия между разными взаимодействиями. Такая модель Вселенной не соответствовала бы тому, что мы наблюдаем.

В первоначальной модели Гута предполагалось, что переход к состоянию с нарушенной симметрией происходит внезапно, подобно появлению кристаллов льда в очень холодной воде.

В октябре 1981 г. я приехал в Москву на конференцию по квантовой гравитации. После конференции я провел семинар, посвященный инфляционной модели, в Астрономическом институте им. Штернберга. В нем участвовал молодой российский ученый Андрей Линде. Он сказал, что трудность, связанную с тем, что пузырьки не сливаются, можно преодолеть, если предположить, что пузырьки были очень большими. В этом случае наша область Вселенной могла бы содержаться внутри одного пузырька. Чтобы работала эта модель, переход от симметрии к нарушенной симметрии должен был происходить внутри пузырька очень медленно, что вполне возможно в соответствии с теориями великого объединения.

Гипотеза Линде о медленном нарушении симметрии была очень хороша, но я обратил его внимание на то, что размер таких пузырьков был бы больше размера Вселенной в то время. Я показал, что симметрия нарушилась бы везде одновременно, а не только внутри пузырьков. Это привело бы к однородной Вселенной, какую мы и наблюда-

даем. Модель медленного нарушения симметрии была хорошей попыткой объяснить, почему Вселенная такова, какова она есть. Однако я и несколько других исследователей показали, что предсказанные ею вариации микроволнового фонового излучения значительно превышают наблюдаемые. Кроме того, более поздние работы поставили под сомнение идею о том, что на ранних этапах развития Вселенной могли происходить правильные фазовые переходы. Более удачная модель, называемая моделью хаотической инфляции, была предложена Линде в 1983 г. Она не зависит от фазовых переходов и дает правильные значения вариаций микроволнового фонового излучения. Эта инфляционная модель показала, что современное состояние Вселенной могло стать результатом развития из достаточно большого числа различных начальных конфигураций. Однако нельзя сказать, что любая начальная конфигурация привела бы к появлению такой Вселенной, какую мы наблюдаем. Таким образом, даже инфляционная модель не отвечает на вопрос, почему начальная конфигурация была такой, которая может привести к наблюдаемому состоянию Вселенной. Может быть, нам следует искать объяснение, обратившись к антропному принципу? Возможно, все это было просто счастливой случайностью? Тогда это было бы шагом отчаяния, отказом от всех наших надежд понять законы, лежащие в основе Вселенной.

Модель медленного нарушения симметрии была хорошей попыткой объяснить, почему Вселенная такова, какова она есть.

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Чтобы предсказать, как должна была зародиться Вселенная, необходимо знать законы, которые действовали в начале времени. Если классическая общая теория относительности была верна, то из теоремы о сингулярности следует, что начало времени должно было представлять собой точку, в которой плотность и кривизна были бесконечны. В этой точке все известные законы физики нарушаются. Можно предположить, что существовали особые законы, действующие в сингулярностях, но даже сформулировать законы для таких необычных точек было бы очень непросто, причем наблюдения никак не помогли бы нам узнать, каковы эти законы. Однако теоремы о сингулярностях указывают на то, что гравитационное поле становится настолько сильным, что квантовые гравитационные эффекты приобретают особую важность — классическая теория больше не может служить адекватным описанием Вселенной. Чтобы рассуждать о ранних этапах эволюции Вселенной, необходимо использовать квантовую теорию гравитации. Как мы увидим, в квантовой теории гравитации обычные законы природы могут выполняться везде, включая начало времени. Нет нужды устанавливать новые законы для сингулярностей, поскольку в квантовой теории никакие сингулярности не нужны.

Полной и последовательной теории, объединяющей квантовую механику и гравитацию, пока не существует. Тем не менее мы абсолютно уверены в некоторых особенностях, которыми должна обладать такая единая теория. Во-первых, в ней должно учитываться предложение Фейнмана о формулировании квантовой теории в терминах суммы по историям (траекториям). При таком

подходе частица, перемещающаяся из точки А в точку Б, имеет не одну историю, как в классической теории. Предполагается, что она проходит все возможные пути в пространстве-времени. С каждой из этих историй связана пара чисел: одно характеризует размер волны, а другое — ее положение в цикле (ее фазу).

Полной и последовательной теории, объединяющей квантовую механику и гравитацию, пока не существует. Тем не менее мы абсолютно уверены в некоторых особенностях, которыми должна обладать такая единая теория.

Вероятность того, что частица проходит через определенную точку, вычисляется путем сложения волн, связанных с каждой возможной историей, проходящей через эту точку. Однако те, кто пытается выполнить такое суммирование, сталкиваются с серьезными трудностями технического характера. Единственный способ обойти их — воспользоваться следующим своеобразным рецептом: необходимо складывать волны для историй, относящихся не к действительному времени, в котором мы живем, а к мнимому.

Слова «мнимое время» звучат так, будто взяты из научной фантастики, но на самом деле это строго определенное математическое понятие. Чтобы избежать технических трудностей, связанных с фейнмановским суммированием по историям, необходимо использовать мнимое время. Это любопытным образом влияет на пространство-время: различие между пространством и временем полностью стирается. Пространство-время, в котором



В евклидовом пространстве-времени нет разницы между направлением времени и направлениями в пространстве.

события имеют мнимые значения координаты времени, называется евклидовым, поскольку его метрика является положительно определенной.

В евклидовом пространстве-времени нет разницы между направлением времени и направлениями в пространстве. С другой стороны, в реальном пространстве-времени, в котором события имеют действительные значения координаты времени, различия очевидны. Направление времени лежит внутри светового конуса, а пространственные направления — вне его. Можно считать использование мнимого времени всего лишь математическим приемом

(или хитростью) для вычисления результатов, относящихся к действительному пространству-времени. Однако все намного сложнее. Возможно, евклидово пространство-время является фундаментальным понятием, а то, что мы считаем действительным пространством-временем, — это всего лишь плод нашего воображения.

Когда мы применяем для Вселенной фейнмановское суммирование по историям, аналогом истории частицы теперь является все искривленное пространство-время, представляющее историю всей Вселенной. Из технических соображений, о которых говорилось выше, это искривленное пространство-время должно считаться евклидовым. То есть время является мнимым и неотличимо от направлений в пространстве. Чтобы вычислить вероятность обнаружения действительного пространства-времени с определенными свойствами, необходимо сложить волны, связанные со всеми историями в мнимом времени, которые обладают этими свойствами. Тогда можно узнать, какой будет вероятная история Вселенной в действительном времени.

УСЛОВИЕ ОТСУТСТВИЯ ГРАНИЦЫ

В классической теории гравитации, которая опирается на действительное пространство-время, имеется только два возможных варианта поведения Вселенной. Она либо существовала вечно, либо родилась из сингулярности в определенный конечный момент времени в прошлом. В действительности теоремы о сингулярности показывают, что должен был иметь место второй вариант. Однако в квантовой теории гравитации возникает третья возможность. Поскольку используется евклидово пространство-время, в котором направление времени не



Эта фотография поверхности Земли в районе Синайского полуострова и Мертвого моря была сделана astronautами с борта многоцветного космического корабля «Колумбия» на 70-миллиметровую пленку. В квантовой теории гравитации пространство-время похоже на поверхность Земли — оно конечно по протяженности, но не имеет границы или края.

отличается от направлений в пространстве, пространство-время может быть конечным по протяженности и при этом не иметь сингулярностей, образующих границу или край. Оно будет похоже на поверхность Земли, но с добавлением еще двух измерений. Поверхность Земли конечна по протяженности, но не имеет границы или края. Если вы отправитесь в плавание в сторону

заходящего солнца, то не упадете за край и не угодите в сингулярность. Уж я-то знаю, поскольку совершил кругосветное путешествие.

Если евклидово пространство-время возвращает нас к бесконечному мнимому времени или началу в сингулярности, перед нами встает та же проблема определения начального состояния Вселенной, что и в классической теории. Бог, возможно, знает, как началась Вселенная, но мы не можем придумать конкретную причину, чтобы предпочесть один вариант другому. С другой стороны, квантовая теория гравитации открыла перед нами новую возможность. В ней пространство-время не имеет границы. Поэтому задавать поведение Вселенной на границе не нужно. Нет сингулярностей, где нарушаются законы физики, нет границы пространства-времени, где приходится обращаться к Богу или выводить новый закон, чтобы задать граничные условия для пространства-времени. Можно было бы сказать так: «Граничное условие для Вселенной заключается в отсутствии границы». Вселенная, вероятно, является абсолютно автономной и независимой от внешних факторов. Она не может быть создана или уничтожена. Она просто существует.

Пространство-время может быть конечным по протяженности и при этом не иметь сингулярностей, образующих границу или край.

Именно на конференции в Ватикане я впервые выдвинул предположение о том, что, возможно, пространство и время в совокупности образуют поверхность, имеющую конечные размеры, но не имеющую

границы или края. Моя работа была скорее математической, поэтому ее потенциальные последствия для определения роли Бога в создании Вселенной в тот момент остались незамеченными, в том числе и для меня. Во время ватиканской конференции я не понимал, как использовать идею об отсутствии границы для предсказания свойств Вселенной. Впрочем, следующее лето я провел в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре. Там мы с моим другом и коллегой Джимом Хартлом сформулировали условия, которым должна удовлетворять Вселенная, если пространство-время не имеет границы.

Любая модель, подробно описывающая всю Вселенную, будет слишком сложна математически для того, чтобы мы могли точно рассчитать теоретические значения интересных величин.

Следует подчеркнуть, что идея о том, что пространство и время должны быть конечны, но не имеют границы, — всего лишь предположение. Она не следует из какого-либо другого принципа. Как и любая другая научная теория, изначально она может быть выдвинута по эстетическим или метафизическим соображениям, но проверяется она по соответствию теоретических предсказаний наблюдениям. Однако в случае квантовой гравитации сделать это непросто по двум причинам. Во-первых, мы пока не знаем наверняка, какая теория успешно объединяет в себе общую теорию относительности и квантовую механику, хотя нам достаточно много известно о том, какую форму должна иметь такая теория. Во-вторых, любая модель, подробно описывающая всю Вселенную,



Вселенная, расширяющаяся и сжимающаяся в мнимом времени.

будет слишком сложна математически для того, чтобы мы могли точно рассчитать теоретические значения интересующих величин. Поэтому придется использовать приблизительные оценки — и даже тогда проблема расчета теоретических значений остается сложной.

Выясняется, что если принять предположение об отсутствии границы, то шансы обнаружить, что Вселенная следует большинству возможных историй, ничтожны. Но существует особое семейство историй, вероятность которых существенно выше по сравнению с остальными. Эти истории можно представить себе как поверхность Земли, где расстояние от Северного полюса отражает мнимое время, а размер широтного круга — пространственный размер Вселенной. Вселенная начинается на Северном полюсе в виде точки. По мере продвижения на юг широтный круг увеличивается, что соответствует расширению Вселенной с течением мнимого времени. Вселенная достигнет максимального размера на экваторе и снова сойдется в одну точку на Южном полюсе. Даже если бы Вселенная на Северном и Южном полюсах имела нулевой размер, эти точки не были бы сингулярностями, как не являются ими Северный и Южный полюса Земли. Законы природы будут выполняться в начале Вселенной подобно тому, как они выполняются на Северном и Южном полюсах Земли.

Однако история Вселенной в действительном времени выглядела бы совершенно иначе. Она начиналась бы с некоторого минимального размера, равного максимальному размеру истории в мнимом времени. Затем Вселенная расширялась бы в действительном времени аналогично тому, как она расширяется в инфляционной модели. Впрочем, теперь не нужно предполагать, что Вселенная была создана тем или иным образом в правильном состоянии. Вселенная расширилась бы до гигантских размеров, но рано или поздно сжалась бы обратно в некое подобие сингулярности в действительном времени. Так что в каком-то смысле мы все обречены, даже если будем держаться подальше от черных дыр. Избежать сингуляр-

ностей можно только в том случае, если представить Вселенную в терминах мнимого времени.

Теоремы о сингулярности в классической общей теории относительности показали, что Вселенная должна иметь начало и это начало должно описываться с помощью квантовой теории. Это, в свою очередь, привело к идее о том, что Вселенная может быть конечной в мнимом времени, но не иметь границ или сингулярностей. Однако если вернуться к действительному времени, в котором мы живем, то в нем, по-видимому, все же будут существовать сингулярности. И несчастного астронавта, падающего в черную дыру, все так же ждет печальная участь. Только способность жить в мнимом времени помогла бы ему избежать встречи с сингулярностями.

Это может означать, что так называемое мнимое время на самом деле является основным, а то, что мы называем действительным временем, — лишь создание нашего разума. В действительном времени Вселенная имеет начало и конец в сингулярностях, которые образуют границу пространства-времени и в которых не действуют законы природы. Но в мнимом времени нет сингулярностей или границ. Так что быть может то, что мы называем мнимым временем, на самом деле является основным, а действительное время — это всего лишь придуманное нами понятие, помогающее нам описывать свои представления о Вселенной. Но в соответствии с подходом, который я изложил в первой лекции, научная теория — это всего лишь математическая модель, построенная нами для описания наблюдений. Она существует только в нашем разуме. Так что нет смысла спрашивать: что реально — «действительное» или «мнимое» время? Суть в том, какое из них удобнее использовать для описания наблюдений.



Снимки глубокого космоса, полученные на космическом телескопе «Хаббл», наводят на мысль о том, что появление самых первых звезд во Вселенной могло происходить так же эффектно и ярко, как заключительный аккорд фейерверка. Только в данном случае этот заключительный аккорд «прозвучал» задолго до образования Млечного Пути, Солнца и Земли. Изучение снимков глубокого космоса позволяет сделать предварительный вывод о том, что значительная часть звезд появилась во Вселенной во время бурной вспышки звездообразования, которая внезапно озарила крошечную тьму небес всего через несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва — грандиозного взрыва, в результате которого был создан космос. Звезды рождаются в галактиках и в настоящее время, однако темп звездообразования напоминает тонкую струйку в сравнении с мощным фонтаном рождающихся звезд, который, согласно расчетам, озарял Вселенную в те ранние годы изобилия.

По всей видимости, предположение об отсутствии границы предсказывает, что в действительном времени Вселенная должна развиваться в соответствии с инфляционными моделями. Особый интерес представляет вопрос величины малых отклонений от равномерной плотности в ранней Вселенной. Полагают, что они привели к образованию галактик, затем звезд и, наконец, таких существ, как мы. Из принципа неопределенности следует, что ранняя Вселенная не могла быть совершенно однородной. Наоборот, должны были иметь место некоторые неопределенности, или флуктуации, положений и скоростей частиц. Используя условие отсутствия границы, можно показать, что Вселенная должна была начаться с минимальной возможной неоднородности, допускаемой принципом неопределенности.

Быть может то, что мы называем мнимым временем, на самом деле является основным, а действительное время — это всего лишь придуманное нами понятие, помогающее нам описывать свои представления о Вселенной.

Затем Вселенная должна была пережить период стремительного расширения, как в инфляционных моделях. В течение этого периода исходные неоднородности, вероятно, увеличились до размеров, достаточных для того, чтобы объяснить возникновение галактик. Таким образом, все сложные структуры, наблюдаемые во Вселенной, можно объяснить, опираясь на условие отсутствия границы Вселенной и принцип неопределенности квантовой механики.

Идея о том, что пространство и время могут образовывать замкнутую поверхность без границы, имеет также серьезные последствия для определения роли Бога в вопросах, связанных с существованием Вселенной. Успех научных теорий в описании физических явлений привел к тому, что большинство людей уверовали в то, что Бог позволяет Вселенной развиваться в соответствии с некоторым набором физических законов. По-видимому, Он не вмешивается в ход развития Вселенной и не нарушает эти законы. Однако эти законы не сообщают нам, какой была Вселенная в момент своего возникновения. Право завести часовой механизм и решить, как его запустить, по-прежнему остается прерогативой Бога.

В том случае, если Вселенная имеет начало в виде сингулярности, можно предполагать, что она была создана некой внешней силой. Но если Вселенная действительно полностью замкнута и не имеет границы или края, она не может быть ни создана, ни уничтожена. Она просто существует. Зачем тогда нужен Создатель?

Идея о том, что пространство и время могут образовывать замкнутую поверхность без границы, имеет также серьезные последствия для определения роли Бога в вопросах, связанных с существованием Вселенной.

Лекция шестая

Направление времени

В своем романе «Посредник» Лесли Поулз Хартли пишет: «Прошлое — это другая страна. Там все иначе. Но почему прошлое так отличается от будущего? Почему мы помним прошлое и не помним будущее?» Иными словами, почему время течет вперед? Связано ли это с расширением Вселенной?

ОПЕРАЦИИ С, Р, Т

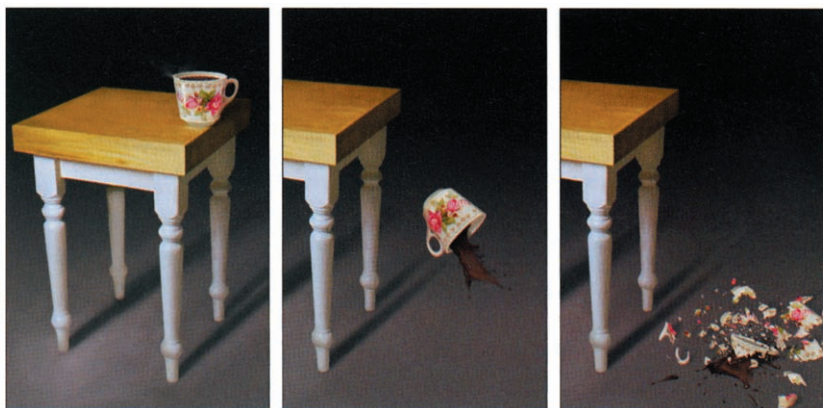
Законы физики не делают различия между прошлым и будущим. Точнее, законы физики не меняются при сочетании операций, обозначаемых С, Р и Т. (С означает замену частиц античастицами. Р — зеркальное отражение, когда право и лево меняются местами. Т означает изменение направления движения всех частиц на противоположное — обращение движения вспять.) Законы физики, управляющие поведением материи при нормальных условиях, не изменяются при операциях С и Р. Иными словами, жизнь обитателей другой планеты, являющихся нашими зеркальными отражениями и состоящих из антиматерии, ничем не отличалась бы от нашей.

Если вы встретите инопланетянина и он протянет вам левую руку, не пожимайте ее. Он может состоять из антиматерии. Вы оба исчезнете в грандиозной вспышке света. Если законы физики не изменяются при комбинации операций S и P , а также операций S , P и T , они должны оставаться неизменными и при операции T . И все же в обычной жизни существует большая разница между прямым и обратным направлениями времени. Представьте себе чашку воды, которая падает со стола и разбивается на мелкие осколки. Если снять об этом фильм, то вы сможете легко определить, когда его показывают в прямом направлении, а когда — в обратном. Если показывать его в обратном направлении, то вы увидите, как осколки внезапно собираются вместе и «запрыгивают» с пола обратно на стол, образуя целую чашку. Вы понимаете, что фильм показывают в обратном направлении, поскольку в обычной жизни такое никогда не случается. В противном случае производители посуды давно бы разорились.

Жизнь обитателей другой планеты, являющихся нашими зеркальными отражениями и состоящих из антиматерии, ничем не отличалась бы от нашей.

СТРЕЛЫ ВРЕМЕНИ

Обычно тот факт, что мы не видим, как разбитая чашка «запрыгивает» обратно на стол, объясняют тем, что это запрещено вторым законом термодинамики. Он гласит, что беспорядок, или энтропия, всегда возрастает с течением времени. Иными словами, это закон Мерфи: собы-



В обычной жизни существует большая разница между прямым и обратным направлениями времени.

тия имеют тенденцию развиваться в худшую сторону. Целая чашка на столе — это высокоупорядоченное состояние, а разбитая чашка на полу — неупорядоченное. Поэтому события могут развиваться от состояния целой чашки на столе в прошлом к состоянию разбитой чашки на полу в будущем, а не наоборот.

Стрела времени — нечто, что указывает направление времени и позволяет различать прошлое и будущее.

Возрастание беспорядка, или энтропии, с течением времени является одним из примеров того, что называется стрелой времени — того, что указывает направление времени и позволяет различать прошлое и будущее. Существуют по крайней мере три различные стре-

лы времени. Во-первых, термодинамическая стрела времени — направление времени, в котором возрастает беспорядок, или энтропия. Во-вторых, психологическая стрела времени. Это направление течения времени, как мы его ощущаем, — то направление времени, в котором мы помним прошлое, но не помним будущее. В-третьих, космологическая стрела времени. Это направление времени, в котором Вселенная расширяется, а не сжимается.

Я покажу, что психологическая стрела времени определяется термодинамической и что обе эти стрелы всегда указывают в одном направлении. Если предположить, что Вселенная не имеет границы, обе эти стрелы связаны с космологической стрелой времени, хотя они могут и не указывать в том же направлении. Впрочем, я покажу, что только когда они совпадают с космологической стрелой времени, могут появиться разумные существа, способные задать вопрос: почему беспорядок возрастает в том же направлении времени, в котором Вселенная расширяется?

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРЕЛА

Сначала я расскажу о термодинамической стреле времени. Второй закон термодинамики опирается на тот факт, что неупорядоченных состояний намного больше, чем упорядоченных. Например, рассмотрим фрагменты пазла в коробке. Существует одна и только одна комбинация, при которой эти фрагменты образуют завершенную картинку. С другой стороны, существует много комбинаций, при которых фрагменты не упорядочены и не образуют картинки.

Предположим, что система сначала находится в одном из небольшого числа упорядоченных состояний. С течением времени она будет развиваться по законам физики и ее состояние изменится. Впоследствии она с высокой вероятностью окажется в более неупорядоченном состоянии просто потому, что таких состояний гораздо больше. Таким образом, беспорядок имеет тенденцию возрастать с течением времени, если система удовлетворяет начальному условию, требующему, чтобы ее исходное состояние было высокоупорядоченным.

Беспорядок будет возрастать с течением времени, если система удовлетворяет начальному условию, требующему, чтобы ее исходное состояние было высокоупорядоченным.

Предположим, что изначально фрагменты пазла были упорядочены, то есть составлены таким образом, что получалась картинка. Если встряхнуть коробку, комбинация фрагментов окажется другой. Вероятно, это будет неупорядоченное сочетание, в котором фрагменты не образуют целостную картинку, так случится просто потому, что неупорядоченных сочетаний гораздо больше. Некоторые группы фрагментов могут по-прежнему образовывать части картинки, но чем больше трясти коробку, тем более вероятно, что эти группы распадутся. Фрагменты совсем перепутаются и не будут составлять никакой картинки. Таким образом, с течением времени неупорядоченность фрагментов, вероятно, будет возрастать, если изначально они находились в упорядоченном состоянии.

Однако предположим, что Бог решил, что Вселенная должна закончить свое существование в состоянии высокой упорядоченности независимо от того, в каком состоянии она пребывала изначально. В этом случае в более ранние времена Вселенная, скорее всего, находилась в неупорядоченном состоянии, и беспорядок с течением времени становился меньше. Осколки разбитых чашек собирались, образуя целые чашки, которые снова оказывались на столе. Однако любой человек, наблюдающий за этими чашками, жил бы во Вселенной, в которой беспорядок убывает с течением времени. Я покажу, что психологическая стрела времени у таких людей указывала бы в обратном направлении. То есть они бы помнили события, происходящие позднее, и не помнили события, происходившие ранее.

ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ СТРЕЛА

Рассуждать о человеческой памяти весьма непросто, поскольку нам неизвестны все подробности работы нашего мозга. Однако мы знаем все о том, как работает память компьютера. Поэтому я буду рассуждать о психологической стреле времени для компьютеров. Думаю, что разумным будет предположить, что стрела времени одинакова для компьютеров и для людей. В противном случае кто-нибудь мог бы получать колоссальные прибыли на фондовой бирже с помощью компьютера, который помнит завтрашние цены.

Память компьютера — это по существу некое устройство, которое может находиться в одном из двух состояний. Примером может служить сверхпроводящая петля из проволоки. Если в ней есть электрический ток, он

будет продолжать течь, поскольку сопротивление отсутствует. С другой стороны, если тока нет, петля будет существовать без него. Можно обозначить эти два состояния памяти как «единица» и «ноль».

Прежде чем элемент записан в память, она имеет неупорядоченное состояние с равной вероятностью принять значение 1 или 0. После взаимодействия с системой, которую необходимо запомнить, память окажется в одном из этих двух состояний в зависимости от состояния системы. Таким образом, память переходит из неупорядоченного состояния в упорядоченное. Однако чтобы убедиться, что память находится в правильном состоянии, необходимо использовать определенное количество энергии. Эта энергия рассеивается в виде тепла и увеличивает степень неупорядоченности во Вселенной. Можно показать, что этот рост неупорядоченности превышает рост упорядоченности памяти. Таким образом, когда компьютер записывает элемент в память, общее количество неупорядоченности во Вселенной возрастает.

Прежде чем элемент записан в память, она имеет неупорядоченное состояние с равной вероятностью принять значение 1 или 0.

Направление времени, в котором компьютер помнит прошлое, совпадает с направлением времени, в котором растет беспорядок. Это означает, что наше субъективное ощущение направления времени (психологическая стрела времени) определяется термодинамической стрелой времени. Это делает второй закон термодинамики почти

тривиальным. Беспорядок растет с течением времени, поскольку мы отсчитываем время в направлении, в котором нарастает беспорядок. Это — беспроеигрышное пари.

Наше субъективное ощущение направления времени (психологическая стрела времени) определяется термодинамической стрелой времени.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ВСЕЛЕННОЙ

Но почему Вселенная должна была находиться в состоянии высокой упорядоченности на одном конце времени — том, который мы называем пошлым? Почему она не пребывала в состоянии полного беспорядка все время? Ведь это кажется более вероятным. И почему направление времени, в котором нарастает беспорядок, совпадает с направлением времени, в котором Вселенная расширяется? Один из возможных ответов заключается в том, что Бог просто пожелал, чтобы в начале фазы расширения Вселенная находилась в однородном и упорядоченном состоянии. Мы не должны стремиться понять причину или Его мотивы, поскольку рождение Вселенной — это дело Божие. Но тогда можно сказать, что и вся история Вселенной — Божьих рук дело.

Судя по всему, Вселенная развивается по определенным законам. Эти законы могут быть установлены Богом, а могут действовать и без Его участия, но, по-видимому, мы способны открывать и постигать их. Тогда разве нет у нас оснований надеяться, что те же или подобные законы могли также действовать и в момент зарождения Все-

ленной? В классической общей теории относительности Вселенная начинается с сингулярности, характеризующейся бесконечной плотностью и бесконечной кривизной пространства-времени. При таких условиях должны нарушаться все законы физики. Так что их нельзя использовать для предсказания того, как начиналась Вселенная.

Изначально Вселенная могла находиться в очень однородном и упорядоченном состоянии. Это привело к существованию четко определенных термодинамической и космологической стрел времени, как мы и наблюдаем. Но с такой же вероятностью начальное состояние Вселенной могло быть очень неоднородным и неупорядоченным. В этом случае Вселенная уже была бы в состоянии полного хаоса, так что беспорядок не мог возрастать со временем. Он оставался бы неизменным (тогда не существовало бы четко определенной термодинамической стрелы времени) либо уменьшался бы (тогда термодинамическая и космологическая стрелы времени были бы направлены в противоположные стороны). Ни одна из этих возможностей не согласуется с наблюдениями.

Как я уже говорил, классическая общая теория относительности предсказывает, что развитие Вселенной должно начаться с сингулярности, в которой кривизна пространства-времени бесконечна. В сущности это означает, что классическая общая теория относительности предсказывает собственный крах. При большой кривизне пространства-времени эффекты квантовой гравитации становятся значительными, и классическая теория уже не дает адекватного описания Вселенной. Чтобы понять, как зародилась Вселенная, необходимо использовать квантовую теорию гравитации.

В квантовой теории гравитации рассматриваются все возможные истории развития Вселенной. С каждой исто-

рией связана пара чисел. Одно описывает размер волны, а другое — ее фазу, то есть гребень это или впадина. Вероятность того, что Вселенная обладает конкретным свойством, определяется сложением волн, соответствующих всем историям, которые обладают этим свойством. Истории представляют собой искривленные пространства, описывающие эволюцию Вселенной с течением времени. По-прежнему необходимо указать, как возможные истории Вселенной должны вести себя на границе пространства-времени в прошлом. Мы не знаем и не можем знать граничные условия для Вселенной в прошлом. Однако этой трудности можно избежать, если граничное условие для Вселенной заключается в том, что она не имеет границ.

В квантовой теории гравитации рассматриваются все возможные истории развития Вселенной.

Иными словами, все возможные истории конечны по протяженности, но не имеют границ, краев или сингулярностей. Они напоминают поверхность Земли, но с двумя дополнительными измерениями. В этом случае начало времени должно быть обычной гладкой точкой пространства-времени. Это означает, что расширение Вселенной должно было начаться с очень гладкого и упорядоченного состояния. Оно не могло быть совершенно однородным, поскольку при этом нарушался бы принцип неопределенности квантовой механики. Должны были существовать небольшие отклонения плотности и скоростей частиц. Однако условие отсутствия границы предполагает, что эти флуктуации должны иметь мини-

мальные возможные значения в соответствии с принципом неопределенности.

Развитие Вселенной могло начаться с периода экспоненциального (инфляционного) расширения. При этом Вселенная увеличилась бы в размерах во много раз. Во время такого расширения флуктуации плотности на первых порах, вероятно, оставались небольшими, но впоследствии начали расти. В областях, где плотность была чуть выше среднего значения, расширение замедлялось вследствие гравитационного притяжения, обусловленного дополнительной массой. Со временем такие области прекратили бы расширяться и начали коллапсировать, образуя галактики, звезды и существ, подобных нам.

Развитие Вселенной могло начаться с периода экспоненциального (инфляционного) расширения. При этом Вселенная увеличилась бы в размерах во много раз.

Вселенная могла находиться изначально в очень однородном и упорядоченном состоянии и со временем стать неоднородной и неупорядоченной. Это объяснило бы существование термодинамической стрелы времени. Развитие Вселенной могло начаться с высокоупорядоченного состояния, а с течением времени она становилась все более неупорядоченной. Как я показал ранее, психологическая стрела времени указывает в том же направлении, что и термодинамическая. Поэтому наше субъективное ощущение времени скорее имело бы то же направление, в котором Вселенная расширяется, нежели противоположное, в котором Вселенная сжимается.

ОБРАТИМА ЛИ СТРЕЛА ВРЕМЕНИ?

А что произойдет, если расширение Вселенной сменится сжатием? Изменится ли направление термодинамической стрелы на противоположное, начнет ли неупорядоченность уменьшаться с течением времени? Перед людьми, пережившими переход от расширения к сжатию, открылся бы целый спектр возможностей в духе научной фантастики. Увидят ли они, как разбитые чашки снова становятся целыми и оказываются на столе? Будут ли помнить завтрашний курс акций и смогут ли разбогатеть, играя на фондовой бирже?

Вопрос о том, что произойдет, когда Вселенная начнет обратно сжиматься, может показаться чисто теоретическим, поскольку этого не произойдет по крайней мере в ближайшие десять миллиардов лет. Но существует более быстрый способ узнать, что случится. Для этого можно прыгнуть в черную дыру. Коллапс звезды, приводящий к образованию черной дыры, во многом напоминает поздние этапы коллапса Вселенной. Так что если при сжатии Вселенной беспорядок уменьшается, можно ожидать, что он уменьшается и в черной дыре. Возможно, астронавт, падающий в черную дыру, сможет выиграть в рулетку, поскольку до того, как сделать ставку, будет помнить, куда попадет шарик. К сожалению, очень сильные гравитационные поля оставят ему совсем немного времени на игру, прежде чем превратят его в спагетти. Он также не сможет ни сообщить нам об изменении направления термодинамической стрелы времени на противоположное, ни положить свой выигрыш в банк, поскольку окажется в ловушке за горизонтом событий черной дыры.

Коллапс звезды, приводящий к образованию черной дыры, во многом напоминает поздние этапы коллапса Вселенной.

Сначала я верил в уменьшение беспорядка при обратном сжатии Вселенной, поскольку думал, что Вселенная должна вернуться в однородное и упорядоченное состояние, когда снова станет маленькой. Это означало бы, что фаза сжатия аналогична обращению времени для фазы расширения. Люди в фазе сжатия проживали бы жизнь в обратном направлении — от конца к началу. Они умирали бы раньше, чем рождались, и становились бы моложе по мере сжатия Вселенной. Эта идея — весьма привлекательна, так как означала бы симметрию фаз расширения и сжатия. Однако невозможно принять ее саму по себе, независимо от других представлений о Вселенной. Встает вопрос: согласуется она или нет с условием отсутствия границы?

Как упоминалось выше, сначала я думал, что условие отсутствия границы действительно предполагает уменьшение беспорядка в фазе сжатия. К такому выводу привело изучение простой модели Вселенной, в которой фаза сжатия выглядела как фаза расширения с измененным на противоположное направлением течения времени. Однако мой коллега Дон Пейдж обратил внимание на то, что условие отсутствия границы не требует, чтобы фаза сжатия обязательно соответствовала бы обращению времени для фазы расширения. Впоследствии один из моих студентов Рэймонд Лафламм обнаружил, что в несколько более сложной модели коллапс Вселенной значительно отличается от расширения.

Я понял, что совершил ошибку. На самом деле условие отсутствия границы предполагало, что во время сжатия беспорядок продолжит расти. Термодинамическая и психологическая стрелы времени не сменяют направление на обратное при переходе к сжатию Вселенной или внутри черной дыры.

Условие отсутствия границы не требует, чтобы фаза сжатия обязательно соответствовала бы обращению времени для фазы расширения.

Что бы вы сделали, совершив такую ошибку? Некоторые люди, подобно Эддингтону, никогда не признают, что были неправы. Они продолжают искать новые, иногда взаимоисключающие, доводы в поддержку своей гипотезы. Другие утверждают, что никогда не поддерживали ошибочную точку зрения, а если и поддерживали, так только чтобы доказать ее несостоятельность. Я мог бы привести множество примеров такого поведения, но не стану этого делать, чтобы не вызвать недовольство окружающих. Мне кажется, что гораздо лучше и достойнее признать свою ошибку в печатном виде. Хорошим примером может служить Эйнштейн, который признал, что космологическая постоянная, введенная им при попытке построить стационарную модель Вселенной, была величайшей ошибкой в его жизни.

Лекция седьмая

Теория всего

Создать полную единую теорию всего на свете с одной попытки было бы очень непросто. Поэтому мы продвигались вперед, создавая частные теории. Они описывают ограниченный диапазон явлений, пренебрегая другими эффектами или аппроксимируя их определенными величинами. Например, в химии мы можем рассчитать взаимодействия между атомами, не зная внутреннего строения атомного ядра. Однако в конечном итоге мы надеемся построить полную, непротиворечивую, единую теорию, включающую в себя все частные теории в виде приближений. Поиски такой теории называют «объединением физики».

На склоне лет Эйнштейн потратил много времени на безуспешные поиски единой теории, но тогда ее время еще не пришло: слишком мало было известно о ядерных силах. Более того, Эйнштейн отказывался верить в реальность квантовой механики, хотя сыграл важную роль в ее развитии. Между тем принцип неопределенности, по-видимому, является фундаментальным свойством Вселенной, в которой мы живем. Поэтому любая успешная единая теория непременно должна включать в себя этот принцип.

Принцип неопределенности, по-видимому, является фундаментальным свойством Вселенной, в которой мы живем. Поэтому любая успешная единая теория непременно должна включать в себя этот принцип.

В настоящее время перспективы создания такой теории выглядят намного реалистичнее, поскольку мы гораздо больше знаем о Вселенной. Но следует остерегаться излишней самонадеянности. Прежде мы уже питали ложные надежды. Например, в начале XX века считалось, что все можно объяснить в терминах свойств непрерывной материи, таких как упругость и теплопроводность. Открытие строения атома и принципа неопределенности положили конец этой точке зрения. В 1928 г. Макс Борн сказал группе посетителей Гёттингенского университета: «Физике в нашем современном понимании через полгода придет конец». Его уверенность основывалась на недавнем открытии Дирака, который вывел уравнение движения электрона. Предполагали, что аналогичное уравнение должно описывать поведение протона — второй из двух известных в то время частиц, и это будет концом теоретической физики. Однако открытие нейтрона и ядерных сил перевернуло устоявшиеся представления.

Говоря об этом, я все же верю, что у нас есть основания для осторожного оптимизма — возможно, наши поиски основных законов природы близки к завершению. На данный момент в нашем распоряжении имеется целый ряд частных теорий. У нас есть общая теория относительности, частная теория гравитации, а также частные теории слабого, сильного и электромагнитного

взаимодействий. Последние три могут быть объединены в так называемую теорию великого объединения. Этого недостаточно, поскольку она не включает в себя гравитацию. Основная трудность поиска теории, объединяющей гравитацию с остальными силами, заключается в том, что общая теория относительности — это классическая теория. То есть она не включает в себя квантовомеханический принцип неопределенности. С другой стороны, остальные частные теории во многом зависят от квантовой механики. Поэтому первым делом необходимо объединить общую теорию относительности с принципом неопределенности. Как было показано, это может привести к некоторым замечательным выводам, например о том, что черные дыры не так уж черны и что Вселенная полностью замкнута и не имеет границы. Проблема заключается в том, что принцип неопределенности означает, что даже пустое пространство заполнено парами виртуальных частиц и античастиц. Эти пары должны обладать бесконечной энергией. Значит, их гравитационное притяжение должно свернуть Вселенную до бесконечно малых размеров.

Я все же верю, что у нас есть основания для осторожного оптимизма — возможно, наши поиски основных законов природы близки к завершению.

Довольно похожие, по-видимому абсурдные, бесконечности встречаются и в других квантовых теориях. Однако в этих теориях бесконечности можно исключить с помощью процесса, называемого перенормировкой. Он включает корректировку масс частиц и сил взаимодей-

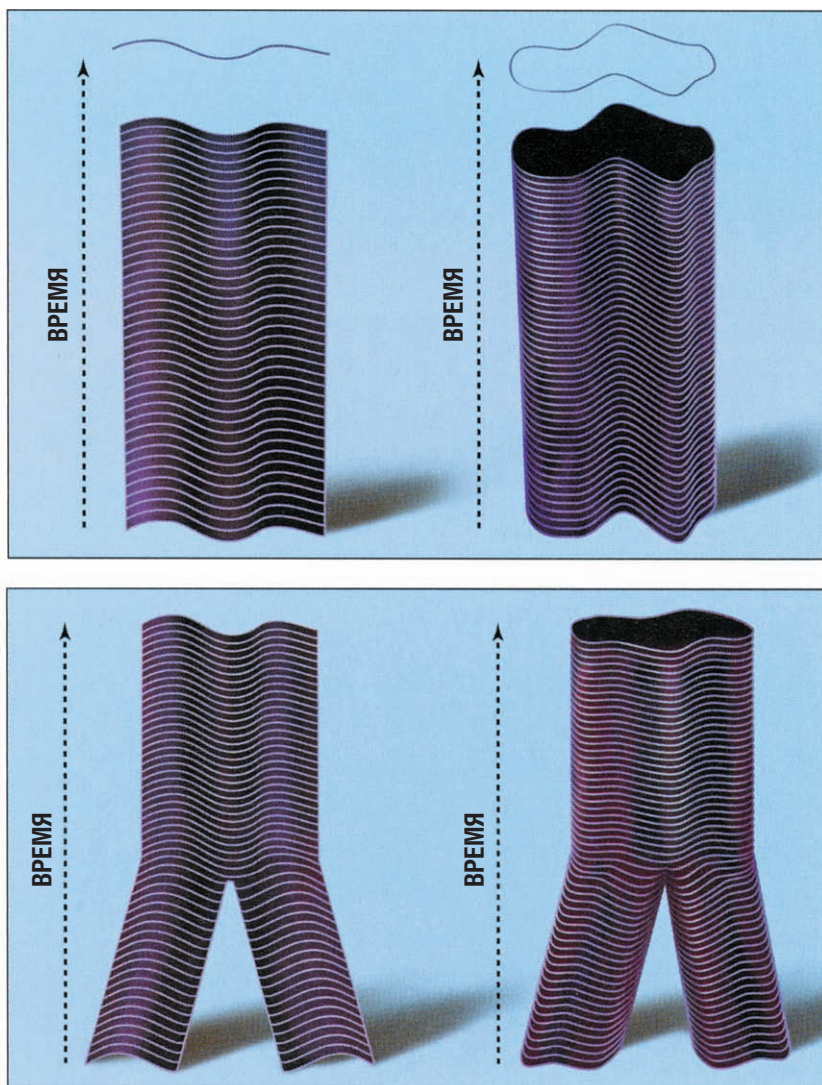
ствий в теории с использованием бесконечных величин. Хотя этот метод сомнителен с точки зрения математики, он, похоже, действительно работает на практике. Предсказания, сделанные с его помощью, согласуются с наблюдениями с чрезвычайно высокой степенью точности. Однако перенормировка имеет серьезный недостаток с точки зрения создания единой теории. При вычитании бесконечности из бесконечности можно получить любой желаемый результат. То есть эта теория не может предсказать фактические значения масс и сил взаимодействий. Их приходится подбирать в соответствии с наблюдениями. В случае общей теории относительности можно корректировать только две величины: силу гравитации и значение космологической постоянной. Но подгонки этих параметров недостаточно для того, чтобы избавиться от всех бесконечных величин. Таким образом, получается теория, предсказывающая, что некоторые величины, например кривизна пространства-времени, в действительности являются бесконечными, и в то же время наблюдения и измерения показывают, что они имеют конечные значения. В попытке справиться с этой проблемой в 1976 г. была предложена теория «супергравитации». По сути это была общая теория относительности с добавлением некоторых дополнительных элементарных частиц.

При вычитании бесконечности из бесконечности можно получить любой желаемый результат.

В общей теории относительности носителем силы гравитации можно считать частицу со спином 2, называемую «гравитон». Идея заключалась в добавлении других

новых частиц со спинами $3/2$, 1 , $1/2$ и 0 . В некотором смысле все эти частицы можно было бы считать разными проявлениями одной и той же «суперчастицы». Виртуальные пары частица-античастица со спинами $1/2$ и $3/2$ должны иметь отрицательную энергию. Это позволило бы уравновесить положительную энергию виртуальных пар частиц со спинами 0 , 1 и 2 . Таким способом удалось бы исключить многие из возможных бесконечностей, но оставались подозрения, что некоторые бесконечности все же останутся. Впрочем, расчеты, способные прояснить, остались ли нескомпенсированные бесконечности, столь громоздки и сложны, что никто не был готов ими заниматься. Было подсчитано, что даже при использовании компьютера это займет не менее четырех лет. Высока вероятность того, что в расчетах будет допущена по меньшей мере одна ошибка, а может и больше. Чтобы убедиться в том, что получен правильный ответ, кто-то другой должен был повторить вычисления и получить тот же результат, а это казалось маловероятным.

Из-за этой проблемы мнение ученых склонилось в пользу теорий струн. Основными объектами в этих теориях являются не элементарные частицы, занимающие одну точку в пространстве, а объекты, обладающие длиной и не имеющие других измерений, такие как бесконечно тонкие струны. В каждый момент времени частица занимает одну точку пространства. Таким образом, ее история может быть представлена в виде линии в пространстве-времени, которую называют «мировой линией». Струна же в каждый момент времени занимает в пространстве линию. Так что ее история в пространстве-времени представляет собой двумерную поверхность, называемую «мировым листом». Любая точка на таком мировом листе может быть описана двумя вели-



(Вверху) Мировой лист струны представляет собой цилиндр или трубку.

(Внизу) Две струны могут соединиться в одну.

чинами, одна из которых указывает время, а другая — положение точки на струне. Мировой лист струны представляет собой цилиндр или трубку. Срез трубки — это окружность, отражающая положение струны в определенный момент времени.

В каждый момент времени частица занимает одну точку пространства. Струна же в каждый момент времени занимает в пространстве линию.

Две струны могут соединиться в одну. Это напоминает соединение двух штанин брюк. Аналогичным образом одна струна может разделиться на две. В теориях струн то, что раньше считали частицами, теперь представляется в виде волн, распространяющихся по струне, как по бельевой веревке. Испускание или поглощение одной частицы другой соответствует разделению или соединению струн. Например, сила гравитационного воздействия Солнца на Землю соответствует трубке или трубопроводу в форме буквы «Н». Теория струн в некотором смысле чем-то напоминает водопроводное дело. Волны, распространяющиеся по двум вертикальным сторонам «Н», соответствуют частицам, относящимся к Солнцу и Земле, а волны, распространяющиеся по горизонтальной перекладине, соответствуют гравитационному взаимодействию между ними.

Теория струн имеет довольно любопытную историю. Изначально она появилась в конце 1960-х гг. как попытка создать теорию, описывающую сильное взаимодействие. Идея заключалась в том, что такие элементарные частицы, как протон и нейтрон, можно рассматривать как вол-

ны, распространяющиеся по струне. Тогда сильные взаимодействия между этими частицами будут соответствовать отрезкам струны, расположенным между другими участками струны, как в паутине. Чтобы эта теория давала наблюдаемую величину сильного ядерного взаимодействия между частицами, струны должны напоминать резиновые жгуты с натяжением около десяти тонн.

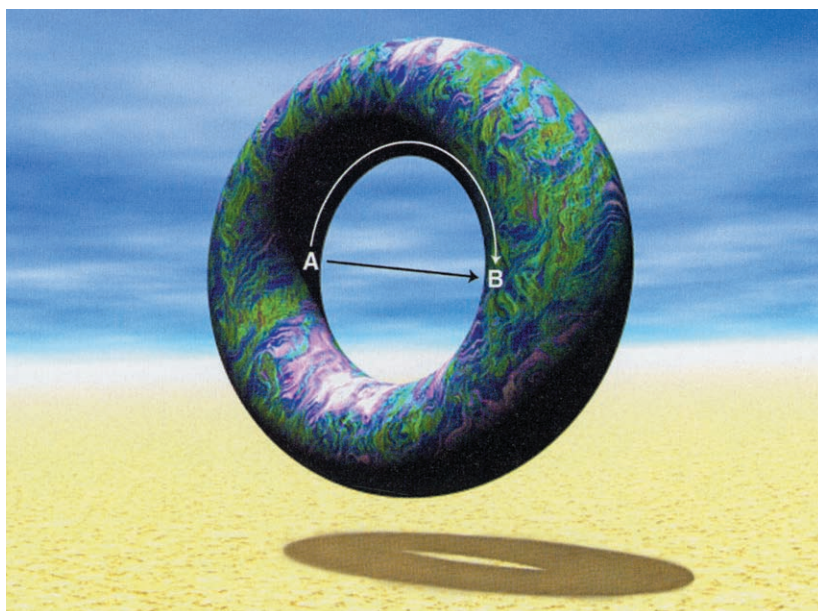
В 1974 г. Джоэль Шерк и Джон Шварц опубликовали статью, в которой показали, что теория струн может описывать гравитационное взаимодействие, но только если натяжение струн будет гораздо больше — около 10^{39} тонн. Предсказания теории струн будут такими же, что и предсказания общей теории относительности, на обычных масштабах расстояний, но будут отличаться на очень малых расстояниях — меньше 10^{-33} см. Однако их работа не привлекла особого внимания, поскольку в то время большинство ученых отказались от использования теории струн для описания сильного взаимодействия. Шерк умер при трагических обстоятельствах. Он страдал от диабета и впал в кому, когда рядом не оказалось никого, кто мог бы сделать ему укол инсулина. Так что Шварц остался почти единственным сторонником теории струн, в которой теперь предполагалось гораздо более высокое натяжение.

В 1984 г. интерес к струнам внезапно возродился по двум причинам. Во-первых, не удавалось достичь большого прогресса в том, чтобы показать, что теория супергравитации не содержит бесконечностей и способна объяснить наблюдаемые виды элементарных частиц. Во-вторых, вышла статья Джона Шварца и Майка Грина, в которой они показали, что теория струн способна объяснить существование элементарных частиц, обладающих врожденной «леворукостью», как некоторые из наблюдаемых нами

частиц. Как бы то ни было, вскоре многие ученые начали работать над развитием теории струн. Была создана новая версия, получившая название «теория гетеротических струн». Казалось, что она могла объяснить существование наблюдаемых нами типов элементарных частиц.

Теории струн являются непротиворечивыми, только если пространство-время имеет десять или двадцать шесть измерений вместо обычных четырех.

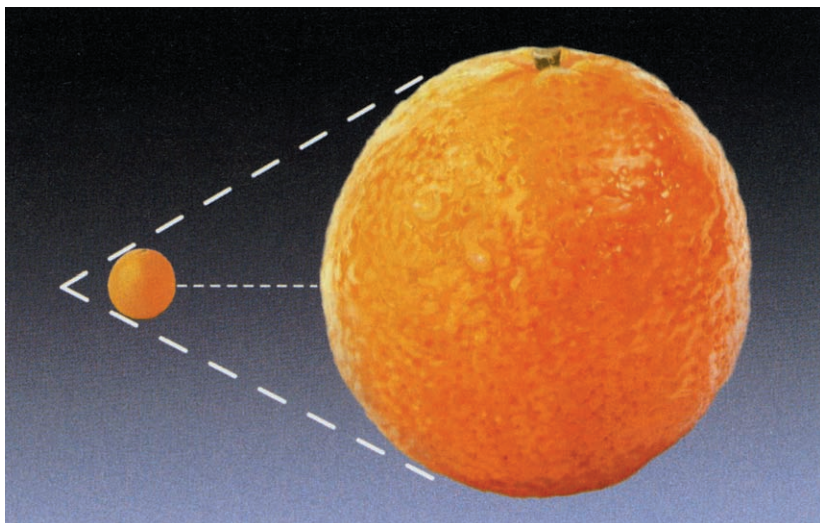
Теории струн также ведут к бесконечностям, но считается, что все они взаимно сократятся в таких версиях, как теория гетеротических струн. Однако в теориях струн есть более серьезная проблема. Они являются непротиворечивыми, только если пространство-время имеет десять или двадцать шесть измерений вместо обычных четырех. Разумеется, дополнительные измерения пространства-времени часто описываются в научной фантастике. Более того, без них дело не обходится почти никогда. Иначе тот факт, что в соответствии с теорией относительности никто не может путешествовать быстрее света, означает, что потребуется слишком много времени для того, чтобы пересечь нашу Галактику, не говоря уж о полетах к другим галактикам. В научной фантастике прижилась идея о возможности добраться к цели коротким путем через другое измерение. Это можно проиллюстрировать следующим образом. Представьте, что пространство, в котором мы живем, имеет только два измерения и изогнуто, как поверхность пончика или тора. Если вы находитесь на одной стороне кольца и хотите оказаться на другой сто-



Представьте себе, что пространство, в котором мы живем, имеет только два измерения и искривлено наподобие поверхности пончика или тора. Если бы вы могли путешествовать через третье измерение, то чтобы оказаться на другой стороне пончика, вы бы могли воспользоваться коротким путем, а не двигаться по кругу.

роне, вам придется двигаться по кругу. Но если бы вы могли путешествовать через третье измерение, вы бы могли воспользоваться коротким путем.

Почему мы не замечаем всех этих дополнительных измерений, если они действительно существуют? Почему мы видим только три пространственных измерения и одно измерение времени? Предполагается, что другие измерения свернуты в пространство ничтожно малых размеров — порядка одной миллионной миллионной миллионной миллионной доли сантиме-



Мы не видим дополнительные пространственные измерения, поскольку они столь малы, что мы их не замечаем. Когда мы смотрим на апельсин с некоторого расстояния, мы также не видим бугорки и складки на его кожуре.

тра. Оно настолько мало, что мы просто его не замечаем. Мы видим только те три пространственных и одно временное измерения, в которых пространство-время является абсолютно плоским. Это похоже на поверхность апельсина: если рассмотреть ее вблизи, то видно, что она вся состоит из неровностей и складок, а если отойти на достаточно большое расстояние, бугорки станут незаметными и поверхность покажется ровной и гладкой. Так же и пространство-время на очень малых масштабах имеет 10 измерений и сильно искривлено, а с увеличением масштаба его кривизна и дополнительные измерения становятся незаметными.

Если эта картина верна, то потенциальным космическим путешественникам не повезло. Дополнительные

измерения слишком малы для того, чтобы вместить космический корабль. Однако возникает еще одна важная проблема. Почему только некоторые, а не все измерения свернуты в крошечный шарик? Предположительно, на самом раннем этапе развития Вселенной все измерения были сильно искривлены. Почему три пространственных и одно временное измерения распрямились, а другие остались тесно свернутыми?

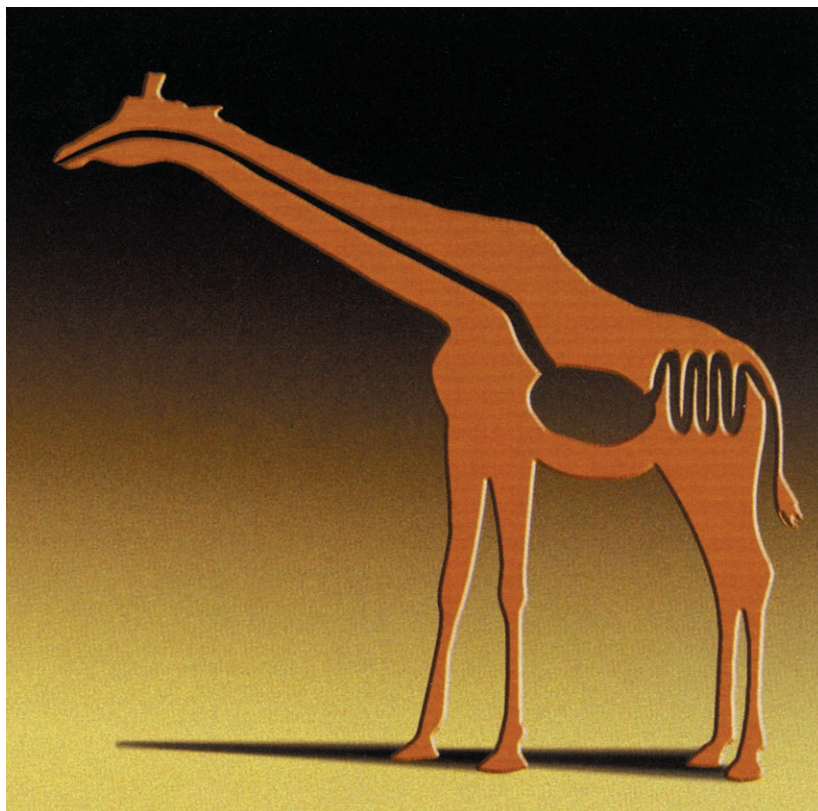
Один из возможных ответов дает антропный принцип. По-видимому, двух пространственных измерений недостаточно для появления таких сложно организованных существ, как мы. Например, двумерным людям, обитающим на одномерной Земле, потребовалось бы перебираться друг через друга, чтобы разойтись при встрече. Если бы двумерное существо съело что-нибудь и не смогло эту пищу полностью переварить, ему пришлось бы извергнуть остатки тем же путем, через который пища была проглочена, поскольку при наличии сквозного прохода через тело существо было бы разделено им на две части и попросту развалилось бы. Не менее трудно представить, как происходила бы циркуляция крови в теле двумерного существа.

Двумерным людям, обитающим на одномерной Земле, потребовалось бы перебираться друг через друга, чтобы разойтись при встрече.

Кроме того, проблемы возникли бы и при наличии более трех пространственных измерений. Сила гравитационного притяжения между двумя телами уменьшалась бы с ростом расстояния быстрее, чем в случае трех

измерений. Это привело бы к тому, что орбиты обращающихся вокруг Солнца планет, таких как Земля, были бы неустойчивы. Малейшее отклонение от круговой орбиты, вызванное, например, гравитационным притяжением других планет, привело бы к тому, что Земля, двигаясь по спирали, стала бы удаляться от Солнца или приближаться к нему. Мы бы или замерзли, или сгорели. На самом деле такая зависимость силы тяготения от расстояния означала бы нестабильность и самого Солнца. Оно бы либо распалось, либо коллапсировало, превратившись в черную дыру. В любом случае оно не смогло бы служить источником тепла и света для жизни на Земле. На более мелких масштабах электрические силы, заставляющие электроны обращаться вокруг ядра атома, действовали бы таким же образом, как и силы тяготения. Таким образом, электроны двигались бы по спирали по направлению либо к ядру атома, либо от него. В любом случае атомов в известном нам виде не существовало бы.

Представляется очевидным, что жизнь, по крайней мере в известной нам форме, может существовать только в тех областях пространства-времени, в которых три пространственных и одно временное измерение не свернуты до мельчайших размеров. Это дает возможность применить антропный принцип, если удастся доказать, что теория струн по меньшей мере допускает существование таких областей Вселенной. И, по-видимому, все теории струн действительно допускают существование таких областей. Кроме того, могут существовать и другие области Вселенной или другие вселенные (что бы это ни значило), в которых все измерения свернуты до мельчайших размеров или более четырех изме-



Антропный принцип указывает на то, что двух пространственных измерений недостаточно для появления столь сложно организованных существ, как люди и жирафы.

рений являются почти плоскими. Но в таких областях не будет разумных существ, способных наблюдать иное число эффективных измерений.

Помимо вопроса о количестве измерений пространства-времени в теории струн существует несколько других проблем, которые необходимо разрешить, чтобы можно было считать ее окончательной единой физиче-

ской теорией. Мы до сих пор не знаем, компенсируют ли друг друга все бесконечности и как связать волны, распространяющиеся по струне, с конкретными типами наблюдаемых элементарных частиц. Тем не менее весьма вероятно, что ответы на эти вопросы будут найдены в течение нескольких ближайших лет и к концу столетия мы узнаем, является ли теория струн той долгожданной единой физической теорией.

Вероятно, к концу столетия мы узнаем, является ли теория струн той долгожданной единой физической теорией.

Может ли на самом деле существовать единая теория всего? Или мы гонимся за призраком? Похоже, есть три возможности:

- Полная единая теория действительно существует, и когда-нибудь мы ее сформулируем, если нам хватит ума.
- Никакой универсальной теории Вселенной не существует, есть лишь бесконечная последовательность теорий, описывающих Вселенную все более и более точно.
- Никакой теории Вселенной не существует. События происходят случайным, произвольным образом и не могут быть предсказаны вне определенных рамок.

Некоторые будут отстаивать третью возможность на том основании, что при наличии полного набора физических законов нарушается право Бога изменить свой замысел и вмешаться в мировой порядок. Это напомина-

ет старый парадокс: способен ли Бог создать такой тяжелый камень, что сам не сможет его поднять? Однако идея о том, что Бог может изменить свой замысел, — пример заблуждения, на которое указывал Блаженный Августин и которое возникает, если считать Бога существом, живущим во времени. Но время — лишь свойство созданной Им Вселенной. Предположительно, Бог знал, что делает, когда создавал ее.

С появлением квантовой механики мы начали понимать, что события не могут быть предсказаны с абсолютной точностью, всегда существует некоторая степень неопределенности. При желании можно приписать эту случайность Божественному вмешательству. Но это было бы очень странное вмешательство. Нет никаких доказательств того, что оно преследует какую-то цель. Иначе это не было бы случайностью. В настоящее время мы исключили третью возможность, пересмотрев цель науки. Мы стремимся сформулировать набор законов, которые позволят предсказывать события в пределах, установленных принципом неопределенности.

Вторая возможность, связанная с построением бесконечной последовательности все более точных теорий, пока согласуется с нашим опытом. Во многих случаях мы повысили чувствительность измерений или выполнили наблюдения нового типа только для того, чтобы открыть новые явления, которые не были предсказаны существующей теорией. Для их объяснения потребовалось создать более совершенную теорию. Поэтому не стоит особо удивляться, если окажется, что наши современные теории великого объединения не выдерживают проверки на более крупных и более мощных ускорителях элементарных частиц. Иначе не было бы смысла тратить столько средств на строительство более мощных приборов.

Вторая возможность, связанная с построением бесконечной последовательности все более точных теорий, пока согласуется с нашим опытом.

Однако создается впечатление, что гравитация может положить предел этой последовательности «матрешек». Если бы существовала частица с энергией, превышающей так называемую планковскую энергию (10^{19} ГэВ), ее масса была бы настолько сконцентрирована, что частица отсекла бы себя от остальной Вселенной и образовала крошечную черную дыру. Таким образом, эта последовательность все более совершенных теорий должна иметь некоторый предел при переходе ко все более высоким энергиям. Должна существовать некая окончательная теория Вселенной. Разумеется, планковская энергия очень далека от энергий порядка сотни ГэВ, которых мы можем достичь в настоящее время в лабораторных условиях. Чтобы преодолеть этот разрыв, нужен ускоритель элементарных частиц, превосходящий по своим размерам Солнечную систему. В текущей экономической ситуации вряд ли кто-то будет финансировать строительство такого ускорителя.

Однако такие энергии могли существовать на самых ранних стадиях развития Вселенной. Думаю, есть неплохие шансы, что изучение ранней Вселенной и соблюдение требований математической согласованности приведут нас к созданию полной единой теории к концу этого столетия, если, конечно, мы к тому времени не разрушим свой мир.

Что означало бы создание окончательной теории Вселенной? Это стало бы завершением долгого и славно-

го этапа нашего непростого пути к пониманию устройства Вселенной. Кроме того, это перевернуло бы представления о законах, управляющих Вселенной, в сознании обычных людей. Во времена Ньютона образованный человек мог овладеть всеми знаниями, накопленными человечеством, по крайней мере в общих чертах. Но с тех пор темпы развития науки сделали такое невозможным. Теории постоянно пересматривались с учетом новых наблюдений. Они никогда не излагались достаточно сжато и просто, чтобы сделать их понятными обычным людям. Понять их могли только специалисты, и даже они могли надеяться на освоение лишь малой доли научных теорий.

Во времена Ньютона образованный человек мог овладеть всеми знаниями, накопленными человечеством, по крайней мере в общих чертах. Но с тех пор темпы развития науки сделали такое невозможным.

Более того, прогресс науки был столь стремителен, что знания, полученные в школе или университете, всегда оказывались слегка устаревшими. Лишь единицам удавалось идти в ногу с быстрым развитием науки. Причем они должны были посвятить науке все свое время и специализироваться в узкой области. Остальные люди очень мало знали о достижениях науки и о том волнении, которое они вызывают в умах ученых.

Если верить Эддингтону, семьдесят лет назад всего два человека понимали общую теорию относительности. А сегодня ее понимают десятки тысяч выпускников университетов, и многие миллионы людей по крайней

мере имеют о ней представление. Если единая теория будет создана, то появление сжатого и простого ее изложения станет лишь вопросом времени. Ее можно будет преподавать в школах (по крайней мере, в общем виде). Все мы тогда сможем в какой-то степени понять законы, управляющие Вселенной и ответственные за наше существование.

Однажды Эйнштейн спросил: «Был ли у Бога выбор, когда Он создавал Вселенную?» Если предположение об отсутствии границы справедливо, то у Него вообще не было выбора при задании начальных условий. Он, разумеется, все же мог выбирать законы, которым подчиняется Вселенная. Однако фактически выбор был невелик. Весьма вероятно, что лишь одна или небольшое количество полных единых теорий являются непротиворечивыми и допускают существование разумной жизни.

Обычный научный подход, заключающийся в построении математической модели, не дает ответа на вопрос, почему должна существовать Вселенная, описываемая этой моделью.

Мы можем задаваться вопросом о природе Бога, даже если существует всего одна возможная единая теория, представляющая собой просто набор правил и уравнений. Какая сила вдохнула жизнь в уравнения и сотворила описываемую ими Вселенную? Обычный научный подход, заключающийся в построении математической модели, не дает ответа на вопрос, почему должна существовать Вселенная, описываемая этой моделью. Что заставило Вселенную появиться? Неужели единая теория

настолько неотразима, что обуславливает собственное существование? Или ей нужен Творец, и если так, влияет ли Он на Вселенную каким-либо образом или лишь несет ответственность за ее существование? И кто создал Его самого?

До настоящего времени большинство ученых были слишком заняты развитием новых теорий для описания Вселенной, чтобы задаваться вопросом «почему». С другой стороны, люди, в чьи обязанности входит задаваться этим вопросом (а именно философы), не смогли угнаться за прогрессом научных теорий. В XVIII веке философы считали все накопленные человечеством знания, включая науку, своим полем деятельности. Они обсуждали такие вопросы, как «имела ли Вселенная начало». Однако в XIX и XX веках наука приобрела слишком технический и математический характер, непонятный для философов и других людей, за исключением небольшого числа специалистов. Философы настолько ограничили область изучаемых ими вопросов, что Людвиг Витгенштейн (самый известный философ XX века) сказал, что «единственной задачей, которая осталась философии, является анализ языка». Какой это упадок по сравнению с великой философской традицией, продолжавшейся от Аристотеля до Канта!

Однако если мы действительно построим полную теорию, со временем ее общие принципы станут понятны всем, а не только нескольким ученым. Тогда все мы сможем принять участие в обсуждении вопроса о том, почему существует Вселенная. Если мы найдем ответ, это будет величайшей победой человеческого разума, поскольку тогда мы, возможно, постигнем замысел Бога.

Источники иллюстраций

Рисунки

Стр. 18, 46, 109, 117, 122, 130, 147, 151, 152, 155 (идея и воплощение) — Роб Фиоре (Rob Fiore).

ФОТОГРАФИИ

- Стр. 9. Древние космологические модели — SHEILA TERRY/SCIENCE PHOTO LIBRARY.
- Стр. 14. Скопление Квинтоль (1999) — NASA, Don Figer, STScI.
- Стр. 22. Фейерверки звездообразования озаряют галактику — NASA, The Hubble Heritage Team.
- Стр. 24. Слабая голубая галактика (1995) — Rogier Windhorst и Simon Driver (Arizona State University), Bill Keel (University of Alabama), NASA.
- Стр. 27. Ракета — NASA.
- Стр. 30. Млечный Путь (2001) — NASA/Umass/D. Wang et al.
- Стр. 48. Кольцо Эйнштейна — JON LOMBERG/SCIENCE PHOTO LIBRARY.
- Стр. 49. Образование молодых звезд — NASA.
- Стр. 50. Жизненный цикл звезд/сверхновая (1999) — NASA, Wolfgang Brandner (JPL-IPAC), Eva K. Grebel (University of Washington).
- Стр. 51. Умирающая звезда (2002) — NASA и The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).
- Стр. 55. Белые карлики (2001) — NASA и H. Richer (University of British Columbia), снимок с наземного телескопа: NOAO/AURA/NSF.
- Стр. 56. Гравитация и звезды (1999) — NASA, The Hubble Heritage Team, STScI, AURA.
- Стр. 60. Способы вырастить черную дыру — K. Cordes & S. Brown (STScI).
- Стр. 66. Масса черной дыры (2000) — NASA и Karl Gebhardt (Lick Observatory).
- Стр. 80. Горизонт событий (2001) — Greg Bacon (STScI/AVL).
- Стр. 89. Излучение черной дыры (1990) — Dana Berry (STScI).
- Стр. 94. Астронавт II (1994) — NASA.
- Стр. 101. Спиральная галактика — NASA, The Hubble Heritage Team, STScI, AURA.
- Стр. 119. Поверхность Земли (2002) — NASA.
- Стр. 125. Заключительный аккорд звездного фейерверка (2002) — NASA и K. Lanzetta (SUNY), художественное оформление: A. Schuller для STScI.

Содержание

Введение	3
<i>Лекция первая.</i> Представления о Вселенной	5
<i>Лекция вторая.</i> Расширяющаяся Вселенная	18
<i>Лекция третья.</i> Черные дыры	42
<i>Лекция четвертая.</i> Черные дыры не так уж черны	72
<i>Лекция пятая.</i> Происхождение и судьба Вселенной	93
<i>Лекция шестая.</i> Направление времени	124
<i>Лекция седьмая.</i> Теория всего	138
Источники иллюстраций	158

*Научно-популярное издание
Серия «Мир Стивена Хокинга»*

12+

Стивен Хокинг ТЕОРИЯ ВСЕГО

Перевод с английского: *Елена Шимановская*,
к. ф.-м. н., научный сотрудник отдела
Внегалактической астрономии ГАИШ МГУ

Фото автора на обложке: Филип Майнотт (Philip Mynott)

Заведующая редакцией *Юлия Данник*
Ответственный редактор *Ольга Лазуткина*
Оформление обложки *Дмитрий Агаонов*
Компьютерная верстка *Юлия Анищенко*
Технический редактор *Татьяна Тимошина*
Корректор *Маргарита Полосина*

Общероссийский классификатор продукции
ОК-005-93, том 2; 953000 — книги и брошюры

Подписано в печать 05.10.2017
Формат 60х90/16. Усл. печ. л. 10.
Тираж 5000 экз. Заказ № .

ООО «Издательство АСТ»
129085, РФ, г. Москва, Звездный бульвар, дом 21, стр. 1, комната 39

Адрес нашего сайта: www.ast.ru
E-mail: ogiz@ast.ru

“Баспа Аста” деген ООО
129085 г. Мәскеу, жұлдызды гүлзар, д. 21, 1 құрылым, 39 бөлме
Біздің электрондық мекенжайымыз: www.ast.ru
E-mail: astpub@aha.ru

Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша арыз-талаптарды
кабылдаушының өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3«а»,
литер Б, офис 1.

Тел.: 8(727) 2 51 59 89, 90, 91, 92, факс: 8 (727) 251 58 12 вн. 107;

E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz

Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.

Өндірген мемлекет: Ресей

Сертификация қарастырылмаған



«Теория всего» — это история Вселенной, рассказанная Стивеном Хокингом в привычной — прозрачной и остроумной — манере и дополненная фантастическими снимками космического телескопа «Хаббл», от которых перехватывает дух. Иллюстрации и схемы, созданные специально для этой книги, помогут понять те самые теории и концепции, с которыми каждый день сражаются передовые ученые по всему миру.

Книга объединяет семь лекций, охватывающих широкий диапазон тем: от Большого взрыва и черных дыр до теории струн. Автор описывает представления о Вселенной — от постулата о том, что Земля имеет форму шара, до теории о расширении Вселенной, основанной на недавних наблюдениях.

Однако с особым азартом Стивен Хокинг рассуждает о непрекращающихся поисках теории всего, появление которой, по мнению автора, ознаменует триумф человеческого разума. Это книга для всех, кто когда-либо вглядывался в ночное небо и задавался вопросом о том, что скрывается в его чернильной синеве.

