

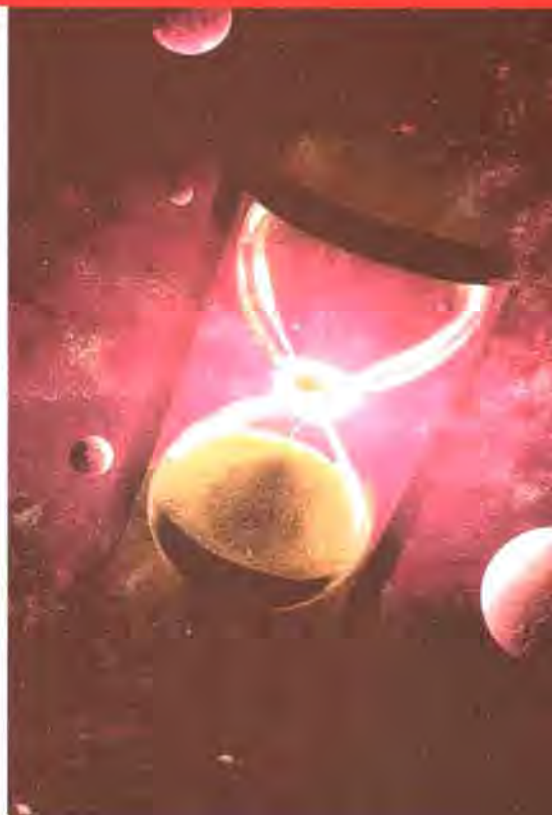
Ф. Адамс Г. Лафлин

# Пять возрастов Вселенной:

*В глубинах*

*физики вечности*

**R&C**  
*Dynamics*



# THE FIVE AGES OF THE UNIVERSE

---

INSIDE THE PHYSICS OF ETERNITY

FRED ADAMS AND  
GREG LAUGHLIN

A Touchstone Book  
Published by Simon & Schuster  
*New York London Toronto Sydney Singapore*

ФРЕД АДАМС, ГРЕГ ЛАФЛИН

# ПЯТЬ ВОЗРАСТОВ ВСЕЛЕННОЙ

---

***В глубинах физики вечности***

Перевод с английского Н. А. Зубченко



Москва ♦ Ижевск

2006

Интернет-магазин

**MANIFESTS**

<http://shop.rcd.ru>

- физика
- математика
- биология
- нефтегазовые технологии

**Адамс Ф., Лафлин Г.**

«Пять возрастов Вселенной в глубинах физики вечности» — Ижевск НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006 — 280 с

В конце двадцатого века Фред Адамс и Грег Лафлин завладели вниманием всего мира, выделив пять временных эпох. Этих авторов считают создателями долгосрочного проекта эволюции Вселенной. Масштабы их творения, охватившего полную историю космоса от его рождения до гибели, и глубина рассмотренных научных вопросов внушают благоговейный трепет. Однако «Пять возрастов Вселенной» — не просто справочник, описывающий физические процессы, которые руководили нашим прошлым и будут формировать наше будущее, это истинная эпопея. С ее помощью можно совершить фантастическое путешествие в физику вечности, не покидая Земли. Это единственная биография Вселенной, которая вам когда-либо понадобится.

Книга предназначена для широкого круга читателей.

**ISBN 0-684-86576-9 (англ.)**

**ISBN 5-93972-500-7**

Copyright © 1999 by Fred C. Adams and Gregory Laughlin  
First published in the United States by The Free Press,  
a Division of Simon & Schuster, Inc.

Copyright © 1999, Ф. Адамс и Г. Лафлин,  
впервые опубликовано в США издательством «The Free Press»,  
подразделение Simon & Schuster, Inc.

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005

<http://rcd.ru>



# Оглавление

<b>Предисловие</b> . . . . .	7
<b>Введение</b> . . . . .	11
<b>ГЛАВА 1. Первичная эпоха</b> $-50 < \eta < 5$ . . . . .	33
<b>ГЛАВА 2. Эпоха звезд</b> $6 < \eta < 14$ . . . . .	62
<b>ГЛАВА 3. Эпоха распада</b> $15 < \eta < 39$ . . . . .	105
<b>ГЛАВА 4. Эпоха черных дыр</b> $40 < \eta < 100$ . . . . .	139
<b>ГЛАВА 5. Эпоха вечной тьмы</b> $\eta > 101$ . . . . .	184
<b>Заключение</b> . . . . .	212
<b>Словарь специальных терминов</b> . . . . .	235
<b>Примечания</b> . . . . .	247
<b>Ссылки и дополнительная литература</b> . . . . .	256
<b>Ключевые события в биографии Вселенной</b> . . . . .	266
<b>Предметный указатель</b> . . . . .	268

# Предисловие

Долгосрочная судьба Вселенной, в которой мы живем, всегда волновала наше воображение. Будучи астрофизиками, мы привыкли размышлять о возникновении и судьбе различных астрономических объектов: звезд, галактик, да и Вселенной в целом. На протяжении двадцатого века, и особенно за два последних десятилетия, физика, астрономия и космология сделали огромный скачок вперед, так что теперь мы понимаем нашу Вселенную так хорошо, как никогда ранее.

Космология занимается, главным образом, предысторией Вселенной, и это справедливо. Теория Большого взрыва вкупе с ее вариациями образует весьма успешную парадигму для описания зарождения Вселенной, а последние результаты астрономических наблюдений подводят под нее прочную научную основу. Законченность нашему детальному пониманию современной Вселенной придали параллельные достижения ученых в области звездной эволюции, образовании звезд и галактик. А в последние годы «реестр» нашей Вселенной расширился благодаря открытию черных дыр, коричневых карликов и планет, вращающихся по орбитам других звезд.

И вот, располагая всей этой информацией, в конце 1995 года мы начали подробное научное исследование будущего Вселенной, включая звезды, галактики и прочие астрофизические объекты, живущие в ней. К этому исследованию нас подтолкнуло несколько событий, произошедших практически одновременно. Мы почувствовали, что пора вновь вернуться к этому вопросу. Несмотря на последние успехи в отношении истории Вселенной, ее будущему всегда уделялось достаточно мало внимания. Крупные статьи Мартина Риса, Джамала Ислама и Фримена Дайсона были опубликованы еще в шестидесятых–семидесятых годах двадцатого века, а в начале восьмидесятых годов увидели свет несколько работ, в которых описывались последствия распада протона. Однако значительные успехи, которых в последнее время добились физика и астрономия, открыли более обширную перспективу, позволяющую обстоятельно взглянуть в будущее. В прежних исследованиях авторы поднимали вопросы, главным образом, крупномасштабной космологии, уделяя мало внимания

звездам и звездным объектам. До сих пор не просчитана долгосрочная эволюция звезд с самой низкой массой, которые живут гораздо дольше современного возраста нашей Вселенной. Воплощению этого проекта в жизнь весьма поспособствовал приезд в Мичиганский университет Лафлина, который решил поработать с Адамсом. С этого момента мы начали всматриваться в темноту вместе. Дополнительным стимулом послужил организованный Мичиганским университетом «тематический семестр» по вопросу «Смерть, вымирание и будущее человечества». По этому случаю Адамс написал новый курс о долгосрочном будущем Вселенной. Относительная скудность справочного материала стала еще одним стимулом к изучению отдаленного будущего нашей Вселенной.

Результаты нашего исходного исследования были опубликованы в виде обзорной статьи в журнале *Reviews of Modern Physics* в 1997 году с одобрения сэра Мартина Риса, редактора этого журнала и Королевского астронома Англии. По завершении научной рукописи живой интерес к данному вопросу выказали средства массовой информации, а спрос на публичные лекции оказался удивительно высоким. Такой неожиданный интерес общественности заставил нас подумать о популярном изложении данной темы, результатом которого и стала эта книга.

Наша книга отличается от многих ей подобных тем, что она знакомит читателя с достаточно большим количеством нового научного материала. В процессе написания этой рукописи мы часто сталкивались с ранее неизученными научными проблемами. Например, что будет, если маленький красный карлик войдет в нашу Солнечную систему и нарушит орбиты планет? Может ли такая звезда захватить Землю? Какова вероятность того, что это произойдет прежде, чем умрет наше Солнце? Чтобы ответить на эти и другие вопросы такого рода, мы просто по мере необходимости выполняли требующиеся вычисления. Поэтому наша книга содержит результаты новых, ранее неопубликованных, вычислений и прочие научные соображения. Таким образом, на сегодняшний день это самая полная и подробная трактовка будущего.

Тем не менее данная книга предназначена для широкого круга читателей, и для понимания этой биографии нашей Вселенной не требуется предварительного знания физики или астрономии. Однако в ходе изложения нам нередко приходится оперировать очень большими числами. Чаще всего мы приводим две разновидности представления больших чисел, называя их миллиардами и триллионами и одновременно давая их экспоненциальную форму. Например, миллиард можно записать как  $10^9$ : единица с девятью нулями; триллион — как  $10^{12}$ : единица с двенадцатью нулями и т. д. Мы также вводим удобную новую единицу измерения

времени, называемую «космологической декадой». Когда некоторый временной промежуток, в годах, приводится в экспоненциальном представлении, скажем  $10^n$  лет, то показатель  $n$  является космологической декадой. Например, сейчас Вселенной десять миллиардов, или  $10^{10}$ , лет; это означает, что сейчас мы живем в десятую космологическую декаду. Когда Вселенная станет старше в десять раз, когда ей исполнится  $10^{11}$  лет, настанет одиннадцатая космологическая декада. В этой книге описаны события астрономической важности, охватывающие временные промежутки, достигающие ста пятидесяти космологических декад, или  $10^{150}$  лет.

Любое описание будущей Вселенной непременно содержит спекулятивные элементы. В рамках данной книги мы отталкиваемся от современного понимания законов физики и астрофизики и производим экстраполяцию вперед, пытаясь представить Вселенную будущего. Однако по мере продвижения во мрак, которым покрыто наше будущее, наша экстраполяция утрачивает фокус. На этом пути мы обязаны учесть такие эффекты физических и астрономических процессов, которые еще только изучаются. В частности, большая часть этой книги описывает будущую космологию вечно расширяющейся Вселенной: о том, что Вселенная расширяется, свидетельствуют современные результаты астрономических наблюдений. И все же для полноты изложения мы включили краткое обсуждение Вселенной, переживающей повторное сжатие. Кроме того, мы открыто допускаем, что, рано или поздно, произойдут и распад протона, и испарение черных дыр, открытое Хокингом. Несмотря на то, что оба этих долгосрочных процесса в общих чертах предсказаны физиками-теоретиками, они пока не получили экспериментального подтверждения.

Практически все, что мы обсуждаем в этой книге, основано на одном дополнительном догмате нашей веры. Мы полагаем, что законы физики останутся такими же и не изменятся с течением времени, по крайней мере до завершения временной шкалы нашей летописи. И хотя мы не располагаем абсолютной гарантией справедливости этого допущения, мы не видим и веской причины сомневаться в нем. Многочисленные свидетельства говорят о том, что до сих пор в истории Вселенной физические законы носили замечательно постоянный характер, и на сегодняшний день нет никаких указаний на то, что данная тенденция изменится. К примеру, исследования молодой Вселенной в контексте теории Большого взрыва убедительно доказывают, что законы физики, описывающие природу, достаточно хорошо поняты и оставались неизменными с очень давних времен до настоящего момента. Принимая неизменность

физических законов и в будущем, мы подразумеваем сами законы, а не понимание их нами. Более полное понимание физики почти наверняка приведет к изменениям, большим и малым, в представленной здесь картине будущего.

Эта книга рассказывает историю нашей Вселенной от ее сингулярного зарождения в Большом взрыве до разрозненного перехода в отдаленное будущее. Знаками препинания в этом сказании являются звездные взрывы, столкновения и великое множество других астрофизических катастроф. На первый взгляд, бесконечное разрушение Вселенной может показаться унылой или гнетущей перспективой. Однако мы считаем, что постоянно меняющиеся характеристики Вселенной дают нам гораздо большую перспективу — более обширный взгляд на космос и наше место в нем. Мы надеемся, что наши читатели обретут лучшее понимание истории нашей Вселенной: что она содержит, как работает и что с ней может произойти в будущем. Оттолкнувшись от такой расширенной системы отсчета, можно обрести гораздо более полное понимание наших «повседневных» взаимодействий с уютной Вселенной нынешней эпохи.

При написании этой книги нам очень помогли многие люди. Наш литературный агент, Лиза Адамс, поспособствовала началу этого проекта. Наш издатель, Стивен Морроу из «Free Press», помог этой книге уверенно преодолеть все препятствия, которые возникают перед публикацией. В процессе создания книги многие заинтересованные друзья и коллеги оказывали нам бесценную помощь и делали критические замечания. Среди них — Питер Боденхеймер, Нозл Брюер, Мирон Кемпбелл, Гус Эвард, Алекс Филиппенко, Маргарет Гиббонс, Горди Кейн, Марк Лафлин, Рон Маллетт, Манасс Мбони, Салли Побойевски, Йори Принс, Рой Рапппорт, Мартин Рис, Михал Роциска, Натан Швадрон, Дж. Аллин Смит, Дэвид Спергел и Лиза Стилвел. Наконец, мы хотели бы поблагодарить Лорела Тейлора за подготовку изящного и информативного комплекта диаграмм.

Фред Адамс и Грег Лафлин  
октябрь 1998 г., Анн-Арбор,  
Мичиган

# Введение

**Путеводитель по большой картине, фундаментальному физическому закону, окнам пространства и времени, великой войне и чрезвычайно большим числам.**

Первое января 7 000 000 000 г. н. э., Анн-Арбор.

Наступивший Новый год — не слишком большой повод для праздника. Нет никого, кто может хотя бы отметить его приход. Поверхность Земли превратилась в неузнаваемую пустошь, дотла выжженную Солнцем. Солнце раздулось безгранично: оно стало настолько огромным, что его раскаленный докрасна диск закрывает дневное небо почти целиком. Меркурий и Венера уже погибли, а теперь разреженные наружные области солнечной атмосферы грозят захватить удаляющуюся орбиту Земли.

Океаны, в которых когда-то зародилась жизнь, испарились давным-давно, превратившись сначала в тяжелое стерилизующее облако водяного пара, а затем полностью растворившись в космическом пространстве. Осталась только бесплодная каменистая поверхность. На ней все еще можно разглядеть слабые следы древних береговых линий, океанских бассейнов и размытые остатки материков. К полудню температура достигает почти трех тысяч градусов по Фаренгейту, и каменистая поверхность начинает плавиться. Экватор уже частично опоясан широким поясом кипящей лавы, которая, остывая, образует тонкую серую корку, пока раздувшееся Солнце еженощно отдыхает за горизонтом.

Та часть поверхности, которая когда-то служила колыбелью для открытых лесом морен юго-восточного Мичигана, весьма и весьма изменилась за минувшие миллиарды лет. Бывший северо-американский материк давным-давно разделил геологический разлом, протянувшийся от прежнего штата Онтарио до Луизианы; он расколол старую устойчивую платформу материка и сформировал новое морское дно. Закаменевшие и оледеневшие остатки Анн-Арбора покрылись лавой, спустившейся по руслам старых рек с близлежащих вулканов. Впоследствии, когда группа островов размером с Новую Зеландию столкнулась с береговой линией, в горную цепь вдавились застывшая лава и осадочные породы, скрытые под ней.

Теперь поверхность древней скалы ослаблена нестерпимым жаром Солнца. Каменная глыба раскалывается, вызывая оползень и выставляя на обозрение идеально сохранившийся отпечаток дубового листа. Этот след некогда зеленого мира, теперь столь далекого, медленно исчезает, тая в неумолимом огне. Совсем скоро вся Земля будет объята зловещим красным пламенем.

Такая картина гибели Земли списана не с первых страниц сценария второсортного фантастического фильма; это более или менее реалистичное описание той судьбы, которая ожидает нашу планету, когда Солнце прекратит свое существование в виде обычной звезды и расширится, превратившись в красного гиганта. Катастрофическое плавление поверхности Земли — всего лишь одно из великого множества событий, час которых пробьет, когда состарится Вселенная и ее содержимое.

Сейчас наша Вселенная, возраст которой оценивается в десять—пятнадцать миллиардов лет, все еще переживает пору своей юности. Так что многие астрономические возможности, представляющие больший интерес, еще попросту не успели проявить себя. Однако по мере приближения отдаленного будущего Вселенная будет постепенно меняться, превращаясь в арену, на которой развернется великое многообразие поразительных астрофизических процессов. В этой книге биография Вселенной рассказана от начала до конца. Это история о том, как знакомые нам звезды ночного неба постепенно превращаются в странные замерзшие звезды, испаряющиеся черные дыры и атомы величиной с Галактику. Это научный взгляд на лик вечности.

## **Четыре окна во Вселенную**

Биография нашей Вселенной и изучение астрофизики вообще разворачивается в четырех важных масштабах — на уровне планет, звезд, галактик и Вселенной в целом. Каждый из них предоставляет свой тип окна для наблюдения за свойствами и эволюцией природы. На каждом из этих уровней астрофизические объекты проходят все жизненные циклы, начиная с образования — события, аналогичного рождению, и — нередко заканчивая весьма специфичным финалом, подобным смерти. Смерть может быть быстрой и неистойвой; например, массивная звезда завершает свою эволюцию эффектной вспышкой сверхновой. Другой альтернативой является мучительно медленная гибель, уготованная тусклым красным карликам, которые постепенно угасают, превращаясь в белых карликов — остывающие угольки некогда мощных и активных звезд.

В наиболее крупном масштабе мы можем рассматривать Вселенную как единый развивающийся организм и изучать цикл ее жизни. В этой области действия *космологии* за последние несколько десятилетий произошел значительный научный прогресс. Вселенная расширялась с момента зарождения в сильнейшем взрыве — том самом Большом взрыве. Теория Большого взрыва описывает последующую эволюцию Вселенной за последние десять–пятнадцать миллиардов лет, причем ей удалось потрясающе успешно объяснить природу нашей Вселенной по мере ее расширения и охлаждения.

Ключевым является вопрос о том, будет ли Вселенная расширяться вечно или в какой-то момент будущего расширение прекратится и произойдет повторное сжатие. Текущие результаты астрономических наблюдений убедительно свидетельствуют в пользу того, что нашей Вселенной на роду написано непрерывно расширяться, поэтому большая часть нашего повествования следует именно этому сценарию. Тем не менее мы решили вкратце изложить следствия второго возможного варианта развития событий — ужасной гибели Вселенной в повторном горячем сжатии.

Ниже необъятных просторов космологии, на меньшем уровне, следуют галактики, например наш Млечный Путь. Галактики представляют собой большие и довольно разреженные скопления звезд, газа и других разновидностей вещества. Галактики не разбросаны по Вселенной произвольно; они, скорее, влетены в общий гобелен космоса гравитацией. Некоторые группы галактик настолько тяжелы, что остаются вместе под действием гравитационных сил, и эти скопления галактик можно считать независимыми астрофизическими объектами. Помимо принадлежности к скоплениям, галактики произвольным образом объединяются, образуя еще более крупные структуры, напоминающие нити, листы и стены. Совокупность узоров, образуемых галактиками на этом уровне, называют *крупномасштабной структурой Вселенной*.

В галактиках содержится большая доля обычного вещества Вселенной; эти звездные системы четко отделены друг от друга, даже в пределах скоплений. Это разделение настолько выражено, что когда-то галактики называли «островами Вселенной». Кроме того, галактики играют крайне важную роль маркеров положений пространства-времени. Наша Вселенная непрерывно расширяется, и галактики, подобно маякам в пустыне, позволяют нам наблюдать это расширение.

Крайне сложно постичь безбрежную пустоту нашей Вселенной. Типичная галактика заполняет лишь около одной миллионной всего объема космического пространства, в котором она содержится, да и сами



галактики крайне разрежены. Если бы вы собрались отправиться на космическом корабле в некоторую случайную точку Вселенной, вероятность приземления вашего корабля в пределах какой-нибудь галактики в настоящее время составляет примерно одну миллионную. Это уже не слишком много, а в будущем эта величина станет еще меньше, потому что Вселенная расширяется, а галактики — нет. Отлученные от общего расширения Вселенной, галактики существуют в относительной изоляции. В них обитает большинство звезд Вселенной, а следовательно, и большинство планет. В результате множество интересных физических процессов, имеющих место во Вселенной, — от звездной эволюции до развития жизни — происходят именно в галактиках.

Не слишком густо населяя пространство, сами галактики тоже большей частью пусты. И хотя они содержат миллиарды звезд, лишь очень малая часть их объема действительно заполнена звездами. Если бы вы собрались отправиться на космическом корабле в некоторую случайную точку нашей Галактики, вероятность приземления вашего корабля на какой-нибудь звезде чрезвычайно мала, порядка одной миллиард триллионной (один шанс из  $10^{22}$ ). Такая пустота галактик достаточно красноречиво свидетельствует о том, как они развивались и что их ожидает в будущем. Прямые столкновения звезд в галактике происходят крайне редко. Следовательно, пройдет очень много времени — гораздо больше, чем прошло от рождения нашей Вселенной до настоящего момента, — прежде чем столкновения звезд и встречи других астрофизических объектов хоть как-то повлияют на структуру галактики. Как вы увидите, эти столкновения начинают играть все более и более важную роль по мере старения Вселенной.

Однако межзвездное пространство не является абсолютно пустым. Наш Млечный Путь пропитан газом различной плотности и температуры. Средняя плотность — одна частица (один протон) на кубический сантиметр; температура же варьируется от десятиградусной прохлады до кипения в миллион градусов по шкале Кельвина. При низких температурах около одного процента вещества пребывает в твердом состоянии — в виде крошечных каменных пылинок. Эти газ и пыль, заполняющие межзвездное пространство, называют *межзвездной средой*.

Следующий, еще меньший по размеру, уровень важности образуют сами звезды. В настоящее время краугольным камнем астрофизики являются обычные звезды — объекты типа нашего Солнца, существующие за счет реакций ядерного синтеза, которые происходят в их недрах. Звезды составляют галактики и генерируют большую часть видимого света во Вселенной. Более того, именно звезды сформировали современ-

ный «реестр» нашей Вселенной. Массивные звезды «выковали» почти все тяжелые элементы, оживляющие космос, включая необходимые для жизни углерод и кислород. Именно звезды породили большую часть элементов, составляющих обычное вещество, с которым мы сталкиваемся каждый день: книги, автомобили, бакалейные товары.

Но эти ядерные электростанции не вечны. Реакции ядерного синтеза, благодаря которым в недрах звезд вырабатывается энергия, в конце концов, прекратятся; и произойдет это, как только истощится запас ядерного топлива. Звезды, гораздо более тяжелые, чем наше Солнце, сгорают за относительно короткий промежуток времени в несколько миллионов лет: их жизнь в тысячу раз короче настоящего возраста нашей Вселенной. На противоположном конце диапазона расположились звезды, массы которых гораздо меньше массы нашего Солнца. Такие звезды могут жить триллионы лет — примерно в тысячу раз больше современного возраста нашей Вселенной.

По завершении той части жизни звезды, когда она существует за счет термоядерных реакций, звезда не исчезает бесследно. После себя звезды оставляют экзотические сгустки, называемые *звездными остатками*. Эту касту вырожденных объектов образуют коричневые карлики, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Как мы увидим, по мере старения Вселенной и исчезновения со сцены обычных звезд эти странные остатки будут играть все более важную, а в конечном итоге, и доминантную роль.

Четвертый, наименьший по размерам, но не по важности, уровень нашего интереса образуют планеты. Существует, по меньшей мере, две их разновидности: относительно маленькие каменные тела вроде нашей Земли и большие газовые гиганты типа Юпитера и Сатурна. За последние несколько лет в нашем понимании планет произошел необычайный переворот. Впервые в истории на орбитах других звезд были совершенно определенно обнаружены планеты. Теперь нам точно известно, что планеты не являются результатом какого-то редкого или особого события, произошедшего в нашей Солнечной системе, а распространены в галактике достаточно повсеместно. Планеты не играют главной роли в эволюции и динамике Вселенной в целом. Они важны потому, что являются наиболее вероятной средой для возникновения и развития жизни. Таким образом, долгосрочная судьба планет определяет долгосрочную судьбу жизни — по крайней мере, тех ее форм, которые нам знакомы.

Кроме планет, солнечные системы содержат много гораздо более мелких объектов: астероиды, кометы и огромное разнообразие лун. Как

и планеты, эти тела не играют значительной роли в течении эволюции Вселенной в целом, но оказывают огромное влияние на эволюцию жизни. Луны, вращающиеся по орбитам планет, предоставляют еще одну возможную среду для возникновения и развития жизни. Известно, что с планетами регулярно сталкиваются кометы и астероиды. Считается, что эти столкновения, способные вызвать глобальные перемены климата и вымирание целых видов живых существ, сыграли важную роль в формировании истории жизни здесь, на Земле.

## Четыре силы природы

Природу можно описать с помощью четырех фундаментальных сил, которые, в конечном итоге, управляют динамикой всей Вселенной; это гравитация, электромагнитная сила, сильное ядерное взаимодействие и слабое ядерное взаимодействие. Все эти силы играют важную роль в биографии космоса. Они сделали нашу Вселенную такой, какой мы знаем ее сегодня, и будут править в ней впрямь.

Первая из этих сил, гравитационная, наиболее близка к нашей повседневной жизни, причем она самая слабая из четырех. Однако, по причине обширности диапазона ее действия и исключительно притягивающей природы, на достаточно больших расстояниях гравитация доминирует над остальными силами. Благодаря гравитации различные предметы удерживаются на поверхности Земли, а сама Земля остается на орбите, по которой она вращается вокруг Солнца. Гравитация поддерживает существование звезд и управляет процессом образования в них энергии, а также их эволюцией. Наконец, именно гравитация отвечает за образование большинства структур во Вселенной, включая галактики, звезды и планеты.

Вторая сила — электромагнитная; она имеет электрическую и магнитную составляющие. На первый взгляд, они могут показаться различными, однако на фундаментальном уровне это всего лишь два аспекта единой основной силы. Несмотря на то, что внутренне электромагнитная сила намного сильнее гравитационной, на больших расстояниях она оказывает гораздо меньшее действие. Источником электромагнитной силы служат положительные и отрицательные заряды, а во Вселенной, судя по всему, они содержатся в равных количествах. Поскольку силы, созданные зарядами с противоположными знаками, действуют в противоположных направлениях, на больших расстояниях, где содержится много зарядов, электромагнитная сила самоуничтожается. На малых расстояниях, в частности в атомах, электромагнитная сила играет важ-

ную роль. Именно она, в конечном итоге, отвечает за строение атомов и молекул, а следовательно, является движущей силой в химических реакциях. На фундаментальном уровне жизнью правят химия и электромагнитная сила.

Электромагнитная сила в целых  $10^{40}$  раз сильнее гравитационной. Чтобы постичь эту невероятную слабость гравитации, можно, например, вообразить альтернативную вселенную, в которой нет зарядов, а следовательно, и электромагнитных сил. В такой вселенной совершенно обычные атомы обладали бы экстраординарными свойствами. Если бы электрон и протон связывала одна только гравитация, то атом водорода был бы больше, чем вся видимая часть нашей Вселенной.

Сильное ядерное взаимодействие, наша третья фундаментальная сила природы, отвечает за целостность ядер атомов. Эта сила удерживает протоны и нейтроны в ядре. В отсутствие сильного взаимодействия ядра атомов взорвались бы в ответ на силы отталкивания, действующие между положительно заряженными протонами. Несмотря на то, что это взаимодействие сильнейшее из четырех, оно действует на чрезвычайно малых расстояниях. Не случайно диапазон действия сильного ядерного взаимодействия приблизительно равен размеру большого атомного ядра: примерно в десять тысяч раз меньше размера атома (порядка десяти ферми или  $10^{-12}$  см). Сильное взаимодействие управляет процессом ядерного синтеза, благодаря которому образуется большая часть энергии в звездах, а значит, и во Вселенной в текущую эпоху. Именно из-за большой, по сравнению с электромагнитной силой, величины сильного взаимодействия ядерные реакции гораздо сильнее химических, а именно: в миллион раз в перерасчете на пару частиц.

Четвертая сила, слабое ядерное взаимодействие, вероятно, наиболее удалена от общественного сознания. Это довольно таинственное слабое взаимодействие принимает участие в распаде нейтронов на протоны и электроны, а также играет свою роль в процессе ядерного синтеза, фигурирует в явлении радиоактивности и образовании химических элементов в звездах. Слабое взаимодействие имеет еще более короткий диапазон действия, чем сильное. Однако, несмотря на свою слабость и маленький диапазон действия, слабое взаимодействие играет удивительно важную роль в астрофизике. Существенная доля общей массы Вселенной, скорее всего, состоит из слабо взаимодействующих частиц, другими словами, частиц, которые взаимодействуют друг с другом только посредством слабого взаимодействия и гравитации. В силу того что такие частицы имеют тенденцию взаимодействовать очень продолжительное время, важность их роли постепенно возрастает по мере медленного движения Вселенной в будущее.

## Великая война

На протяжении всей жизни нашей Вселенной в ней постоянно возникает один и тот же вопрос — непрерывная борьба между силой гравитации и стремлением физических систем эволюционировать в сторону более дезорганизованных состояний. Количество беспорядка в физической системе измеряется долей ее *энтропии*. В наиболее общем смысле, гравитация стремится к удержанию всех составляющих любой системы в пределах этой самой системы, чем и упорядочивает физические структуры. Производство энтропии трудится в противоположном направлении, т. е. пытается сделать физические системы более дезорганизованными и «размазанными». Во взаимодействии этих двух соперничающих тенденций и состоит главная драма астрофизики.

Непосредственным примером этой непрерывной борьбы является наше Солнце. Оно существует в состоянии хрупкого равновесия между действием гравитации и энтропией. Гравитационная сила поддерживает целостность Солнца и притягивает все его вещество к центру. В отсутствие противодействующих ей сил гравитация быстро сжала бы Солнце, превратив его в черную дыру диаметром не больше нескольких километров. Роковому коллапсу препятствуют силы давления, которые действуют в направлении от центра к поверхности, уравновешивая гравитационные силы и тем самым сохраняя Солнце. Давление, препятствующее коллапсу Солнца, возникает, в конечном счете, благодаря энергии ядерных реакций, которые происходят в его недрах. В ходе этих реакций образуются энергия и энтропия, вызывающая хаотические движения частиц в центре Солнца и, в конечном итоге, сохраняющая структуру всего Солнца.

С другой стороны, если бы гравитационная сила каким-то образом выключилась, то Солнце более ничто бы не сдерживало и оно быстро бы расширилось. Это расширение продолжалось бы до тех пор, пока солнечная материя не расплзлась бы настолько тонким слоем, что плотность ее сравнялась бы с наименее плотными участками межзвездного пространства. Тогда разреженный призрак Солнца в сто миллионов раз превысил бы свой теперешний размер, растянувшись в диаметре на несколько световых лет.

Благодаря соперничеству двух равных по силе конкурентов, гравитации и энтропии, наше Солнце существует в своем теперешнем состоянии. В случае нарушения этого равновесия, возьмет ли гравитация верх над энтропией или наоборот, Солнце превратится либо в маленькую черную дыру, либо в крайне разреженное газовое облако. Это же положение вещей — равновесие, существующее между гравитацией и эн-

тропией, — определяет строение всех звезд в небе. Звездной эволюцией движет яростное соперничество двух противодействующих тенденций.

Эта же борьба лежит в основе образования всевозможных астрономических структур, включая планеты, звезды, галактики и крупномасштабную структуру Вселенной. Существование этих астрофизических систем, в конечном итоге, обусловлено гравитацией, которая стремится связать вещество. И все же в каждом случае тенденции к гравитационному коллапсу противостоят силы расширения. На всех уровнях непрекращающееся состязание гравитации и энтропии служит гарантом того, что любая победа — явление временное и никогда не бывает абсолютной. Например, образование астрофизических структур никогда не бывает стопроцентно эффективным. Успешно завершившиеся случаи образования таких объектов — всего лишь локальная победа гравитации, тогда как неудавшиеся попытки создать что-либо — триумф беспорядка и энтропии.

Эта великая война между гравитацией и энтропией определяет долгосрочную судьбу и эволюцию астрофизических объектов, таких как звезды и галактики. Например, истощив все свои запасы ядерного топлива, звезда должна соответствующим образом изменить свое внутреннее строение. Гравитация стягивает вещество к центру звезды, тогда как тенденция к увеличению энтропии благоприятствует его рассеиванию. Дальнейшая битва может иметь много разных исходов, которые зависят от массы звезды и других ее свойств (например, скорости вращения звезды). Как мы увидим, эта драма будет разыгрываться снова и снова, пока звездные объекты населяют Вселенную.

Очень эффектным примером непрекращающейся борьбы между силой гравитации и энтропией служит эволюция самой Вселенной. С течением времени Вселенная расширяется и становится более размытой. Этому направлению эволюции противостоит гравитация, стремящаяся собрать расползающееся вещество Вселенной воедино. Если победителем в этой битве окажется гравитация, расширение Вселенной, в конце концов, прекратится и в какой-то момент будущего начнется ее повторное сжатие. С другой стороны, проиграв гравитация эту битву, Вселенная будет расширяться вечно. Какая из этих судеб ожидает нашу Вселенную в будущем — зависит от общего количества массы и энергии, содержащегося во Вселенной.

## **Пределы физики**

Законы физики описывают, как Вселенная ведет себя на самых разных расстояниях: от чудовищно больших до ничтожно малых. Высшее

достижение человечества — умение объяснить и предсказать, как ведет себя природа в условиях, крайне далеких от нашего повседневного житейского опыта. Столь значительное расширение нашего кругозора произошло, главным образом, в течение прошлого века. Сфера нашего знания протянулась от крупномасштабных структур Вселенной до субатомных частиц. И хотя такая область понимания может показаться большой, нельзя забывать, что обсуждения физического закона невозможно продолжить сколь угодно далеко ни в одном из этих направлений. Наибольший и наименьший масштабы остаются за пределами досягаемости нашего современного научного понимания.

Наше физическое представление наибольших масштабов Вселенной ограничивается причинностью. Информация, находящаяся за пределами некоторого максимального расстояния, попросту не успела дойти до нас за то относительно короткое время, в течение которого существует наша Вселенная. Согласно теории относительности Эйнштейна никакие сигналы, содержащие информацию, не способны передвигаться быстрее скорости света. Таким образом, если принять во внимание, что пока Вселенная прожила всего около десяти миллиардов лет, ни один информационный сигнал просто не имел времени, чтобы преодолеть расстояние, превышающее десять миллиардов световых лет. Именно на этом расстоянии находится граница той Вселенной, которую мы можем исследовать с помощью физики; эту границу причинности часто называют *размером (космологического) горизонта*. Из-за существования этого барьера причинности крайне мало можно узнать о Вселенной на расстояниях, превышающих размер космологического горизонта. Этот размер горизонта зависит от космологического времени. В прошлом, когда Вселенная была гораздо моложе, размер горизонта был, соответственно, меньше. По мере старения Вселенной он продолжает расти.

Космологический горизонт — крайне важное понятие, ограничивающее поле деятельности науки. Как футбольный матч должен проходить в рамках четко определенных границ, так и физические процессы во Вселенной ограничиваются пределами этого горизонта в любое данное время. По сути, существование горизонта причинности приводит к некоторой двусмысленности в отношении того, что же на самом деле означает сам термин «Вселенная». Иногда этот термин относят только к веществу, находящемуся в пределах горизонта в данное время. Однако в будущем горизонт будет расти, а значит, в конце концов, включит в себя вещество, которое в настоящее время находится за его пределами. Является ли это «новое» вещество частью нашей Вселенной сейчас? Ответом может быть и да, и нет в зависимости от определения термина «Вселенная». Аналогично, могут существовать другие области пространства

времени, которые никогда не попадут в рамки нашего космологического горизонта. Ради определенности, мы будем считать, что такие области пространства-времени принадлежат к «другим вселенным».

На самых маленьких расстояниях предсказательная сила физики также ограничена, но по совершенно другой причине. В масштабе менее  $10^{-33}$  сантиметров (эта величина носит название *длины Планка*) пространство-время имеет совсем другую природу, нежели на больших расстояниях. На таких крошечных расстояниях наши традиционные понятия пространства и времени уже не применимы из-за квантово-механических флуктуаций. На данном уровне для описания пространства и времени физика должна одновременно включать как *квантовую теорию*, так и *общую теорию относительности*. Квантовая теория предполагает, что на достаточно малых расстояниях природа имеет волновой характер. Например, в обычном веществе электроны, движущиеся по орбите ядра атома, проявляют множество свойств волны. Квантовая теория объясняет эту «волнистость». Общая теория относительности утверждает, что геометрия самого пространства (вместе со временем: на этом фундаментальном уровне пространство и время тесно связаны) изменяется в присутствии больших количеств вещества, создающих сильные гравитационные поля. Однако в настоящий момент мы, к нашему великому сожалению, не располагаем полной теорией, которая объединила бы квантовую механику с общей теорией относительности. Отсутствие такой теории *квантовой гравитации* весьма существенно ограничивает то, что мы можем сказать о расстояниях, меньших, чем длина Планка. Как мы увидим, это ограничение физики в значительной степени препятствует нашему пониманию самых ранних моментов истории Вселенной.

## Космологические декады :

В этой биографии Вселенной уже минувшие десять миллиардов лет представляют очень незначительный период времени. Мы должны принять серьезный вызов — ввести шкалу времени, описывающую вселенски интересные события, которые, скорее всего, произойдут в течение следующих  $10^{100}$  лет.

$10^{100}$  — большое число. Если записать его без использования экспоненциального представления, оно будет состоять из единицы со ста нулями и будет иметь вид:

10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000  
000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000.



Это число  $10^{100}$  не только слишком длинно для написания; крайне сложно также точно представить, как безмерно оно велико. Попытки визуально представить число  $10^{100}$ , вообразив собрание знакомых предметов, скоро сходят на нет. Например, число песчинок на всех пляжах мира часто приводят в качестве примера непостижимо большого числа. Однако приблизительные оценки свидетельствуют, что общее количество всех песчинок приблизительно равно  $10^{23}$  (единица с двадцатью тремя нулями) — большое число, но все равно безнадежно неадекватное для выполнения нашей задачи. Как насчет числа звезд в небе? Число звезд в нашей галактике близко к ста миллиардам — вновь относительно небольшое число. Число звезд во всех галактиках в нашей видимой Вселенной равно примерно  $10^{22}$  — тоже слишком мало. Вообще-то, общее число протонов, фундаментальных строительных кирпичиков, из которых состоит материя, во всей видимой Вселенной составляет всего  $10^{78}$ : даже эта величина в десять миллиардов триллионов раз меньше требуемой! Число лет, отделяющих настоящий момент от вечности, воистину безмерно.

Чтобы описать временные масштабы, связанные с будущей эволюцией Вселенной, и не запутаться окончательно, воспользуемся новой единицей времени, называемой *космологической декадой*. Если за  $\tau$  обозначить время в годах, то в экспоненциальном представлении  $\tau$  можно записать в виде

$$\tau = 10^\eta \text{лет},$$

где  $\eta$  — некоторое число. В соответствии с нашим определением экспонента  $\eta$  — это число космологических декад. Например, сейчас Вселенной всего около десяти миллиардов лет, что соответствует  $10^{10}$  годам, или  $\eta = 10$  космологическим декадам. В будущем, когда Вселенной исполнится сто миллиардов лет, это будет  $10^{11}$  лет, или  $\eta = 11$  космологических декад. Значение этой схемы состоит в том, что каждая последующая космологическая декада представляет собой десятикратное увеличение общего возраста Вселенной. Таким образом, концепция космологической декады позволяет нам размышлять о безмерно долгих промежутках времени. Таким образом, вызываясь большое число из нашего примера, число  $10^{100}$ , соответствует гораздо более понятной сотой космологической декаде, или  $\eta = 100$ .

Космологические декады можно использовать и при обсуждении очень коротких, но богатых событиями отрезков времени непосредственно после Большого взрыва. В этом случае мы разрешаем космологической декаде иметь отрицательную величину. Благодаря такому расширению один год после Большого взрыва соответствует  $10^0$  годам, или нулевой космологической декаде. Тогда одна десятая, или  $10^{-1}$ , — это

космологическая декада-1, одна сотая, или  $10^{-2}$  лет, — космологическая декада-2 и т. д. Начало времени, когда произошел сам Большой взрыв, соответствует  $\tau = 0$ ; в терминах космологических декад Большой взрыв произошел в космологическую декаду, соответствующую бесконечности со знаком «минус».

## Пять великих временных эпох

Наше настоящее понимание прошлого и будущего Вселенной можно систематизировать, выделив определенные временные эпохи. По мере перехода Вселенной из одной эпохи в другую ее содержимое и характер меняются весьма значительно, а в некоторых отношениях — почти целиком. Эти эпохи, аналогичные геологическим эпохам, помогают составить общее впечатление о жизни Вселенной. С течением времени ряд естественных астрономических катастроф формирует Вселенную и управляет ее последующей эволюцией. Хроника этой истории может иметь следующий вид.

*Первичная эпоха.*  $-50 < \eta < 5$ . Эта эпоха включает раннюю фазу истории Вселенной. В то время, когда Вселенной не исполнилось и десяти тысяч лет, основная часть плотности энергии Вселенной существовала в виде излучения, поэтому этот ранний период часто называют *эпохой излучения*. Еще не успели образоваться никакие астрофизические объекты вроде звезд и галактик.

В эту короткую раннюю эпоху произошли многие важные события, определившие будущий курс развития Вселенной. Легкие элементы, типа гелия и лития, образовались в первые несколько минут этой первичной эпохи. Еще раньше сложные физические процессы вызвали небольшое преобладание обычного барионного вещества над антивеществом. Антивещество почти полностью аннигилировало с большей частью вещества, после чего осталась небольшая доля последнего, из которой и состоит современная Вселенная.

Если стрелки часов перевести на еще более раннее время, наше понимание становится куда менее твердым. В чрезвычайно ранний период, когда Вселенная была неизмеримо горячей, судя по всему, произошло следующее: квантовые поля с очень высокой энергией вызвали фантастически быстрое расширение и создали очень малые возмущения плотности в однородной и ничем не примечательной Вселенной. Эти крошечные неоднородности сохранились и выросли в галактики, скопления и крупномасштабные структуры, населяющие современную Вселенную.

Ближе к концу первичной эпохи плотность энергии излучения стала меньше плотности энергии, связанной с веществом. Этот переход произошел, когда Вселенной было около десяти тысяч лет. Вскоре после этого произошло еще одно переломное событие: температура Вселенной стала достаточно низкой, чтобы позволить существование атомов (точнее говоря, атомов водорода). Первое появление нейтральных атомов водорода носит название *рекомбинации*. После рекомбинации возмущения плотности вещества во Вселенной позволили ему образовать комки, не подверженные действию вездесущего радиационного моря. Впервые начали формироваться знакомые нам астрофизические объекты вроде галактик и звезд.

*Эпоха звезд.*  $6 < \eta < 14$ . Такое название обусловлено наличием звезд. В эту эпоху большая часть энергии, образующейся во Вселенной, возникает в результате реакций ядерного синтеза, которые происходят в обычных звездах. Мы живем в середине эпохи звезд — в то время, когда звезды активно рождаются, живут и умирают.

В самый ранний период эпохи звезд, когда Вселенной было всего несколько миллионов лет, родилось первое поколение звезд. В первый миллиард лет возникли первые галактики, и начались их объединения в скопления и сверхскопления.

Многие вновь появившиеся галактики переживают бурные фазы высоких энергий из-за всепожирающих черных дыр, расположенных в их центрах. Когда черные дыры разрывают звезды и окружают себя вихреподобными дисками горячего газа, высвобождаются огромные количества энергии. С течением времени эти *квазары* и *активные ядра галактик* медленно умирают.

В будущем, ближе к концу эпохи звезд, ключевую роль сыграют самые обычные звезды Вселенной — звезды с низкой массой, которые называют красными карликами. Красные карлики — это звезды, масса которых не превышает половины массы Солнца, но их так много, что их совокупная масса, бесспорно, превосходит массу всех более крупных звезд во Вселенной. Эти красные карлики — истинные скряги, когда дело доходит до превращения водорода в гелий. Они копят свою энергию и будут существовать даже через десять триллионов лет, тогда как более массивные звезды к тому времени уже давно истощат запасы своего ядерного топлива и эволюционируют в белых карликов или превратятся в сверхновые. Эпоха звезд завершится, когда в галактиках закончится водородный газ, прекратится рождение звезд, а звезды-долгожители (имеющие наименьшую массу), красные карлики, медленно погаснут. Когда звезды наконец перестанут светить, Вселенной будет около ста триллионов лет (космологическая декада  $\eta = 14$ ).

*Эпоха распада.*  $15 < \eta < 39$ . По завершении эпохи образования и эволюции обычных звезд большая часть обычного вещества во Вселенной окажется заключенной в вырожденных остатках звезд — единственном, что останется по окончании эволюции звезд. В этом контексте под термином вырожденность подразумевается особое квантово-механическое состояние вещества, а никак не состояние аморальности. В список вырожденных объектов входят коричневые карлики, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. В эпоху распада Вселенная выглядит совсем не так, как сейчас. Нет видимого излучения обычных звезд, которое могло бы оживить небо, согреть планеты или придать галактикам слабое сияние, присущее им сегодня. Вселенная стала холоднее, темнее, а вещество в ней — еще более рассеянным.

И все же кромешную тьму непрерывно оживляют астрономически интересные события. Случайные столкновения разрушают орбиты мертвых звезд, а галактики постепенно изменяют свою структуру. Некоторые звездные остатки выбрасываются далеко за пределы галактики, другие же падают к ее центру. Изредка может вспыхнуть и маячок, когда в результате столкновения двух коричневых карликов появляется новая звезда с малой массой, которая впоследствии проживет триллионы лет. В среднем, в любое данное время, в галактике размером с наш Млечный Путь будут светить несколько таких звезд. Время от времени, в результате столкновения двух белых карликов, галактику потрясает вспышка сверхновой.

В эпоху распада белые карлики, самые распространенные звездные остатки, содержат наибольшую часть обычного барионного вещества Вселенной. Они собирают частицы темной материи, которые вращаются по орбите галактики, образуя огромный расплывчатый ореол. Однажды попав внутрь белого карлика, эти частицы впоследствии аннигилируют, тем самым обеспечивая Вселенную важным источником энергии. Действительно, в качестве основного механизма образования энергии традиционные реакции ядерного горения в звездах заменяет аннигиляция темной материи. Однако к тридцатой космологической декаде ( $\eta = 30$ ) или даже раньше запас частиц темной материи истощается, в результате чего этот способ образования энергии подходит к своему логическому завершению. Теперь вещественное содержимое Вселенной ограничивается белыми карликами, коричневыми карликами, нейтронными звездами и мертвыми, разбросанными на большие расстояния друг от друга, планетами.

В конце эпохи распада масса-энергия, накопленная в недрах белых карликов и нейтронных звезд, рассеивается в виде излучения по мере распада протонов и нейтронов, составляющих эти звезды. Белый кар-

лик, поддерживаемый протонным распадом, генерирует около четырехсот ватт: этого количества энергии достаточно для работы нескольких электрических лампочек. Общая светимость целой галактики таких старых звезд меньше, чем у одной обычной звезды, существующей за счет горения водорода, вроде нашего Солнца. С завершением процесса распада протонов эпоха распада подходит к концу. Вселенная — еще более темная, еще более разреженная — изменяется вновь.

*Эпоха черных дыр.*  $40 < \eta < 100$ . По завершении эпохи распада протонов из всех подобных звезд астрофизических объектов остаются только черные дыры. Эти фантастические объекты обладают столь сильным гравитационным полем, что даже свет не может покинуть их поверхности. Распад протонов никак не влияет на черные дыры, так что по окончании эпохи распада они остаются целыми и невредимыми.

По мере испарения и исчезновения белых карликов черные дыры поглощают вещество и увеличиваются. И все же даже черные дыры не могут жить вечно. В конечном итоге, они должны испариться в ходе очень медленного квантово-механического процесса, называемого *излучением Хокинга*. Несмотря на свое название, черные дыры не являются абсолютно черными. На самом деле они светятся, хотя и чрезвычайно слабо, испуская тепловой спектр света и другие продукты распада. После исчезновения протонов испарение черных дыр становится основным источником уже почти невидимой энергии Вселенной. Черная дыра, имеющая массу Солнца, проживет около шестидесяти пяти космологических декад; большая черная дыра, имеющая массу галактики, испарится через девяносто восемь или сто космологических декад. Таким образом, всем черным дырам суждено погибнуть. Эпоха черных дыр заканчивается после испарения самых больших черных дыр.

*Эпоха вечной тьмы.*  $\eta > 101$ . По истечении ста космологических декад протоны уже давно распались, а черные дыры испарились. Сохраняются только остаточные продукты этих процессов: фотоны с огромной длиной волны, нейтрино, электроны и позитроны. Между эпохой вечной тьмы и первичной эпохой, когда Вселенной было менее миллиона лет, существует странная параллель. В каждую из этих эпох, весьма и весьма отдаленных во времени, полностью отсутствуют какие бы то ни было звездоподобные объекты, которые могли бы генерировать энергию.

В этом холодном далеком будущем активность во Вселенной практически завершилась. Энергия упала до крайне низких уровней, а временные промежутки просто ошеломляют. Дрейфующие в космическом пространстве электроны и позитроны встречаются друг с другом и вре-

мя от времени образуют атомы позитрония. Однако эти столь поздно образующиеся структуры неустойчивы, а составляющие их частицы, рано или поздно, аннигилируют. Могут произойти, хотя и очень медленно, и другие аннигиляционные события низкого уровня.

По сравнению со своим расточительным прошлым, теперь Вселенная живет относительно консервативной и скромной жизнью. Или нет? Кажущаяся нищета этой столь далекой от нас эпохи, возможно, обусловлена неопределенностью нашей экстраполяции, а не реальным переходом Вселенной к старости.

## Сохранение жизни

Наше общество с немалой долей беспокойства осознало, что вымирание человечества не является такой уж надуманной проблемой. Ядерная конфронтация, экологические катастрофы и распространяющиеся вирусы — это далеко не все перспективы конца света, на которые обращают всеобщее внимание осторожные, склонные к паранойе и думающие только о выгоде люди. Но что если мы примем, хотя и несколько устаревшую, но куда более романтическую перспективу о ракетах, колониях в космосе и завоеваниях Галактики? В таком будущем человечество без труда смогло бы отсрочить быстро приближающуюся гибель Земли, просто перебравшись в другие солнечные системы. Но сможем ли мы продлить жизнь самих звезд? Найдем ли способ обойти распад протона? Сумеем ли обойтись без свойств черных дыр, обеспечивающих Вселенную энергией? Смогут ли хоть какие-то живые организмы пережить финальное всеобъемлющее опустошение эпохи вечной тьмы?

В этой книге мы рассматриваем перспективы и возможности сохранения жизни в каждую эпоху будущей эволюции Вселенной. Этому анализу неизбежно сопутствует атмосфера некоторой неопределенности. Общее теоретическое понимание жизни блещет отсутствием такового. Даже в той единственной среде обитания, где мы имеем прямой опыт, на нашей родной Земле, возникновение жизни не понято до сих пор. Таким образом, в своих дерзких обсуждениях возможностей существования жизни в отдаленном будущем мы находимся в качественно ином положении, чем когда имеем дело с чисто астрофизическими явлениями.

Несмотря на то, что у нас нет прочной теоретической парадигмы, описывающей возникновение жизни, нам необходима хоть какая-то рабочая модель, которая позволила бы систематизировать нашу оценку перспектив сохранения и распространения жизни. Чтобы охватить хотя бы часть всего диапазона возможностей, мы основываем свои размышления на двух очень разных моделях жизни. В первом и наиболее

очевидном случае мы рассматриваем жизнь, в основе которой лежит биохимия, приблизительно подобная земной. Жизнь такого рода может возникнуть на планетах, подобных Земле, или на больших лунах в других солнечных системах. Отдавая дань освященной веками традиции, бытующей в среде экзобиологов, предположим, что, пока на некоторой планете присутствует вода в жидком состоянии, на этой планете может зародиться и развиваться жизнь, в основе которой лежит углерод. Требование, связанное с тем, что вода должна находиться в жидком состоянии, накладывает достаточно строгое температурное ограничение на любую потенциальную среду обитания. Например, для атмосферного давления температура должна быть больше 273 градусов по шкале Кельвина, что соответствует точке замерзания воды, и меньше 373 градусов по шкале Кельвина, что соответствует точке кипения воды. Этот диапазон температур исключает большую часть астрофизических сред.

Второй класс жизненных форм основан на гораздо более абстрактной модели. В этом, последнем, случае мы в большой степени используем идеи Фримена Дайсона, влиятельного физика, выдвинувшего гипотезу соответствия масштабов для абстрактных форм жизни. Основная мысль состоит в том, что при любой температуре можно вообразить некоторую абстрактную форму жизни, которая прекрасно себя чувствует именно при данной температуре, по крайней мере, в принципе. Более того, скорость, с которой это абстрактное создание расходует энергию, прямо пропорциональна ее температуре. Например, если мы представим какой-то организм Дайсона, живущий при некоторой заданной температуре, то, согласно закону соответствия масштабов, все жизненные функции другой качественно подобной формы жизни, довольствующейся вполнину более низкой температурой, должны быть замедлены в те же самые два раза. В частности, если рассматриваемые организмы Дайсона обладают разумом и некоей разновидностью сознания, то фактическая скорость ощущения ими происходящих событий определяется не реальным физическим временем, а так называемым масштабным временем, пропорциональным температуре. Другими словами, скорость осознания у организмов Дайсона, живущих при низких температурах, ниже, чем у (во всем остальном) аналогичной формы жизни, существующей при более высокой температуре.

Этот абстрактный подход переводит обсуждение далеко за пределы привычной углеродной формы жизни, существующей на нашей планете, но при этом он все же позволяет сделать некоторые допущения о природе жизни вообще. Прежде всего, необходимо принять, что первичная основа мышления заключается в *структуре* жизненной формы, а не в *веществе*, ее образующем. Например, у людей мышление каким-то образом

возникает в ходе множества сложных биохимических процессов, протекающих в мозге. Вопрос в том, необходима ли эта органическая структура. Если бы мы могли каким-то образом создать другую копию всей этой конструкции — человека, — используя иной набор строительных материалов, смогла бы эта копия мыслить таким же образом? Считала бы копия, что она и есть этот самый человек? Если органическая конструкция по какой-то причине окажется необходимой, значит, ключевую роль играет *вещество*, из которого состоит жизнь, и возможность существования абстрактных форм жизни в обширном диапазоне различных сред весьма ограничена. Если же, напротив, как мы принимаем здесь, необходима лишь *структура*, то в обширном диапазоне различных сред могут существовать многие формы жизни. Гипотеза соответствия масштабов Дайсона дает нам приблизительное представление о скоростях обмена веществ и мышления этих абстрактных форм жизни. Эта система взглядов весьма оптимистична, но, как мы увидим, она имеет богатые и интересные следствия.

### «Временной принцип Коперника»

По мере того как продолжается наше повествование, а великие эпохи сменяют друг друга, характер физической Вселенной меняется почти полностью. Прямое следствие этого изменения состоит в том, что Вселенная отдаленного будущего или далекого прошлого совершенно не похожа на Вселенную, в которой мы живем сегодня. Поскольку современная Вселенная достаточно удобна для жизни в том виде, в каком знаем ее мы, — у нас есть звезды, которые снабжают нас энергией, и планеты, на которых можно жить, — все мы совершенно естественно склонны считать современную эпоху в некотором смысле занимающей особое положение. В противовес этому мнению мы принимаем идею о «*временном принципе Коперника*», который достаточно просто гласит, что современная космологическая эпоха не занимает во времени особого места. Другими словами, в процессе эволюции и изменения Вселенной в ней не прекратятся интересные события. Хотя реальные уровни производства энергии и энтропии становятся все более низкими, это компенсируется удлинением временных шкал, которые станут доступны в будущем. Еще раз перефразировав эту мысль, мы утверждаем, что законы физики предсказывают не то, что Вселенная однажды достигнет состояния полного покоя, а, скорее, что в настолько далеком будущем, в какое мы осмелимся заглянуть, не прекратятся интересные физические процессы.

Идея временного принципа Коперника служит естественным продолжением нашего непрерывно расширяющегося взгляда на Вселен-



ную. Глобальная революция в мировоззрении произошла в шестнадцатом веке, когда Николай Коперник заявил, что Земля не является центром нашей Солнечной системы, как считалось ранее. Коперник совершенно правильно понял, что Земля — всего лишь одна из множества планет, которые вращаются по орбите вокруг Солнца. Это явное понижение статуса Земли, а следовательно, и человечества в то время вызвало сильнейший резонанс. Как обычно рассказывают, из-за еретических последствий подобного сдвига в мышлении Коперник вынужден был отложить публикацию своего величайшего труда *De Revolutionibus Orbium Coelestium*<sup>1</sup> до 1543 года — года его смерти. Он колебался до самого конца и был близок к тому, чтобы скрыть свой труд. Во введении к своей книге Коперник пишет: «Я уже чуть было не положил свой завершённый труд в ящик, из-за презрения, которое я почувствовал, имея на то причины, вследствие новизны и явного противоречия моей теории здравому смыслу». Несмотря на отсрочку, это сочинение, в конце концов, было опубликовано, и первая отпечатанная копия легла на смертный одр Коперника. Земля более не считалась центром Вселенной. Начался глобальный переворот.

После совершенной Коперником революции понижение нашего статуса не только продолжилось, но и ускорилось. Очень скоро астрономы установили, что другие звезды — это, на самом деле, объекты, подобные нашему Солнцу, и они могут, по крайней мере, в принципе, иметь свои собственные планетарные системы. Одним из первых к такому заключению пришел Джордано Бруно, который заявил, что у других звезд не только есть планеты, но и что эти планеты обитаемы! Впоследствии, в 1601 году, инквизиторы Римской католической церкви сожгли его на костре, хотя и якобы не из-за его утверждений, касавшихся вопросов астрономии. С тех пор мысль о том, что в других солнечных системах тоже могут существовать планеты, время от времени подхватывали выдающиеся ученые, включая Леонарда Эйлера, Иммануила Канта и Пьера Симона Лапласа.

Интересно, что на протяжении почти четырех веков идея о существовании планет за пределами нашей Солнечной системы оставалась чисто теоретической концепцией, в поддержку которой не было никаких данных. Только в последние несколько лет, начиная с 1995 года, астрономы точно установили, что планеты, вращающиеся по орбитам других звезд, действительно существуют. Имея новые возможности для наблюдения и проделав грандиозную работу, Джеф Марси, Мишель Майор и их соратники показали, что планетарные системы — явление относительно распространенное. Теперь наша Солнечная система превратилась

---

<sup>1</sup>О вращениях небесных сфер (лат.). — *Прим. перев.*

всего лишь в одну из, возможно, миллиардов солнечных систем, существующих в Галактике. Начался новый переворот.

Поднимаясь на следующий уровень, мы обнаруживаем, что наша Галактика не единственная во Вселенной. Как в начале двадцатого века впервые осознали космологи, видимая Вселенная полна галактик, в каждой из которых существуют миллиарды звезд, вполне могущих иметь свои собственные системы планет. Более того, когда-то Коперник заявил, что наша планета не имеет особого места в рамках нашей Солнечной системы; теперь же современная космология доказала, что и наша Галактика не занимает *особого положения* во Вселенной. В действительности, Вселенная, судя по всему, подчиняется *космологическому принципу* (см. следующую главу), который гласит, что на больших расстояниях Вселенная одинакова повсюду в космическом пространстве (Вселенная однородна) и что Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях (Вселенная изотропна). Космос не имеет ни привилегированных мест, ни предпочтительных направлений. Вселенная демонстрирует поразительную регулярность и простоту.

Каждое последующее понижение центрального статуса Земли приводит к бесповоротному заключению, что местоположение нашей планеты во Вселенной ничем не примечательно. Земля — это обычная планета, которая вращается по орбите умеренно яркой звезды в обыкновенной Галактике, расположенной в случайно выбранном месте Вселенной. Временной принцип Коперника распространяет эту общую идею из области пространства на область времени. Аналогично тому как наша планета, а значит, и человечество, не имеет особого местоположения во Вселенной, так и наша текущая космологическая эпоха не занимает особого места в громадных просторах времени. Этот принцип только продолжает разрушение той малой толики антропоцентрического мышления, что еще сохранилась.

Мы пишем эту книгу в самом конце двадцатого века — подходящее время, чтобы поразмыслить над нашим местом во Вселенной. Благодаря обширности понимания, обретенного в этом веке, мы можем, как никогда ранее внимательно, посмотреть на свое положение во времени и пространстве. В соответствии с временным принципом Коперника и широчайшим диапазоном астрофизических событий, которые еще только произойдут в необъятном будущем, мы утверждаем, что на момент завершения этого тысячелетия конец Вселенной не очень близок. Вооружившись четырьмя силами природы, четырьмя астрономическими окнами, чтобы обозревать Вселенную, и новым календарем, измеряющим время в космологических декадах, мы отправляемся в наше странствие по пяти великим эпохам времени.

## ГЛАВА 1

# Первичная эпоха

## $-50 < \eta < 5$

**Сильнейший взрыв становится отправной точкой эволюционного путешествия Вселенной в будущее.**

*До начала, за горизонтом:*

Царит хаос. Основная структура пространства-времени неистовствует. Вместо того чтобы проявлять привычные три измерения обычного пространства с естественным, однонаправленным течением времени, пространство-время напоминает взболтанную, беспорядочную и флуктуирующую пену, непрерывно изменяющую свою геометрию каждые  $10^{-43}$  секунды. Любое четкое разделение пространства и времени не имеет ни малейшего смысла в этом состоянии физической реальности с ультра высокими энергиями. Квантовая механика и гравитация вступили в космическую битву, исход которой будет иметь важные последствия для всей Вселенной.

Из этой вероятностной пены извергаются горячие пузыри микроскопического пространства-времени. Большинству из них суждено расширяться, а затем пережить повторное сжатие, вернувшись в аморфную пену, за непостижимо короткие промежутки времени. Время от времени, при возникновении нужных условий, извергающийся участок пространства-времени переходит в состояние фантастически быстрого расширения. Последующий экспоненциальный рост настолько силен, что смежные точки пространства разбегаются друг от друга со скоростями, превышающими скорость света. Эта алогичная активность увеличивает размер расширяющегося участка на чрезвычайно большую величину за невероятно короткий промежуток времени.

После этой стремительной эпохи сверхяркого расширения раздутый участок пространства-времени простирается далеко за пределы исходной фоновой пены, вследствие чего полностью от нее отделяется. Однажды вступив на этот путь, вновь отделившийся участок может расширяться вечно, хотя и не так быстро. Этот участок разрастается

до непостижимо огромных размеров за бесконечно долгие промежутки времени, которые ожидают его впереди. Так начинается длинный и мучительный путь новорожденной Вселенной к смерти.

Важным достижением современной науки является создание теории возникновения Вселенной. Вселенная родилась во взрыве, который произошел в четко определенный момент времени, и расширилась, превратившись в нашу современную Вселенную. Благодаря появлению теории Большого взрыва, многие вопросы, связанные с рождением Вселенной, которые когда-то относили к области философии или метафизики, теперь получили четкие и подробные ответы. Момент творения поставили на прочную научную основу, освободили от пустых гипотез и во многих отношениях подтвердили с помощью экспериментов и наблюдений.

Только представьте себе, как здорово было бы воочию увидеть начало времени. Если бы мы могли испытать эти первые определяющие мгновения, если бы мы могли наблюдать микроскопические события, происходящие с невероятной скоростью, что именно мы увидели бы? Возобновим же наше повествование с момента начала существования Вселенной. Сначала мы заметили бы, что Вселенная расширяется и остывает с фантастической скоростью. В первые  $10^{-35}$  секунд или около того Вселенная расширяется настолько быстро, что смежные точки пространства разбегаются друг от друга с непостижимыми скоростями. В этот краткий промежуток алогичного поведения область Вселенной размером с маленькую точку (·) раздувается, становясь больше всей видимой современной Вселенной. Вскоре расширение замедляется до более разумных скоростей, не превышающих скорость света, но все же не прекращается.

Кроме того, мы увидели бы, что ранняя Вселенная очень горяча и очень ярка. При таких громадных температурах, намного превышающих температуры центральных областей любой звезды, вещество очень сильно отличается от того, с которым мы привыкли иметь дело в повседневной жизни. На Земле обычное вещество состоит из атомов, каждый из которых образован несколькими электронами, вращающимися по орбите вокруг ядра, содержащего протоны и нейтроны. В исключительной жаре первых микросекунд температура слишком высока, чтобы могли существовать молекулы, атомы или ядра. Такой температуры не выдерживают даже протоны и нейтроны. Вселенная кишит таинственными элементарными частицами, которые носят название кварков.

В обычных условиях мы полагаем, что вещество составляет все существо во Вселенной. Сейчас, например, большая доля массы-энергии Вселенной содержится в веществе галактик и лишь очень малая ее часть рассеяна в межгалактическом пространстве. Однако в самые ранние мгновения истории, когда вещество было разбито на основные составля-

ющие его частицы, Вселенная имела очень любопытный аспект. Частицы вещества составляли лишь крошечную долю общей плотности энергии Вселенной. Основная часть плотности энергии содержалась в фоновом излучении, и Вселенная напоминала чрезвычайно горячую печь — первичную печь.

Излучение, существовавшее в самом начале, остается с нами по сей день. Оно образует море протонов, которое заполняет все космическое пространство и называется *космическим фоновым излучением*<sup>1</sup>. Сегодня это фоновое излучение содержит гораздо меньше энергии, чем в отдаленном прошлом. Его фактическая температура упала до холода в 2,7 градусов выше абсолютного нуля. Однако в самые первые мгновения это фоновое излучение было крайне ярким и горячим. Впоследствии из-за расширения Вселенной некогда сильный фоновый свет был растянут до миллиметровых микроволн. Догма прошлого превратилась в низкоэнергетическую микроволновку.

Когда Вселенной всего одна микросекунда, мы погружены в необъятное море излучения с относительно малой примесью кварков и других частиц. Кварки состоят как из обычного вещества, так и из антивещества, с небольшим избытком первого. На каждые тридцать миллионов кварков, состоящих из антивещества, в запасе Вселенной имеется тридцать миллионов и один кварк, состоящих из вещества. По мере развития и охлаждения Вселенной кварки и антикварки аннигилируют друг с другом. По завершении этого процесса остается лишь крошечная доля избыточного вещества. Этот, на первый взгляд, незначительный остаток, в конечном итоге, образует все вещество, которое мы видим во Вселенной сегодня: галактики, звезды, планеты, тебя, читатель, и меня.

По мере аннигиляции кварков и антикварков оставшиеся кварки начинают собираться в протоны и нейтроны. По прошествии примерно тридцати микросекунд свободных кварков уже не остается. В силу того что во Вселенной все еще безраздельно царит излучение (фотоны), а не материальные частицы, это изменение в реестре ее частиц вряд ли хоть сколько-нибудь ее беспокоит, и расширение неумолимо продолжается.

Далее, по мере того как Вселенная продолжает остывать, протоны и нейтроны начинают сливаться, образуя ядра гелия и других легких элементов. Этот процесс начинается, когда Вселенной исполняется около одной секунды, и довольно резко прекращается через несколько минут. Большая часть существующего сегодня гелия образовалась

---

<sup>1</sup> В русской научной литературе чаще употребляется термин «реликтовое излучение». — *Прим. пер.*

в этой ранней вспышке ядерной активности. Более тяжелые ядра, например, углерода и кислорода — элементов, обеспечивающих сырье для жизни, — пока что образоваться не могут. Вселенная расширяется слишком быстро, чтобы большие ядра могли объединиться. Для этого у них слишком мало времени, да и плотность Вселенной недостаточно высока. Тяжелые элементы образуются гораздо позднее в плотных центрах звезд и во вспышках сверхновых, отмечающих гибель массивных звезд.

После образования легких элементов содержимое Вселенной претерпевает значительные перемены. Это пополнение запасов реестра частиц — второе такое событие за первые несколько минут существования времени. Излучение продолжает господствовать во Вселенной, будучи основной ее составляющей. А расширение продолжается.

## Инфляция

Как мы уже отмечали, в самые первые мгновения истории космоса Вселенная вступила в короткую, но напряженную фазу невероятно быстрого расширения. По окончании этого периода расширения, происходившего со скоростями, превышающими скорость света, размер Вселенной увеличился в огромное число раз: возможно, в миллион триллионов триллионов ( $10^{30}$ ). По завершении этой, хотя и короткой, но изменившей Вселенную, эпохи космос немного успокоился, перейдя в состояние более монотонного расширения. Как и почему произошла эта инфляция?

Расширение Вселенной, распространенность легких элементов и существование поля космического фонового излучения объясняет традиционная теория Большого взрыва. Эта теория обладает еще одним преимуществом: она очень проста и изящна математически. Однако в своем первоначальном виде теория Большого взрыва не дает полного объяснения Вселенной. К счастью, многие из оставшихся свойств нашей Вселенной, а именно: ее большой размер, ее плоскостность и крайнюю однородность, — можно объяснить с помощью всего одной модификации. Эту дополнительную теорию, носящую название *теории инфляции*, выдвинул Алан Гус, который сейчас работает профессором в МТИ. Его плодотворный труд — *The Inflationary Universe* («Инфляционная Вселенная») — произвел переворот в космологических исследованиях.

Процесс инфляции легко объясняет, почему наша Вселенная такая большая и такая однородная. Инфляция также приводит геометрию пространства-времени к той степени плоскостности, которую мы наблюдаем сегодня в космосе. Основная идея инфляции проста: в очень ранний момент своей истории размер Вселенной внезапно увеличился

в огромное число раз. Чтобы эволюционировать во Вселенную, напоминающую нашу собственную, со свойствами, которые мы наблюдаем сегодня, первичная Вселенная должна была увеличиться, как минимум, в  $10^{28}$  раз. Чтобы хоть как-то представить себе всю необъятность этого числа, вспомните, что размер современной видимой Вселенной составляет около  $10^{28}$  сантиметров. Так что инфляция подобна раздуванию одной гальки до размеров всей нашей видимой Вселенной, или даже больше, за крошечную долю секунды. Такое крайне быстрое расширение происходит, если в общей плотности энергии Вселенной доминирует *плотность энергии вакуума*. Этот достаточно таинственный тип энергии обладает любопытным свойством отрицательного давления. Если в общей энергии Вселенной доминирует энергия вакуума, отрицательное давление будет стимулировать постоянное увеличение скорости расширения. Это ускоряющееся расширение может раздуть Вселенную в огромное количество раз, которое необходимо, чтобы объяснить ее свойства.

На первый взгляд, концепция плотности энергии вакуума выглядит как терминологическое противоречие. Мы привыкли считать, что вакуум — это абсолютная пустота. Как же может нечто, будто бы пустое, вообще иметь энергию, не говоря уже о преобладании плотности этой энергии над всей остальной энергией Вселенной? На фундаментальном уровне вакуум должен подчиняться квантово-механическому описанию, а это означает, что *на самом деле вакуум совсем не пуст*. Вакуумом правит принцип неопределенности Гейзенберга, который назван в честь Вернера Гейзенберга, пионера квантовой механики. Эта фундаментальная концепция квантовой механики возникает из-за волновой природы физической реальности на малых расстояниях и приводит к возможности существования энергии вакуума.

Рассмотрим, например, электрон. Принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что невозможно одновременно измерить как импульс частицы, так и ее положение с произвольно высокой степенью точности. Поскольку нельзя точно измерить одновременно импульс и положение, неопределенности в значениях этих величин невозможно свести к минимуму в одно и то же время. Другими словами, сумма неопределенностей должна превышать некоторое число, обыкновенно обозначаемое  $\hbar$ . Величина  $\hbar$  — это фундаментальная постоянная природы, называемая *постоянной Планка*. Аналогичный закон гласит, что невозможно одновременно свести к минимуму неопределенность в измерении энергии и неопределенность в измерении времени. Из этого принципа неопределенности следует одна важная вещь: в природе закон сохранения энергии может нарушаться при условии, что сей криминальный акт несохранения происходит в течение достаточно короткого времени.

Постоянная  $\hbar$  почти исчезающе мала, если ее рассматривать с перспективы повседневной жизни. Наблюдая за машиной, едущей по улице, вы без проблем можете определить как ее положение, так и ее скорость. Внутренняя неопределенность, связанная с принципом Гейзенберга, никак не влияет на стремление к точности при обычных измерениях (порядка одного дюйма при определении положения машины и одной мили в час при определении скорости).

Принцип неопределенности имеет важные следствия для концепции вакуума. С точки зрения квантовой механики, вакуум, в действительности, не может быть пустым. Вообразите область пространства, лишенную вещества, область, которую в обычных условиях мы сочли бы «пустой». Из-за принципа неопределенности это якобы пустое пространство заполнено частицами, которые рождаются и почти мгновенно умирают. Энергия, необходимая для образования таких частиц, берется из вакуума и быстро возвращается назад, после того как частицы аннигилируют друг с другом и вновь возвращаются в ничто. Эти частицы называют *виртуальными*, потому что у них нет реальной жизни. Время их жизни «взято взаймы», и они всегда аннигилируют сразу же после своего спонтанного появления из вакуума. Из-за спонтанного образования этих виртуальных частиц пространство, пустое во всех других отношениях, кишит этими призрачными объектами. И эти виртуальные частицы могут наделять вакуум реальной энергией, которой, в противном случае, он не имел бы. Таким образом, квантовое поведение естественным образом приводит к тому, что пустое пространство может обладать энергией.

Однако вакуум может не только обладать плотностью энергии, но и достигать различных энергетических уровней. Чтобы в самые первые мгновения Вселенная пережила инфляцию, необходимо, чтобы вакуум находился в состоянии достаточно высокой энергии. Но эта энергия вакуума значительно больше, чем его энергетический уровень в современной Вселенной. В настоящий момент вакуум не играет преобладающей роли в динамике Вселенной; в противном случае Вселенная расширялась бы совсем не так, как сейчас. Таким образом, чтобы работал инфляционный сценарий развития Вселенной, плотность энергии ее вакуума должна быть невероятно большой в ранний период ее истории и очень малой (или нулевой) сейчас. Однако если в настоящее время энергия вакуума не равна нулю, это будет иметь поразительные следствия в будущем, что мы увидим позднее.

В ранний период существования Вселенной, когда фоновая температура достаточно высока, вследствие чего сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия едины, во Вселенной может преобладать плотность энергии вакуума. Когда имеет место такое господство вакуума,



Вселенная входит в фазу инфляции и быстро расширяется. Если результирующая инфляционная фаза расширения длится достаточно долго, Вселенная может расширяться в магические  $10^{28}$  раз — число, необходимое, чтобы создать нашу современную Вселенную, или даже много больше.

Энергия вакуума может захватить господство во Вселенной различными способами. Многие теории частиц говорят о том, что в природе существуют так называемые *скалярные поля*. Эти квантово-механические поля в определенном смысле аналогичны электрическому потенциалу, порождающему гораздо более знакомую нам электрическую силу. Однако скалярные поля могут иметь действительно очень высокую энергию, значение которой намного превышает энергии, исследуемые в современных ускорителях частиц. В результате эти скалярные поля остаются чисто теоретическим построением, т. к. пока еще не придумали прямых экспериментов, которые могли бы подтвердить их существование. Потенциальные энергии скалярных полей могут сделать немислимо большой вклад в энергию вакуума, настолько огромный, чтобы преобладать над плотностью энергии других областей Вселенной в очень ранние моменты времени. Например, при плотности энергии, связанной с великим объединением сил, в кубическом сантиметре вакуума содержалось бы больше энергии, чем во всей современной видимой Вселенной!

Большое значение энергии, связанной с вакуумом, очень сильно влияет на расширение Вселенной. Как свидетельствует знаменитая формула Эйнштейна  $E = mc^2$ , энергия эквивалентна массе, значит, эти огромные энергии вакуума должны создавать соразмерно огромные гравитационные эффекты. Высокое значение энергии предполагает большое количество массы, которая стягивает вещество и, как правило, не ускоряет расширение, а замедляет его. Однако у энергии вакуума имеется одно любопытное свойство — *отрицательное давление*. Это отрицательное давление больше массы-энергии, вследствие чего его действие стимулирует расширение. И хотя обычно мы не задумываемся о том, что давление имеет гравитационный эффект, этого, тем не менее, требует общая теория относительности. Обычное положительное давление направлено наружу, тогда как его гравитационное действие — вовнутрь. Гравитация же отрицательного давления действует от центра к поверхности, но ведь именно такое поведение заставляет Вселенную расширяться с возрастающей скоростью. В итоге это колоссальное отрицательное давление за крошечную долю секунды раздувает Вселенную до чудовищных размеров. По мере завершения этого процесса инфляции космос приобретает присущие ему свойства плоскостности и однородности, которые мы наблюдаем сегодня.

## Проблемы горизонта и плоскостности

Одно важное свойство нашей Вселенной состоит в том, что она выглядит одинаковой во всех направлениях. В частности, температура космического фонового излучения почти одинакова в различных направлениях на небе. Это излучение было испущено различными областями Вселенной, которые, должно быть, общались друг с другом, раз уж их температура одинакова. Причем это сообщение должно было происходить до того, как Вселенной исполнилось 300 000 лет, когда в последний раз взаимодействовало это излучение. В отсутствие инфляции такие области не могут сообщаться друг с другом, и во Вселенной возникает *проблема горизонта*. Инфляционная Вселенная, как мы увидим, изящно обходит эту проблему.

По мере расширения Вселенной одновременно происходят две вещи. Во-первых, расширяется сама Вселенная, что попросту означает, что пространство-время Вселенной увеличивается. Во-вторых, Вселенная становится старше, так что у световых сигналов появляется больше времени на распространение, вследствие чего в *причинную связь* могут вступить более обширные области Вселенной. Если какое-то событие, происходящее в некотором месте в определенный момент времени, может повлиять на отличную от него точку в пространстве и времени, то говорят, что эти два события находятся в причинной связности. Например, вы можете повлиять на события, которые произойдут через минуту в комнате, где вы читаете эту книгу: быть может, вы разведете костер и спалите эту комнату. Однако что бы вы ни сделали, это никак повлияет на то, что в следующую минуту произойдет на Марсе. Марс расположен на расстоянии, превышающем одну световую минуту, а ни один сигнал, несущий информацию, не может передвигаться быстрее скорости света.

В фазу, отличную от инфляции, Вселенная расширяется со скоростью, «не превышающей скорость света». С другой стороны, в силу того что действительный размер Вселенной определяется расстоянием, которое могут преодолеть световые сигналы, та часть Вселенной, которая может вступить в причинную связь, растет со скоростью света. Принимая во внимание совокупность этих результатов, можно сделать вывод, что Вселенная, содержащаяся в пределах горизонта причинной связности, со временем увеличивается. Другими словами, с течением времени к так называемой видимой Вселенной непрерывно добавляется новый материал. Временная шкала, по которой Вселенная таким образом изменяется, сейчас насчитывает миллиарды лет, что можно приблизительно сравнить с настоящим возрастом Вселенной. В итоге, несмотря на непре-

кращающийся рост Вселенной, такие изменения невозможно заметить за время жизни, отпущенное человеку.

Теперь мы можем сформулировать проблему горизонта более точно. Наблюдая космическое фоновое излучение, мы, в действительности, смотрим в прошлое в то время, когда Вселенной было около 300 000 лет. Это была последняя эпоха, когда фоновое излучение могло взаимодействовать с веществом, и наблюдаемые нами сегодня фотоны фонового излучения свободно распространяются с тех самых пор. Таким образом, когда было испущено фоновое излучение, диаметр ограничиваемой скоростью света сферы, устанавливающей границу причинной связности, составлял всего 300 000 световых лет. Поскольку Вселенная с того времени расширилась, в настоящую эпоху эти области достигли размера порядка трехсот миллионов световых лет. Однако, когда мы наблюдаем космическое фоновое излучение, глядя в небо в противоположных направлениях, мы изучаем выборочные области, разделенные размером всей видимой сегодня Вселенной — расстояниями, превышающими двадцать миллиардов световых лет. Эта величина много больше размера областей, которые могли вступать в причинную связь, и все же наблюдаемые температуры космического фонового излучения практически *одинаковы*: они отличаются лишь на сто тысячные доли. Из априорных соображений, не существует какой бы то ни было причины того, почему температуры областей, никоим образом не связанных друг с другом, должны быть настолько одинаковы. Эта дилемма и составляет проблему горизонта.

Инфляция естественным образом разрешает эту проблему горизонта. Вообразите крошечную область Вселенной, которая находится в причинной связи с самой собой в момент, предшествующий началу инфляционного периода расширения. По определению, размер такой области должен быть меньше произведения скорости света и возраста Вселенной на тот момент. Теперь представим, что эта маленькая область увеличивает свой размер в безумно большое число раз. Если коэффициент роста достаточно велик, то вся видимая сегодня Вселенная может содержаться в пределах той причинно связанной области, с которой мы начали. При этом коэффициент роста должен равняться  $10^{28}$  — тот же магический коэффициент, который мы встречали и раньше. Во Вселенной, переживающей инфляцию, размеры областей, которые уже вступали в причинную связь, областей с возможностью наличия одинаковых характеристик, гораздо больше, нежели размеры тех же областей во Вселенной, где инфляция отсутствует (см. рисунок 1).

Другая проблема, встающая перед космологией, в которой отсутствует инфляция, носит название *проблемы плоскостности*. В этом

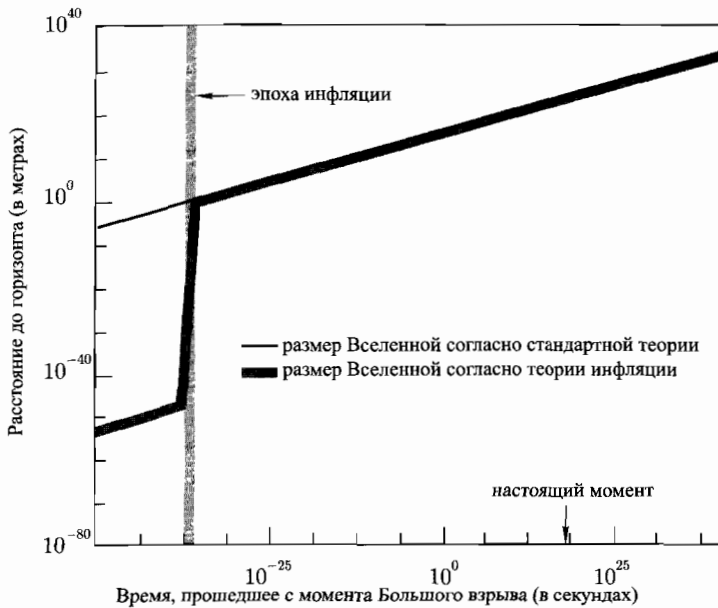


Рис. 1. На этом рисунке показан размер Вселенной в соответствии как со стандартной теорией Большого взрыва, так и с ее усовершенствованным вариантом, включающим инфляционную фазу расширения. Инфляционная модель помогает решить проблему горизонта, поскольку разрешает гораздо меньший размер Вселенной в отдаленном прошлом. Эта маленькая Вселенная в некоторый ранний момент истории могла находиться в причинной связи с самой собой и тем самым обеспечить крайнюю однородность, которую мы наблюдаем в нашей Вселенной сегодня

случае проблема состоит в следующем: мы видим, что пространственная геометрия пространства очень плоская, а это означает, что плотность Вселенной довольно близко к некоторому критическому значению. Плоская Вселенная имеет именно эту критическую плотность, и ей суждено расширяться вечно, но с постоянно уменьшающейся скоростью. Чтобы современная Вселенная обладала этим свойством, начальные условия расширения Вселенной должны были быть очень особенными, а следовательно, крайне маловероятно, чтобы они имели место быть.

Расширяющаяся Вселенная может быть открытой, замкнутой или плоской, причем плоская Вселенная представляет собой промежуточ-

ный случай, когда Вселенная расширяется вечно, но крайне медленно. Когда мы выполняем измерения, чтобы определить количество вещества во Вселенной, мы находим, что наша Вселенная близка к плоской. Плотность Вселенной имеет критическое значение — значение плотности, которое должна иметь Вселенная, чтобы быть плоской, — с точностью до множителя два–три. Точнее, отношение  $\Omega_0$  общей плотности энергии Вселенной к ее критическому значению, судя по всему, лежит в диапазоне  $0,3 < \Omega_0 < 2$ , который включает и случай плоской Вселенной  $\Omega_0 = 1$ .

Так в чем же здесь проблема? Сложность возникает из-за того, что отношение  $\Omega$ , которое представляет собой меру того, насколько Вселенная далека от критического плоского случая, со временем изменяется. Если плотность Вселенной не достигает критического значения (что означает, что  $\Omega < 1$ ) в данный момент космологического времени, то расширение Вселенной побеждает в битве с гравитацией. С течением времени быстрое расширение делает Вселенную еще менее плотной, приводя к тому, что значение  $\Omega$  становится еще меньше. Таким образом, если в некоторый данный момент времени значение плотности Вселенной ниже критического, через относительно короткое время значение  $\Omega$  становится чрезвычайно малым, намного меньше критического значения, равного единице. Чтобы в настоящее время значение  $\Omega$  находилось где-то вблизи единицы, в прошлом Вселенная должна иметь значение  $\Omega$  чрезвычайно близкое к критическому единичному значению, но чуть-чуть его не достигающее. Если вернуться в самое начало, когда закладывались начальные условия для Вселенной, когда истекло менее  $10^{-43}$  секунд, значение  $\Omega$  должно было быть пугающе близким к единице, с невероятной точностью порядка одной из  $10^{60}$ . Сложно понять, почему во Вселенной должно было возникнуть такое невероятно точное значение плотности энергии, которое необходимо, чтобы сегодня  $\Omega$  имела значение, близкое к единице. Точно так же, если Вселенная будет иметь плотность, чуть превышающую критическое значение, гравитация выиграет сражение с расширением и отношение  $\Omega$  быстро и намного превысит единицу.

Однако космологическая проблема плоскостности также смягчается в том случае, если колоссальное инфляционное расширение Вселенной действительно имело место. Чтобы проиллюстрировать решение проблемы плоскостности, надуйте шарик и рассмотрим его поверхность в качестве двумерной модели Вселенной. Поверхность шарика искривлена, и эта кривизна представляет собой кривизну пространства-времени. Если мы надеемся шар до некоторого невероятно раздутого состояния, так что его радиус будет, скажем, в  $10^{28}$  раз больше, то поверхность это-

го шара будет казаться куда более плоской. Если в начале мы возьмем обычный шарик, радиусом около десяти сантиметров, то конечный размер раздутого шара будет превышать размер всей видимой в настоящее время Вселенной. Точно так же, как поверхность шарика становится более плоской под действием колоссального расширения, так и кривизна пространства-времени выравнивается, когда Вселенная раздувается в огромное число раз (см. рисунок 2).

## Расширяющаяся Вселенная

В 1920-е годы Эдвин Хаббл с помощью студийного телескопа в Маунт-Вилсоновской обсерватории показал, что Вселенная расширяется. Это было эпохальное открытие. До прорыва Хаббла, который, фактически, являл собой продолжение чуть более ранней работы Весто Сливера, ученые, в большинстве своем, считали Вселенную статической и неизменной. Осознание того, что мы живем в расширяющейся Вселенной, значительно преобразовало наш взгляд на космос.

Хаббл заметил, что от нашей Галактики — Млечного Пути — удаляются все галактики, кроме самых близких. Кроме того, Хаббл показал, что чем дальше находится галактика, тем быстрее она от нас удаляется. Сейчас это отношение между расстоянием и скоростью называется *законом Хаббла* и является естественным следствием расширяющейся Вселенной, рассматриваемой изнутри.

Чтобы проиллюстрировать расширение по закону Хаббла, можно рассмотреть простую модель Вселенной. Представьте большой кекс с изюмом: пусть в этой модели изюминки будут галактиками. По мере расширения кекса, в процессе выпекания, каждая изюминка в кексе удаляется от всех остальных изюминок. Однако у Вселенной вообще нет краев; по крайней мере, нам таковые не известны. В результате Вселенную можно представить в виде гигантского кекса с изюмом, причем наша изюминка — Млечный Путь — находится на очень большом расстоянии от какого бы то ни было края.

Расширение и эволюцию Вселенной описывает общая теория относительности Эйнштейна, вводящая в фундаментальное описание пространства-времени гравитацию. Когда для описания Вселенной в целом используется общая теория относительности, расширение космоса становится естественным ее следствием. Когда Эйнштейн осознал, что его теория предполагает расширяющуюся Вселенную, сначала он решил, что это предсказание неверно. Астрономы еще не наблюдали хаббловское расширение, и почти все тогда придерживались допотопных представлений о статической и неизменяющейся Вселенной. Эйнштейн зашел

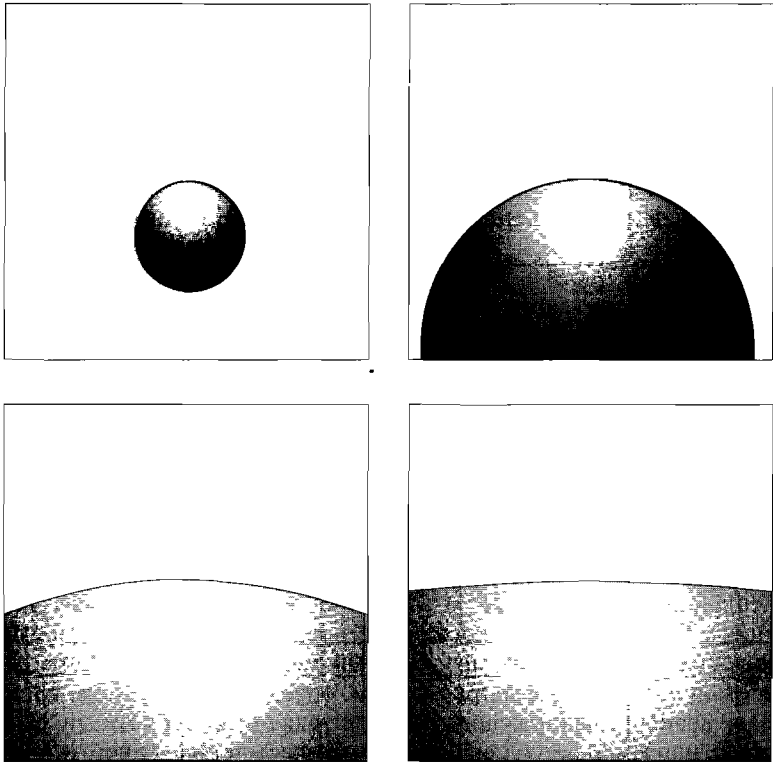


Рис. 2. На этих четырех рисунках изображена поверхность сферы, причем ее кривизна представляет кривизну пространства-времени Вселенной. Радиус сферы возрастает в три раза на каждом последующем снимке. На первом рисунке изображена маленькая сферическая поверхность, кривизна которой хорошо заметна, тогда как поверхность на четвертом, и последнем, снимке трудно отличить от плоскости. Расширение Вселенной во время инфляции разглаживает Вселенную аналогичным образом, а значит, разрешает проблему плоскости. Однако во время инфляции Вселенная увеличивается более чем в  $10^{28}$  раз, что не идет ни в какое сравнение с ничтожным 27-кратным увеличением, изображенным здесь

настолько далеко, что без надобности усложнил свою теорию, допустив статическую (нерасширяющуюся) Вселенную. Однако после открытия

расширения космологи быстро поняли, что оригинальные, неизменные уравнения Эйнштейна служат наилучшим описанием нашей непрерывно растущей Вселенной.

Вселенная подчиняется базовой доктрине, называемой *космологическим принципом*. Это основной постулат, который систематизирует и упрощает возможное поведение космоса. Этот принцип утверждает, что Вселенная в целом одновременно *однородна и изотропна*. Однородной называется Вселенная, одинаковая во всех точках пространства; другими словами, Вселенная не имеет однозначно предпочтительных мест (см. правую часть рис. 3). Аналогично, изотропной называется Вселенная, которая выглядит одинаковой во всех направлениях; другими словами, Вселенная не выглядит другой, в каком бы направлении вы ни посмотрели из нашей Галактики (см. левую часть рис. 3). Космологический принцип — это естественное обобщение точки зрения Коперника. Коперник показал, что Земля, а следовательно и человечество, не имеет особого места в нашей Солнечной системе. В силу того что Вселенная однородна и изотропна, наша Галактика не занимает особого положения. В частности, мы живем совсем не в центре Вселенной.

Наша расширяющаяся Вселенная не бесконечно стара; напротив, ее возраст определен. Если в качестве отправной точки взять расширение Вселенной, видимой сегодня, и затем «обратить ход часов» для экстраполяции этого движения в прошлое, все вещество Вселенной достигает бесконечной плотности в определенный момент прошлого. Эта сингулярность и является Большим взрывом, определяющим начало времени. Отрезок времени, начинающийся в этой точке и заканчивающийся в настоящую эпоху, является современным возрастом Вселенной — порядка десяти миллиардов лет.

## **Возможные судьбы расширяющейся Вселенной**

Расширяющаяся Вселенная имеет, по крайней мере, три возможные долгосрочные перспективы. Во-первых, если расширение, не ослабевая, продолжается вечно, то говорят, что Вселенная *открыта*. В противном случае, если Вселенной суждено, в конце концов, прекратить расширение и пережить повторное сжатие, то говорят, что она *замкнута*. *Плоская* Вселенная находится на границе между открытой и замкнутой. В плоской Вселенной расширение продолжается вечно, но его скорость постоянно уменьшается. Когда возраст Вселенной становится бесконечным, расширение постепенно замедляется, пока, наконец, не останавливается полностью.



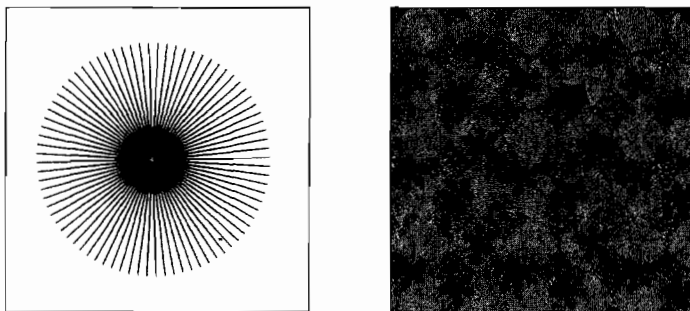


Рис. 3. Поскольку все четкие точки на этом объекте исходят из центральной точки, эта система (слева) *изотропна*, но не *однородна*. Центральная точка занимает особое место в системе. Однако в скоплении четких точек невозможно выделить предпочтительного направления или расположения. В силу того что ни один из нарисованных листочков не имеет особого местоположения, компоновка (справа) *однородна*. Однако у данного узора есть два предпочтительных направления, по которым стремятся расположиться листья и которые отражают основную геометрию данной компоновки. В присутствии этих предпочтительных направлений данная модель не может считаться *изотропной*

Долгосрочная судьба Вселенной в большой степени зависит от того, является она открытой, замкнутой или плоской. Это, в свою очередь, определяется плотностью энергии Вселенной. Наилучшие из имеющихся астрономических наблюдений свидетельствуют о том, что плотность энергии нашей Вселенной недостаточна, чтобы она была замкнутой, а потому космос будет расширяться вечно. Если мы на самом деле обитаем в открытой или плоской Вселенной, то она проживет достаточно долго, чтобы развернулся поразительный ряд эффектных событий. В замкнутой Вселенной число возможностей, напротив, значительно ограничено.

На данном этапе три различных типа вселенных можно представить с помощью простой аналогии. Вообразите, что мы запускаем ракету с поверхности некоторой планеты. Ракета взмывает вверх с высокой начальной скоростью, после чего двигатель отключается. Что происходит? Ответ зависит от того, насколько быстро движется ракета, или, если посмотреть на эту проблему с другой стороны, от суммарной массы этой планеты и ракеты. Если ракета движется слишком медленно или масса планеты слишком велика, то ракета не сможет преодолеть гравитационное притяжение планеты и упадет на ее поверхность. Ракету и планету можно рассмотреть как *закрытую* физическую систему, в которой ра-

кета и планета возвращаются друг к другу или переживают повторное сжатие. Такое же стечение обстоятельств возникает, когда мы бросаем бейсбольный мяч, который вновь падает на Землю. С другой стороны, если наша ракета движется с достаточной скоростью, она может преодолеть гравитационное притяжение планеты и продолжать двигаться вечно. Эта ситуация соответствует *открытой* физической системе типа открытой Вселенной, которая расширяется беспрестанно.

Как у Вселенной, так и у нашей простой системы, состоящей из планеты и ракеты, имеется важный промежуточный случай, который мы называем *плоским*. Ракету можно запустить с такой скоростью, которая придаст ей ровно столько энергии, сколько требуется, чтобы оторваться от планеты. По мере дальнейшего движения ракета продолжает замедляться, пока, в конце концов, не остановится совсем, достигнув некоторой точки в пространстве, бесконечно удаленной от рассматриваемой планеты. Безусловно, чтобы достигнуть этой точки, ракете понадобится бесконечное количество времени. Плоская Вселенная ведет себе качественно подобным образом. Все галактики разбегаются друг от друга, но с течением времени скорость их разбегания уменьшается. По мере того как Вселенная становится бесконечно старой, галактики приближаются к статическому состоянию — *полной остановке*.

Несмотря на то, что данная модель удобна для сравнения открытой, плоской и замкнутой вселенных, одно важное отличие все же остается. Ракета и планета движутся в космическом пространстве так, как мы обычно представляем себе движение. Однако во Вселенной расширяется само пространство, галактики же, на самом деле, покоятся, если принимать во внимание местный масштаб. Ракета и планета образуют *классическую* систему, тогда как расширяющаяся Вселенная служит примером *релятивистского пространства-времени*.

## **Космическое фоновое излучение**

Вся Вселенная заполнена морем фонового излучения. Если Вселенная расширяется, значит, раньше она должна была быть меньше, плотнее и горячее. При крайне высоких температурах частицы и излучение существуют в состоянии, напоминающем равновесное. В эти горячие плотные ранние фазы присутствовало большое количество излучения. По мере расширения и остывания Вселенной волны этого излучения растягиваются, его энергия уменьшается, и, в конечном итоге, оно вообще перестает взаимодействовать с веществом. Некоторая часть этого излучения сохраняется и сегодня свободно струится через пространство в виде микроволн. Несмотря на то, что это фоновое излучение уже не

играет важной роли, его по-прежнему можно обнаружить. Оно служит несомненным признаком крайне высоких температур отдаленного прошлого.

Это микроволновое фоновое излучение было открыто в 1965 году Арно Пензиасом и Робертом Вильсоном, работавшими в лабораториях корпорации «Белл». Пензиас и Вильсон самым тщательным образом исследовали фоновые источники статического — а другими словами, белого — шума и не ожидали, что небо окажется заполненным низкоэнергетическими микроволнами. Это открытие, сделанное по счастливой случайности, принесло ученым Нобелевскую премию по физике.

Откуда нам известно, что этот слабый микроволновый фон на самом деле является «ископаемым» свидетельством Большого взрыва? Ведь излучение возникает и в ходе множества других физических процессов. Многих людей беспокоит излучение, испускаемое атомными электростанциями. Теле- и радиостанции непрерывно извергают в пространство низкоэнергетическое излучение. А в более крупном масштабе огромными объемами излучения Галактику ежеминутно «накачивают» звезды.

В ранний период космической истории Вселенная была плотной и горячей. В этих условиях, которые значительно отличаются от редких и холодных межгалактических пустот современности, поле излучения, пронизывающее все пространство, достигало состояния термодинамического равновесия. Когда же достигается состояние равновесия, спектр излучения, т. е. количество энергии, излученное при конкретной длине волны, приближается к определенному виду, который носит название *спектра абсолютно черного тела*. Точно такое же спектральное распределение длин волн испускает любой абсолютно черный объект (т. е. непрозрачный и неотражающий) в состоянии теплового равновесия при определенной температуре. Каждый спектр излучения черного тела соответствует какой-то конкретной температуре. Например, спектр, очень близкий к спектру черного тела, испускает со своей поверхности, имеющей температуру, равную 5800 градусов Кельвина, Солнце. Фоновое излучение Вселенной тоже имеет определенную температуру. По мере того как Вселенная расширяется и остывает, эта характеристическая температура уменьшается, но распределение излучения сохраняет свой особый вид — спектр абсолютно черного тела.

Космическое фоновое излучение, согласно современным измерениям, имеет температуру, равную 2,73 градусам Кельвина. Более того, спектр этого излучения совпадает со спектром абсолютно черного тела почти полностью — с точностью до одной десятичной. Наиболее точные измерения этого спектра произвел в 1980-х годах спутник COBE

(COsmic Background Explorer<sup>2</sup>) (см. рисунок 4). Этот результат служит весьма впечатляющим свидетельством в пользу теории Большого взрыва.

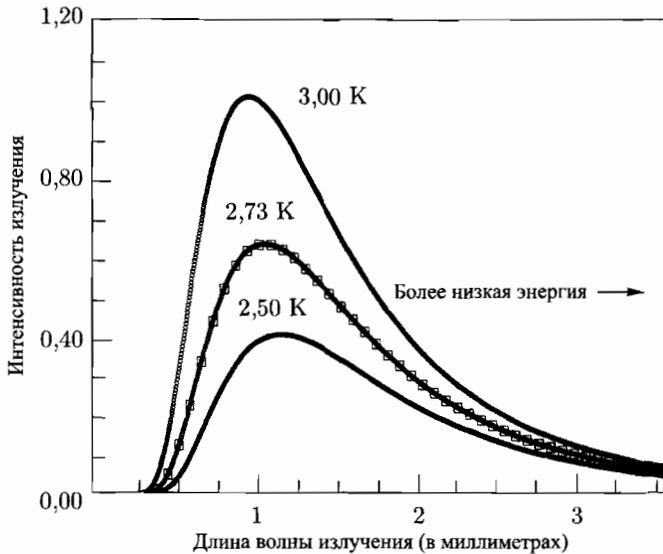


Рис. 4. Спутник COBE измерил спектр космического фонового излучения; каждый квадратик на данном рисунке соответствует отдельному измерению. Три приведенные кривые показывают зависимость интенсивности излучения черного тела от длины волны для трех различных температур. Обратите внимание, насколько близко измерения, выполненные COBE, совпадают с кривой, изображающей излучение абсолютно черного тела при 2,73 градусах. Теория Большого взрыва предсказывает именно такой вид этой кривой

Другое свойство наблюдаемого фонового излучения запечатлелось в пламенном прошлом ранней Вселенной. Космическое фоновое излучение выглядит одинаково во всех направлениях. Почти. Как описывалось выше, поле излучения имеет вид спектра черного тела и может быть охарактеризовано одним значением температуры. Причем эта температура во всех частях неба почти одинакова, с чрезвычайно высокой степенью

<sup>2</sup>Исследователь космического фона (англ). — Прим перев

точности. Этот результат согласуется с космологическим принципом, который гласит, что Вселенная однородна и изотропна.

И все же крошечные колебания температуры космического фонового излучения были зарегистрированы. Амплитуды этих колебаний составляют всего порядка тридцати долей на миллион, и впервые спутник COBE зарегистрировал их в 1992 году. Эти крошечные колебания имеют огромные последствия. Фоновое излучение в последний раз взаимодействовало с веществом, когда Вселенной было 300 000 лет. Этот четко определенный поворотный момент, именуемый *рекомбинацией*, соответствует времени, когда температура Вселенной снизилась настолько, что электроны и ядра смогли объединиться в атомы. (С позиций логики, следовало бы говорить не о «рекомбинации», а о «первой комбинации» (первом объединении), потому что до этого момента электроны и ядра существовали только по отдельности.) До рекомбинации излучение и вещество во Вселенной сильно взаимодействовали друг с другом и были тесно связаны. Однако после появления атомов Вселенная внезапно стала прозрачной для фонового излучения. Колебания, наблюдаемые в температуре современного космического фона, являются отпечатком возмущений плотности вещества, которые имели место, когда излучение и вещество в последний раз вступили в контакт. Поскольку возмущения плотности вещества в конечном итоге разрослись в галактики и их скопления, колебания в микроволновом фоне характеризуют начальные условия образования галактик и крупномасштабных структур.

## Кварки и антикварки

В первую микросекунду истории космоса материальное содержимое Вселенной существовало в виде кварков и их антиматериальных двойников, называемых антикварками. Эти, в некотором роде, таинственные частицы образуют более знакомые нам протоны и нейтроны, составляющие большую часть вещества, известного нам сегодня. Однако при высоких температурах вещество предпочитает существовать в виде свободных кварков, а не таких больших частиц, как протоны. Несмотря на то, что большинству первичных кварков суждено аннигилировать, некоторая их доля выживает, чтобы в конечном итоге образовать вещество современной Вселенной. Но задолго до появления протонов и нейтронов произошли микроскопические события огромной важности, которые сформировали будущее материальное содержание Вселенной.

Сегодня наша Вселенная состоит, в основном, из вещества, а не из антивещества. Если вещество и антивещество поместить достаточно близко друг к другу, произойдет их взаимная аннигиляция, после

которой останется сильная вспышка излучения. В ходе этого процесса, в сущности, вся масса преобразуется в энергию. Однако существуя на своей планете, мы никогда не наблюдаем такую аннигиляцию. Почему? Потому что Земля почти полностью состоит из одного только вещества, а антивещества в ней нет. То, что миссии NASA к Луне, а потом к Марсу, не завершились эффектными вспышками излучения, совершенно определенно указывает на то, что наша Солнечная система также состоит из вещества и практически не содержит антивещества. Наблюдая более крупные масштабы, типа Галактики и даже всей Вселенной, мы также приходим к выводу о присутствии вещества и выраженном отсутствии антивещества. По приблизительным оценкам, наша Вселенная содержит около  $10^{78}$  протонов и нейтронов с относительно незначительной примесью антипротонов и других антиматериальных частиц.

Однако, несмотря на эту крайнюю асимметрию, которая наблюдается в нашей Вселенной, законы физики не отдают предпочтение веществу перед антивеществом. Согласно этим базовым законам, которые бесчисленное число раз проверялись в ходе лабораторных экспериментов, изначально вещество и антивещество находятся в равном положении. И все же во Вселенной существует дисбаланс. Ясно, что готовится что-то любопытное.

Частицы, состоящие из обычного вещества, типа протонов и нейтронов, называются *барионами*. Частицы антивещества именуется *антибарионами*. Так что наша Вселенная выражает суммарное *барионное число*, определяемое как разность общего числа барионов и общего числа антибарионов. Чтобы космос достиг такого конечного результата, законы физики должны разрешать некий физический процесс, в ходе которого барионное число не сохраняется строгим образом. Существование этого процесса (нарушающего закон сохранения барионного числа) имеет глубокие последствия как для образования вещества в ранней Вселенной, так и для долгосрочной судьбы вещества в отдаленном будущем.

Что касается последнего вопроса, неспособность законов физики обеспечить строгое сохранение барионного числа говорит о том, что протоны, нейтроны и все обычное вещество обречены. Если прождать достаточно долго, относительно слабый процесс, который нарушает закон сохранения барионного числа, в конце концов, *непрерывно* запустит механизм распада и разрушения всего обычного вещества. Однако из-за относительной неэффективности данного процесса эту часть истории можно отложить на довольно долгое время, возможно, триллион триллионов лет.

В самые первые мгновения истории космоса, задолго до того как

Вселенной исполнилась одна микросекунда, начали происходить физические процессы, в которых не сохраняется барионное число. При высоких температурах этой эпохи данные процессы, нарушающие закон сохранения барионного числа, гораздо более эффективны, чем при низких температурах современной Вселенной. Последующие микроскопические реакции производят в некоторых областях Вселенной суммарный избыток кварков и, возможно, избыток антикварков в других вселенных. По мере расширения и охлаждения нашей Вселенной эти реакции прекращаются и родственные популяции кварков и антикварков становятся неизменными. Космос успешно достигает состояния *бариогенеза* — производства суммарного избытка вещества над антивеществом.

Предлагалось несколько различных моделей этого процесса, но они все еще находятся в процессе изучения. Несмотря на то, что это рассуждение несколько туманно, мы все же понимаем процесс бариогенеза хотя бы в общих чертах. Чтобы удержать механизм производства частиц от перехода на противоположное направление, в результате которого будут уничтожены избыточные кварки, эти реакции должны проходить в неравновесном состоянии, чтобы некоторые вновь образовавшиеся лишние кварки могли остаться нетронутыми. Расширение Вселенной облегчает неравновесный характер протекания реакций, обеспечивая постоянно изменяющееся фоновое состояние. Необходимо также и еще одно условие. Микроскопические реакции, образующие общее барионное число, в отличие от большинства процессов, действующих элементарные частицы, не должны быть точно *обратимы во времени*. Эти реакции должны уметь чувствовать направление времени (или следовать ему), которое определяется расширяющейся Вселенной. Таким образом, чтобы образовался чистый избыток вещества, во Вселенной должны существовать реакции, нарушающие закон сохранения барионного числа, происходящие в неравновесном состоянии и необратимые во времени.

Избыточное число барионов, образовавшееся таким образом, до смешного мало. На каждые тридцать миллионов существовавших антикварков во Вселенной содержалось тридцать миллионов и *один* кварк обычного вещества. Именно этот феноменально малый избыток — одна частица на тридцать миллионов — жизненно важен. По мере расширения и охлаждения Вселенной кварки и антикварки аннигилируют друг с другом. И только лишние кварки — те, которым не удастся найти антиматериальную пару для аннигиляции, — остаются, чтобы в конечном итоге заполнить нашу Вселенную веществом.

Когда Вселенная, наконец, становится достаточно прохладной, кварки объединяются в сложные частицы, называемые *адронами*; к ним относятся знакомые нам протоны и нейтроны. Этот фазовый переход

происходит, когда Вселенная переживает температуру в один триллион градусов Кельвина и достигает плотности ядерного вещества, в один квадрильон раз превышающей плотность воды. Вот на этом фоне и рождаются протоны с нейтронами. Эти основные кирпичики, синтезированные в первую микросекунду истории, не только дожили до сегодняшнего дня, наступившего около десяти миллиардов лет спустя, но и будут жить еще долго-долго. Эти частицы проживут, как минимум, в десять миллиардов триллионов ( $10^{22}$ ) раз дольше современного возраста Вселенной, а возможно, даже еще дольше.

### ***Темнота ночного неба***

Конечный возраст, которым наделила Вселенную современная космология, разрешает одну классическую проблему: «Почему ночью небо темное?». Первым важность этого вопроса осознал, наверное, Иоганн Кеплер в 1600-е годы, хотя широкую известность эта проблема получила только в девятнадцатом веке, благодаря работе Г. В. Ольберса. В 1823 году Ольберс, немецкий астроном, представил труд, в котором впервые описал эту проблему, впоследствии получившую название *парадокса Ольберса*.

На первый взгляд, ответ кажется очевидным: ну, конечно, ночное небо темное! Как-никак Солнце не освещает небо по ночам. Однако если поразмыслить чуть дольше, понимаешь, что все не так просто. Рассмотрим портрет Вселенной девятнадцатого века: статическая, бесконечная Вселенная, демонстрирующая обычное трехмерное пространство евклидовой геометрии. А теперь представьте, что вы смотрите на ночное небо. Следуя по линии зрения в *любом* направлении, рано или поздно, вы должны наткнуться на поверхность звезды. Но звезды ярко светят. Значит, ночное небо должно светиться от лучистой энергии, испускаемой поверхностью звезд, ярких, как Солнце.

Можно подойти к этому вопросу и с другой стороны. В этой устаревшей модели Вселенной небо изобилует бесконечным количеством звезд. Чем дальше звезды находятся от Земли, тем более тусклыми они нам кажутся. Их излучение ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния ( $r^2$ ) между звездой и наблюдателем. Однако объем Вселенной, а следовательно, и общее количество звезд возрастает пропорционально кубу этого расстояния ( $r^3$ ). Даже несмотря на то, что с увеличением расстояния излучение звезд ослабевает, этот эффект компенсируется увеличением общего числа звезд. Если эта модель правильна, то ночное небо должно быть очень ярким.

Теперь мы знаем, что эта старомодная парадигма, описывающая бес-



конечную статическую Вселенную, попросту говоря, ошибочна. Вселенная, на самом деле, имеет конечный возраст и совсем не евклидову геометрию пространства-времени. Поскольку пока что прошло всего десять миллиардов лет, мы можем наблюдать только те звезды, которые находятся на большем, но все же строго конечном расстоянии в десять миллиардов световых лет. Видимая Вселенная содержит большое, но конечное число звезд: около одной тысячи миллиардов миллиардов ( $10^{21}$ ). Эти звезды вносят свой вклад в видимую яркость ночного неба, которое светится очень слабо. И все же ночное небо значительно темнее, чем поверхность звезды.

На темноту ночного неба влияет и расширение Вселенной. В силу того что пространство-время расширяется, удаленные звезды вносят меньший вклад в яркость неба, чем это предполагалось согласно предшествующему аргументу Евклида. Далекие звезды в удаленных галактиках уносятся от нас со скоростями, близкими к скорости света. Их свет, проходящий из самых отдаленных уголков видимой Вселенной, невероятно растягивается, вследствие чего снижается его интенсивность.

Темнота ночного неба имеет глубочайшие следствия для развития и продолжительного существования жизни. Если бы Вселенная не имела конечного возраста и не расширялась, то ночное небо действительно сверкало бы как поверхность звезды. В таких условиях звездная эволюция претерпела бы радикальные изменения, а возникновение и развитие жизни на планетах было бы практически невозможно. Если бы нашу Солнечную систему переместили в такую гипотетическую яркую Вселенную, то Солнце и планеты внезапно оказались бы погруженными в тепловую ванну излучения, столь же горячую, сколь и поверхность звезды. Так как, в силу второго закона термодинамики, тепло должно распространяться из горячих областей в холодные, Солнце стало бы нагреваться, чтобы распространить свою энергию в пространство. Сами планеты прогрелись бы до температур звезд, а это тысячи градусов Кельвина, и постепенно были бы стерты мощным и безжалостным потоком фонового света.

Наблюдаемая темнота ночного неба служит веским доказательством конечного возраста Вселенной. Это осознание воистину замечательно. И почти настолько же замечательно то, что этот важный ключ проглядели ученые, до двадцатого века занимавшиеся парадоксом Ольберса. Идея о статической и неизменной Вселенной прочно укоренилась в культуре. Простое и правильное решение этого парадокса оставалось непризнанным, пока Хаббл не открыл, что Вселенная расширяется, а Эйнштейн не создал теорию, которая допускала, и даже предсказывала, расширяющееся пространство-время.

## Нуклеосинтез

Следующим важным достижением зарождающейся Вселенной было образование маленьких сложных ядер типа гелия, дейтерия и лития. Ядра этих легких элементов образовались в реакциях ядерного синтеза, произошедших в первые несколько минут времени. Более крупные ядра, включая углерод и кислород, дающие основу для жизни, образовались гораздо позднее в горячих недрах звезд (о чем рассказывается в следующих главах). Образование тяжелых элементов из более легких, называемое *нуклеосинтезом*, значительно изменяет материальное содержание Вселенной.

Энергия — это основная концепция, управляющая нуклеосинтезом — процессом ядерного синтеза. До этого момента более крупные ядра имеют меньшую массу-энергию покоя на частицу, чем составляющие их частицы по отдельности. Например, масса-энергия покоя ядра гелия, состоящего из двух протонов и двух нейтронов, меньше, чем суммарная масса-энергия покоя этих четырех частиц, существующих по отдельности. Этот дефицит массы-энергии ядра гелия должен иметь какое-то объяснение. В процессе реакции ядерного синтеза, в результате которой образуется ядро гелия, недостающая масса превращается в энергию и высвобождается в соответствии со знаменитой формулой Эйнштейна  $E = mc^2$ . Механизм ядерного синтеза лежит в основе водородных бомб, образования энергии в недрах Солнца и нуклеосинтеза в ранней Вселенной.

Протоны и нейтроны, образующие ядро атома, удерживает вместе сильное взаимодействие, которое притягивает составляющие ядро частицы, но действует лишь на очень коротких расстояниях. На больших расстояниях сильнее оказывается электромагнитная сила, поскольку она действует в более широком диапазоне. Например, при взаимодействии протона с дейтроном (простое ядро, содержащее один протон и один нейтрон), электромагнитная сила является силой отталкивания и действует как преграда для ядерного синтеза, отталкивая взаимодействующие частицы друг от друга. Для успешного слияния протона и дейтрона они должны оказаться достаточно близко друг от друга, так чтобы сильное взаимодействие подавило электромагнитную силу. При достаточно высоких температурах эти частицы обладают достаточной кинетической энергией, чтобы добиться необходимой близости. Однако температура не должна быть слишком высокой; в противном случае только что синтезированные ядра разлетятся сразу же после возникновения. Необходимость соблюдать этот компромисс задает диапазон температур, при которых могут происходить реакции ядерного синтеза.

Относительно рано в истории космоса, примерно через секунду после Большого взрыва, фоновая температура Вселенной упала до десяти миллиардов градусов Кельвина. С плотностью, в двести раз превышающей плотность воды, Вселенная оказалась достаточно прохладной, чтобы протоны и нейтроны начали сливаться, образуя атомные ядра легких элементов. Тогда было синтезировано огромное количество гелия с меньшими примесями дейтерия и лития. Ядерная деятельность продолжалась в течение достаточно короткого промежутка времени: около трех минут. В этот момент температура непрерывно расширяющейся Вселенной упала до одного миллиарда градусов Кельвина, а плотность стала превышать плотность воды всего в двадцать раз. Тогда ядерные реакции резко прекратились, и завершилась фаза нуклеосинтеза.

Несмотря на то, что в результате нуклеосинтеза образовалась большая часть существующего сегодня гелия, синтез элементов не завершился полностью в это трехминутное окно. Большая часть Вселенной, около семидесяти пяти процентов ее массы, осталась «необработанной», в виде отдельных протонов (водорода). Скорость протекания ядерных реакций определяется температурой и плотностью Вселенной. По мере расширения и охлаждения Вселенной скорости протекания ядерных реакций быстро уменьшаются, и, в конечном итоге, эти реакции прекращаются вовсе. Почти не существует ядерных реакций, которые происходили бы при низких температурах, — обратите внимание на явное отсутствие ядерного синтеза при комнатной температуре. Таким образом, первичный нуклеосинтез был чем-то вроде космических гонок. Стартовый пистолет выстрелил, когда Вселенной исполнилось около секунды и температура сначала снизилась настолько, что позволила существование ядер. Начался процесс нуклеосинтеза и образования химических элементов. Гонки завершились приблизительно через три минуты (немногом меньше, чем потребовалось олимпийскому чемпиону, чтобы пробежать полтора километра), когда расширяющаяся Вселенная остыла настолько, что более не могла поддерживать реакции ядерного синтеза.

Если бы нуклеосинтез в ранней Вселенной продолжался неопределенно долго, все протоны и нейтроны, в конце концов, превратились бы в железо. Но почему в железо, а не в более тяжелые ядра? Хотя энергия высвобождается при слиянии малых ядер для образования больших, ядра, тяжелее ядра железа, могут высвобождать энергию при *расщеплении* на более маленькие дочерние ядра. Таким образом расщепляется уран, который служит источником энергии для атомных электростанций и атомного оружия. Поскольку как в процессе синтеза ядер легких элементов, так и в ходе расщепления ядер тяжелых элементов высвобождается энергия, минимально возможной энергией должны обладать

ядра, имеющие промежуточный размер. Таким, самым энергетически привилегированным ядром, является ядро железа.

Как показано на рисунке 5, теория нуклеосинтеза делает важное предсказание. Количества элементов, образованных ранней Вселенной, зависят от общего количества обычного барионного вещества. Для того чтобы предсказанные количества легких элементов согласовались с реально наблюдаемыми значениями, общее количество барионов (протонов и нейтронов, составляющих ядра) во Вселенной должно находиться в достаточно узком диапазоне. Чтобы предсказания теории нуклеосинтеза не противоречили наблюдаемой действительности, число барионов должно находиться между двумя и восемью процентами общей плотности, необходимой для того, чтобы Вселенная была замкнутой. Если бы общее число барионов во Вселенной превышало восемь процентов от значения плотности замкнутой Вселенной, гелия в ранней Вселенной образовалось бы больше, чем мы видим сегодня. Аналогично, если бы барионов было менее двух процентов, то количество гелия было бы слишком низким. Поразительно, что узкий диапазон значений числа барионов может восстановить правильные количества гелия, дейтерия и лития.

## Темная материя

Достаточно узкий разрешенный диапазон значения общего числа барионов имеет важные следствия для содержимого Вселенной. Барионным является вещество, образованное протонами и нейтронами; это вещество, с которым мы встречаемся постоянно: пылинки, люди, да и сама Земля. Теперь, если, согласно теории нуклеосинтеза, это обычное вещество составляет менее восьми процентов общей массы Вселенной (в случае плоской Вселенной), что составляет остальную массу? Ответ — *темная материя*. Роль этой экзотической субстанции становится все более важной по мере старения нашей Вселенной.

Для оценки общего количества массы во Вселенной используются несколько независимых методов. Рассмотрим сначала массу, содержащуюся в звездах. Звезды представляют собой наиболее очевидный источник массы, причем их относительно легко обнаружить благодаря свету, который они испускают, даже те, которые находятся в отдаленных галактиках. Более того, свойства звезд достаточно хорошо изучены. Однако общая масса звезд во Вселенной, судя по всему, удивительно мала: менее одного процента от плотности замкнутой Вселенной. В све-

---

<sup>3</sup>Под обычным понимается гелий-4, т. к. именно он почти полностью преобладает во Вселенной. — *Прим. перев.*

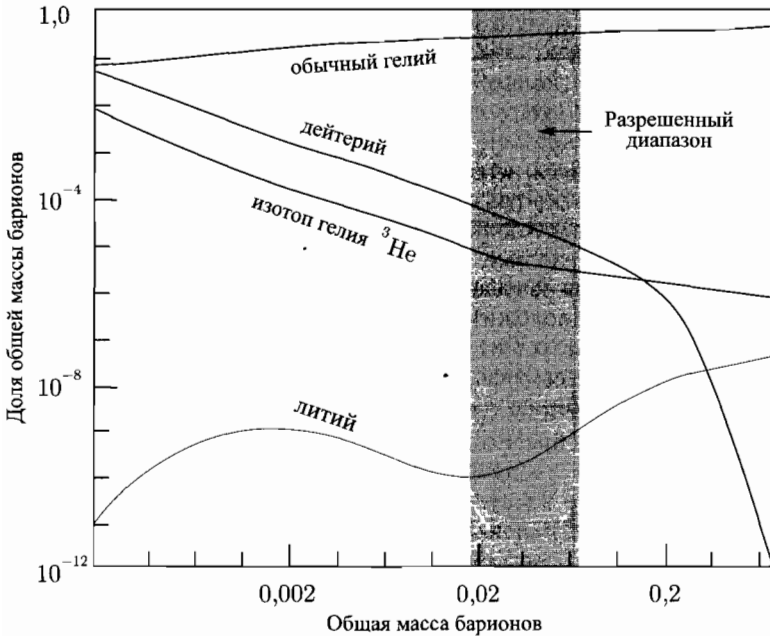


Рис. 5. На данном рисунке различные кривые изображают зависимость предсказанных количеств легких элементов гелия, дейтерия и лития, возникших в процессе нуклеосинтеза в первые несколько минут существования Вселенной, от общей массы обычного барионного вещества. Общая масса барионов записана в виде доли критической плотности, поэтому, чтобы Вселенная была замкнутой, необходимо значение, превышающее единицу. Поскольку разрешенные значения общей массы барионов гораздо меньше общей массы, наблюдаемой в нашей Вселенной, значит, должно присутствовать еще какое-то небарионное вещество<sup>3</sup>

те наблюдений за звездами и теории нуклеосинтеза Вселенная должна содержать в барионах в два–восемь раз больше массы, чем наблюдается в обычных звездах. В результате некоторая доля барионного вещества во Вселенной должна существовать в темных формах, испускающих очень малое количество излучения. Другими словами, во Вселенной должна существовать некая *темная барионная материя*, кроме любой другой темной материи, образованной из более экзотического, небарионного, материала.

Переходя на более крупные масштабы, мы можем оценить, какое количество массы существует в галактиках. Астрономы измеряют ско-

рость, с которой звезды вращаются по орбитам вокруг центров других галактик. С помощью этих измеренных скоростей и законов гравитации мы можем оценить, сколько там содержится вещества. Чем больше измеренная орбитальная скорость, тем больше должна быть масса. Эта процедура расчета предполагает, что большая часть массы, содержащейся в галактиках, находится во внешних гало галактик и что эти гало содержат, вероятно, в сотни раз больше массы, чем сами звезды. Таким образом, общая масса гало галактик объясняет около десяти процентов плотности замкнутой Вселенной. Эта доля массы немного превышает ту, что теория нуклеосинтеза разрешает для барионной формы. В результате мы весьма склонны предположить, что некоторая доля этой массы в галактических гало существует не в виде обычного барионного вещества, а в некоей более экзотической форме.

С помощью астрономических наблюдений ученые также определили количество массы, распределенной в областях размером со скопления галактик. В этом случае мы измеряем, насколько быстро сами галактики вращаются по орбите вокруг центров скоплений. Помимо этого мы можем измерить, как искривляются лучи света, проходящие через эти скопления. Несмотря на некоторую присущую им неопределенность, эти измерения указывают на то, что в скоплениях галактик сосредоточено приблизительно тридцать процентов массы, необходимой для того, чтобы Вселенная была замкнутой. Это гигантское хранилище вещества в 4–15 раз тяжелее, чем общее количество барионного вещества, а следовательно, значительная доля вещества во Вселенной должна находиться в небарионной форме. Общая тенденция такова: чем большие объемы Вселенной мы «взвешиваем», тем сильнее темная материя дает почувствовать свое присутствие.

Но что же тогда *представляет собой* эта темная материя? Несмотря на то, что однозначного ответа мы пока не знаем, у нас есть ряд свидетельств, которые наводят на мысль о том, что частицы темной материи должны подвергаться слабому взаимодействию. Другими словами, эти частицы чувствуют только гравитацию и слабое ядерное взаимодействие. Они не восприимчивы ни к сильному взаимодействию, ни к электромагнитной силе. Это требование, вкуче с фактом сохранения этих частиц до сегодняшнего дня, значительно ограничивает разрешенный диапазон масс для частиц темной материи.

Массы этих частиц распадаются на две разные категории. Первая включает в себя частицы с массами, в 10–100 раз превышающими массу протона. Столь тяжелые частицы движутся относительно медленно, и их обычно называют *холодной темной материей*. Вторая возможная категория содержит более легкие частицы, масса которых примерно

в миллиард раз меньше. Эти легкие частицы, которые при определении их количества обыкновенно имеют релятивистские скорости, называют *горячей темной материей*. В нашей Вселенной могут содержаться оба типа частиц темной материи, но измерить популяции этих частиц пока не получается. Однако есть надежда, что проводящиеся сейчас эксперименты прольют хоть какой-то свет на этот вопрос с темной материей.

В настоящее время слабо взаимодействующие частицы темной материи воздействуют на Вселенную, главным образом, через свое гравитационное притяжение. Благодаря гравитации темная материя способствует образованию галактик и их скоплений и помогает направлять их современное движение. Вследствие того что время, которое требуется темной материи для взаимодействия, превышает настоящий возраст Вселенной, сейчас эти частицы, в основном, инертны. Однако, как мы увидим, по мере дальнейшего старения Вселенной взаимодействия частиц темной материи начинают играть все более важную роль. В какой-то момент времени далекого будущего взаимодействия этих частиц станут основным источником энергии для всей Вселенной.

;

## ГЛАВА 2

# Эпоха звезд

### $6 < \eta < 14$

**Звезды рождаются, эволюционируют, питают Вселенную энергией, полученной из ядерных реакций, а затем умирают, мгновенно и ярко вспыхивая или медленно угасая.**

*11 июля 1991 года, Эль-Пескадеро, штат Нижняя Калифорния, Южная Мексика:*

Частичное солнечное затмение, которое, в конце концов, сменилось полным, продолжалось больше часа. Несмотря на то, что закрывалась все большая часть Солнца, это происходило настолько медленно, что глаза успевали привыкнуть. Уменьшение дневного света стало заметно, лишь когда закрылось более девяноста процентов солнечного диска — за пятнадцать минут до того момента, как наступило полное затмение.

Из-за уменьшившегося количества солнечного света, попадавшего на участок Земли размером с диаметр Луны, то июльское утро было необычайно прохладным для Мексики. К десяти часам утра температура поднялась всего лишь до отметки в семьдесят градусов<sup>1</sup>, а по мере увеличения затемненной поверхности Солнца начала медленно снижаться. Когда дневной свет, наконец, заметно ослаб, воздух казался почти холодным. Поверхность океана выглядела тусклой и унылой, но не имела того синевато-серого отблеска, который появляется в облачный день. Кучевые облака неслись над отдаленной цепью гор, напоминая быструю смену кадров, возникающую при перематке пленки.

Внезапно дюны покрылись странной темной рябью, какая бывает на дне бассейна в полдень. Рябь, покачиваясь, медленно перемещалась по песку. Эти призрачные полосы, одно из редчайших природных явлений, возникли в результате особого сочетания растущей части Солнца

---

<sup>1</sup>Имеется в виду шкала Фаренгейта около 21 градуса Цельсия — Прим перев



и необычной турбулентности верхних слоев атмосферы. Полоски сохранились менее минуты, после чего словно испарились. Ветер усилился.

В оставшуюся минуту небо темнело с каждой секундой. Воздух внезапно наполнился летучими мышами, которые, обманувшись неестественными сумерками, вылетели из своих укрытий. Солнце, случайно попавшееся на глаза смельчаку, на миг производило впечатление звездообразной точки. Когда до полного затмения оставалось секунд пять, его черная тень пронеслась над водой со скоростью, превышающей тысячу миль в час.

На смену звездному образу Солнца пришел диск Луны, занявший его место. Последняя, быстрая, сверкающая вспышка света промелькнула, когда солнечный свет пробился через впадину лунного лимба. Наступило полное затмение, показались звезды, а расплывчатая электрическая голубая корона дугой отделилась от черного диска.

Драматическое явление полного солнечного затмения волнует нас столь глубоко, потому что человеческая цивилизация полностью зависит от света и тепла, которыми обеспечивает нас Солнце. Солнце запустило развитие жизни на нашей планете и продолжает поддерживать нашу биосферу. Мы вполне осознаем: что бы мы ни делали на Земле, это ни малейшим образом не повлияет на Солнце, — и это понимание придает нам странное спокойствие. Солнце будет светить завтра. Оно будет светить в каждый из оставшихся дней нашей жизни и еще долго-долго после нашей смерти. Однако оно не будет светить вечно.

Из двенадцати миллиардов лет, отпущенных нашему Солнцу, прошла почти половина. В следующие шесть миллиардов лет или около того Солнце истощит запасы водорода, имеющиеся в его ядре, и его длительная борьба с гравитационной силой вступит в новую, бесперспективную фазу. Как только содержание водорода упадет до критического значения, ядро Солнца сожмется под действием своего собственного веса, а поверхностные слои начнут раздуваться в направлении орбиты Венеры. В ходе этого процесса поверхность Солнца испустит достаточное количество излучения, чтобы полностью стерилизовать Землю.

Судьба Солнца имеет очевидные следствия для нашего собственного долгосрочного будущего. Однако в более универсальном масштабе Солнце — это всего лишь одна звезда из миллиарда триллионов ей подобных, расположенных в пределах нашего космологического горизонта. Сейчас эти сверкающие звезды — самые важные составляющие Вселенной. Звезды освещают ночное небо и образуют галактики. Звезды создали кислород, кремний и железо, из которых, в основном, состоит Земля. Свет звезд предоставляет нам большую часть информации,

которой мы располагаем относительно современного состояния нашей Вселенной. Таким образом, мы живем в *эпоху звезд*, которая будет продолжаться еще сто триллионов лет, пока обычные, существующие за счет горения водорода, звезды будут сверкать в главной роли.

## Образование галактик

После фейерверков первых трех минут Вселенная вступила в фазу относительного застоя. На протяжении следующих трехсот тысяч лет космическое пространство было заполнено практически невыразительным морем, состоявшим из ядер водорода и гелия, фотонов и свободных электронов, находившихся в состоянии постоянного взаимодействия, называемого тепловым равновесием. В эту мирную эпоху Вселенная расширялась и остывала. Но всюду проникающее море света препятствовало росту каких бы то ни было структур. В этом пламенном пространстве не было ни галактик, ни звезд, ни планет, ни жизни. Единственным отличием, нарушавшим монотонность Вселенной, были чрезвычайно малые возмущения фоновой плотности. Эти возмущения были следами ранней Вселенной, сохранившимися, скорее всего, от фазы инфляции, которая теперь осталась в далеком прошлом.

Эта незамысловатая эпоха завершилась внезапно, когда Вселенная остыла до температуры порядка трех тысяч градусов Кельвина. При этой температуре электроны и атомные ядра способны объединиться, образуя обычные атомы, главным образом водород. По мере расширения Вселенной падает энергия моря фонового излучения. Как только температура излучения падает, фотоны внезапно утрачивают энергию, необходимую для отделения электронов от ядер, вследствие чего частицы объединяются, образуя нейтральные атомы. После этого объединения море фотонов уже почти не взаимодействует с веществом и беспрепятственно струится сквозь космическое пространство. Недавно образовавшиеся атомы водорода и гелия теперь могут коллапсировать под влиянием сил гравитации. В результате этого коллапса возникают огромные скопления звезд, газа и прочего вещества, которые мы сейчас называем галактиками.

Основная составляющая процесса образования галактики концептуально достаточно проста: под действием гравитации вещество собирается в структуры галактических размеров. Галактики, наблюдаемые сегодня, коллапсировали из областей, которые изначально были лишь немного плотнее соседних с ними областей. Грубо говоря, когда начинает коллапсировать немного более плотная область, имеющая массу галактики, процесс рассеивания и охлаждения останавливает этот коллапс, как только вещество приближается к структуре галактического размера.

Большинство областей, в которых имелся зачаток галактики, обладали небольшой степенью вращения, т. е. некоторой величиной *кинетического момента*. Поскольку в процессе сжатия кинетический момент сохраняется, естественным образом формируются вращающиеся дискообразные структуры. Эти галактические диски демонстрируют великолепные рисунки в виде спиралей, с которыми у нас часто ассоциируются галактики, как показано на рис. 6.

Галактики населяли Вселенную почти с самого начала эпохи звезд. Располагая такими инструментами, как *космический телескоп Хаббла*, мы фактически можем увидеть галактики такими, как они выглядели, когда Вселенной был всего лишь миллиард лет. Возможность такого ясного ретроспективного взгляда обусловлена конечным временем распространения света. Например, мы смотрим на туманность Андромеды, едва заметную в особенно темные осенние вечера и напоминающую размытый светящийся клочок неба, и свет, который мы видим, был испущен звездами этой галактики около двух миллионов лет назад. Этот свет шел до наших глаз дольше, чем люди существуют как вид. С помощью более мощных телескопов для наблюдения за более отдаленными галактиками мы можем буквально взглянуть в прошлое: увидеть прошлую историю нашей Вселенной. Свет звезд от самых далеких известных нам галактик шел до нас дольше удвоенного возраста Земли!

## Образование звезд

Первые звезды родились примерно в то же время, что и первые галактики. В нашу эпоху звезды образуются из молекулярных облаков — огромных скоплений молекулярного газа, имеющегося в галактических дисках. Эти облака, нередко содержащие массу миллиона Солнц, гораздо плотнее и холоднее окружающего их межзвездного газа. Звездные «инкубаторы» в близлежащих молекулярных облаках типа туманности в созвездии Орла, изображенной на первом кадре рисунка 7, обеспечивают среду, в которой мы можем наблюдать процесс образования звезды в действии.

Звезды рождаются в результате коллапса *центральных областей* молекулярного облака — небольших сгустков, рассеянных по гораздо большему объему облака. Эти центральные области пронизаны магнитными полями, обеспечивающими жизненно важный источник давления, которое удерживает центральные области от гравитационного коллапса. Однако центральные области не могут существовать в таком виде неопределенно долго. Магнитные поля постепенно движутся наружу,

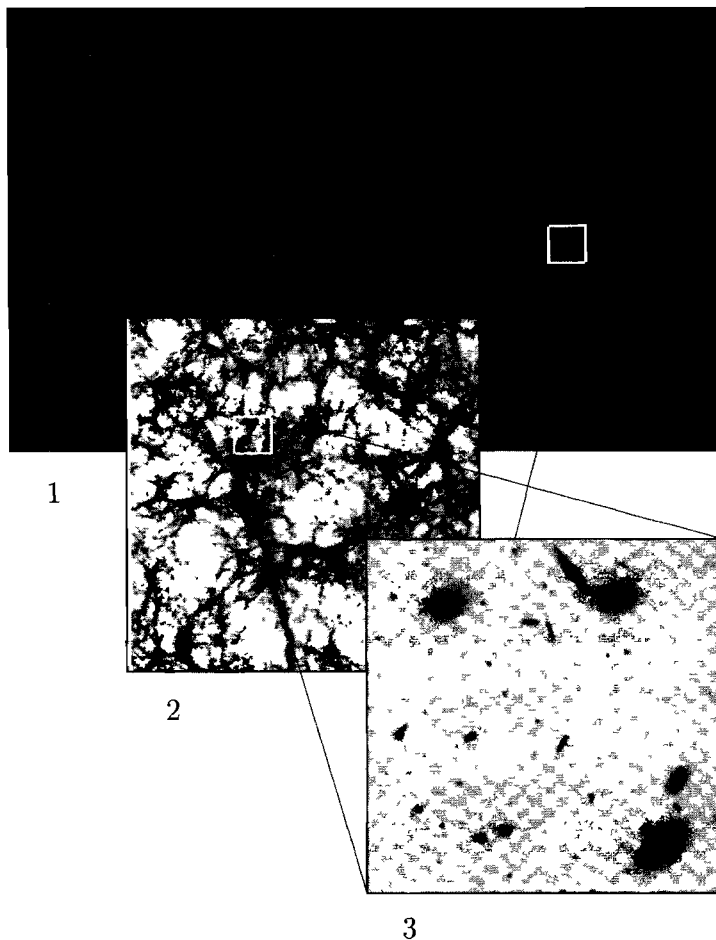


Рис. 6. Огненный космический шар, возникший в Большом взрыве, содержал отдельные области, которые были слегка плотнее остальных. Мы можем наблюдать свидетельство этих возмущений плотности в виде ряби космического микроволнового фонового излучения (первый рисунок). Впоследствии более плотные области коллапсируют, образуя листы и нити; этот процесс был смоделирован на компьютерах (второй рисунок). В конце концов, эти листы и нити распадаются на кусочки и коллапсируют далее, образуя галактики и их скопления, которые мы наблюдаем сегодня (третий рисунок)

а центральные области становятся все более плотными. Как только магнитные поля покидают центр, он становится слишком плотным и тяжелым, чтобы продолжать свое существование, тогда и приходит время для быстрой фазы коллапса. Вскоре, после того как начинается неизбежная коллапсическая катастрофа, в самом центре коллапса возникает небольшая, существующая благодаря давлению, *протозвезда*. Из этого звездного семечка вырастет настоящая звезда.

Центральные области молекулярного облака, из которых рождаются звезды, никогда не пребывают в состоянии полного покоя: они чрезвычайно медленно вращаются, совершая около одного поворота в миллион лет. Это медленное вращение придает системе существенный кинетический момент. Чтобы сохранить его значение, в момент коллапса центр молекулярного облака должен вращаться еще быстрее. В результате не вся его масса уходит непосредственно в рождающуюся звезду. Значительная часть вещества собирается вокруг образующейся звезды в виде сопутствующего околозвездного диска, размер которого примерно равен размеру нашей Солнечной системы. Этот небулярный диск, состоящий из газа и пыли, создает среду, весьма благоприятствующую образованию планет.

В фазу основного коллапса центральную протозвезду и ее небулярный диск окружает направленный внутрь газопылевой поток. Эта падающая оболочка достаточно плотна, чтобы почти полностью закрыть внешний вид образующейся звезды. Исходное видимое излучение, испущенное центральной звездой, перерабатывается так, что образующиеся звезды можно наблюдать лишь в инфракрасной части спектра, невидимой для человеческого глаза. По этой причине по-настоящему образующиеся звезды однозначным образом распознали только в восьмидесятые годы двадцатого века, когда их открытие стало возможным благодаря успехам, которых достигла инфракрасная технология.

По мере эволюции протозвезды увеличивается как ее масса, так и мощность излучения. Образующаяся звезда создает сильный звездный ветер, который пробивается сквозь плотную завесу газа, падающего на ее поверхность. Совершив первый прорыв, этот направленный наружу поток собирается в узкие струи, но большая часть газа, текущего вблизи звезды, по-прежнему направлена в центр. Однако постепенно поток, направленный наружу, расходится раструбом и начинает расчищать завесу падающего вещества. Со временем звезда начинает выходить из центра окружающего ее молекулярного облака. В конце концов, поток, направленный наружу, полностью отделяет молодую солнечную систему от ее родительского центра — родилась новая звезда. В течение следующих нескольких миллионов лет эта новая солнечная система сохраняет свой

околозвездный диск, в котором планеты медленно собираются в иноземные миры.

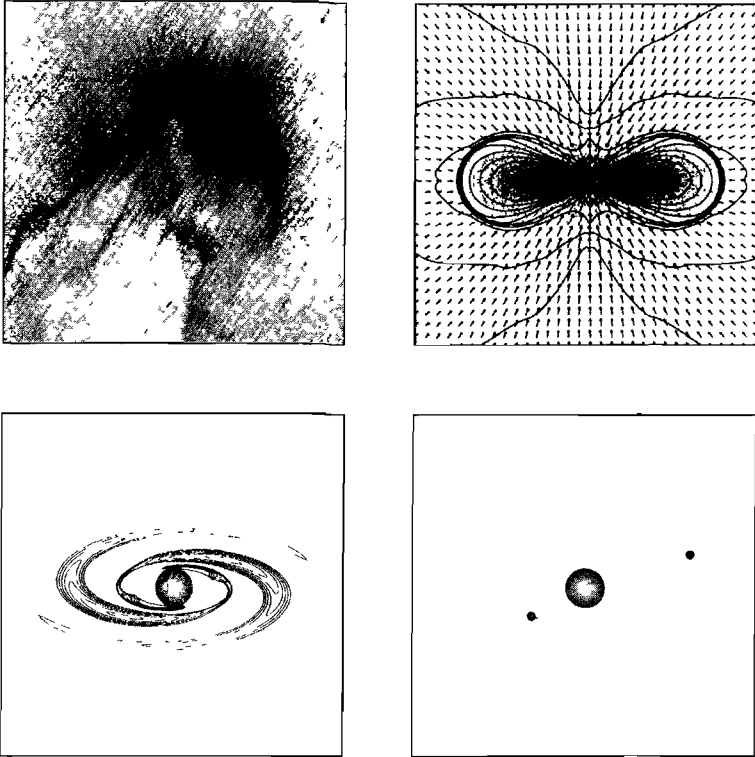


Рис. 7. На первом этапе образования звезды из центральных областей молекулярных облаков (схематически изображенных на первом кадре) конденсируются протозвезды. В результате коллапса центра молекулярного облака возникает центральная протозвезда, окруженная диском, который изображен здесь в виде компьютерной модели (второй кадр). Этот диск начинается с большого количества массы и создает спиральные волны плотности (третий кадр), которые притягивают к звезде еще большее количество газа. По истечении нескольких сотен тысяч лет оставшееся вещество диска может породить новую планетарную систему (схематически изображенную на четвертом кадре)

Несмотря на то, что новорожденные звезды светят очень ярко, изначально они не обладают нужной внутренней конфигурацией, которая позволила бы им генерировать энергию в процессе термоядерного превращения водорода в гелий. В начале своей жизни звезды извлекают большую часть своей энергии из гравитационного сжатия. Когда звезда сжимается, ее центр нагревается, в результате чего, в конце концов, начинается горение водорода. Начало непрерывных реакций ядерного синтеза знаменует собой завершение образования звезды.

## Прямо здесь и прямо сейчас

По прошествии более десяти миллиардов лет, затраченных на образование галактик и звезд, мы попадаем в настоящий момент. Читая эти слова, вы сидите где-то на поверхности (или, быть может, около нее) планеты диаметром в восемь тысяч миль, которая вращается по орбите самой обычной звезды. Здесь полезно сделать паузу и окинуть критическим взглядом то, что нас окружает.

Интересную перспективу можно получить, пролетев над своим домом на самолете. Можно увидеть кусочек Земли, служащий средоточием вашей повседневной жизни. Каждый из нас очень близко знаком с той частью планеты, которая пересекается с нашими каждодневными делами: быть может, это неровное покрытие на каком-то отрезке шоссе, кора дерева на заднем дворе или тенистые бетонные «ущелья», зияющие между небоскребами. Пролетая над всем этим, можно увидеть, как эти личные микромиры встраиваются в общую поверхность Земли. Пригород сменяется полями, а скоростные магистрали, извиваясь, растворяются вдали. Этот взгляд с высоты птичьего полета наводит на мысль о масштабе Земли и подтверждает, что мы живем на поверхности гигантской сферы.

А теперь давайте совершим гигантский мысленный скачок. Вообразите, что вся Земля размером всего лишь с песчинку. Отдельная песчинка велика лишь настолько, что ее можно увидеть; большая песчинка велика лишь настолько, что ее едва можно пощупать. Это сжатие Земли до размера песчинки сродни уменьшению в сто миллиардов раз. В этом масштабе Солнце имеет размер десятицентовой монеты, а расстояние от Солнца до Земли равно примерно пяти футам. Венера и Меркурий — это еще две песчинки, расположенные между Землей и Солнцем. Юпитер имеет размер малой горошины и располагается на расстоянии двадцати шести футов от Земли. Плутон, самая удаленная планета нашей Солнечной системы, существует на расстоянии двухсот футов.

Далее, сделаем второй, более понятный скачок. Представьте, что Солнце размером с десятицентовую монету сжимается до размера песчинки. Земля, уменьшенная в то же количество раз, превращается в микроскопическую частицу, а ее орбита представляет собой окружность диаметром около одного дюйма. Расстояние до Плутона сокращается до двух футов. В этом масштабе ближайшая звездная система — содержащая Проксиму Центавра и Альфу Центавра А и В — находится на расстоянии двух *милль*. Звезды в Галактике подобны песчинкам, которые разделяет расстояние, исчисляемое милями. Вряд ли можно переборщить, говоря о крайней пустоте современной нам Галактики. И при этом Галактика в миллион раз плотнее Вселенной в целом.

В нашей Галактике содержится около ста миллиардов звезд. Если мы продолжим представлять, что каждая звезда имеет размер песчинки, то все звезды Галактики можно вместить в обычную коробку из под обуви. Однако звезды не толпятся рядом друг с другом. Чтобы лучше почувствовать размер Галактики, нам следовало бы рассеять нашу коробку песка по расстоянию, отделяющему Землю от Луны. В самом деле, фотография Галактики может создать ошибочное впечатление. Сияющее и вращающееся звездное колесо на такой фотографии — это результат продолжительной экспозиции, полученной с помощью большого телескопа. На самом деле, галактики, даже самые близкие, типа туманности Андромеды, настолько тусклы, что их едва можно разглядеть на черном небе невооруженным глазом.

Совершив третье мысленное сжатие масштаба, мы можем обрести ощущение размера всей видимой Вселенной. Представьте, что наш галактический диск сдулся до размера обеденной тарелки. В таком масштабе туманность Андромеды имеет размер второй обеденной тарелки и находится в подвешенном состоянии в нескольких метрах от первой. Галактики распределяются во всех направлениях и иногда образуют скопления. Галактики и их скопления группируются, образуя нитевидные стены, окружающие скудно заселенные пустоты, размер которых достигает километра. Вся видимая Вселенная простирается на многие километры во всех направлениях. В настоящее время в видимой Вселенной содержится примерно столько галактик (от десяти до ста миллиардов), сколько в одной большой галактике насчитывается звезд. Таким образом, число звезд в видимой Вселенной аналогично числу песчинок в пустыне, изображенной на рисунке 8.

Видимая Вселенная представляет собой пределы того, что мы можем наблюдать в настоящее время, но она не включает в себя весь космос. И хотя области, лежащие за пределами видимой Вселенной, слишком далеки, чтобы повлиять на нас, они все же существуют и, вероятно,



содержат аналогичные типы звезд и галактик. По мере старения Вселенной наш космологический горизонт расширяется и видимая Вселенная увеличивается. Таким образом, с течением времени нашему взгляду открываются все большие просторы космоса.

## Знакомство с кастой звездных объектов

Современная Вселенная кишит звездами, и в Галактике постоянно образуются все новые и новые звезды. Но далеко не всем газовым сферам уготована участь звезды. Истинные звезды ограничиваются довольно узким диапазоном масс от одной десятой массы Солнца до приблизительно ста солнечных масс (где выражение солнечная масса обозначает массу нашего Солнца).

Чтобы поддерживать термоядерные реакции, которые происходят в недрах звезд, газообразные небесные тела должны содержать, по крайней мере, восемь процентов массы Солнца. Эпоха звезд изобилует неудавшимися звездами, которые обычно называют *коричневыми карликами*; они слишком малы, чтобы генерировать ядерную энергию. Везде, где рождаются истинные звезды, также стремятся образоваться и коричневые карлики. Коллапс центра молекулярного облака, в результате которого они возникают, придает им тускло-красное сияние, и многие миллиарды лет они медленно остывают, в конечном итоге сливаясь с окружающей тьмой. Коричневые карлики эффективно хранят необработанное водородное топливо. Эта инвестиция принесет дивиденды, когда наступит эпоха распада. Тогда коричневые карлики превратятся в самые значительные хранилища водорода, вследствие чего непременно возрастет их цена.

На другом конце этого диапазона масс расположились звезды, масса которых более чем в сто раз превышает массу нашего Солнца, — они крайне неустойчивы. Как только образуется чрезвычайно массивная звезда, она неизбежно подвергается саморазрушению. Эта звезда либо генерирует так много энергии, что буквально разлетается на части, либо под действием собственного веса подвергается катастрофическому коллапсу и превращается в черную дыру.

Разрешенный диапазон масс звезд намного меньше потенциально возможного. Звезды живут в галактиках, имеющих массы порядка ста миллиардов ( $10^{11}$ ) солнечных масс, причем звезды состоят из атомов водорода, массы которых равны примерно  $10^{-24}$  или  $10^{-57}$  масс Солнца. Таким образом, в принципе, галактики могли бы создавать объекты в диапазоне от  $10^{-57}$  до  $10^{11}$  масс Солнца, т. е. значения в диапазоне



Рис 8. Количество песчинок на этой фотографии примерно равно числу звезд, лежащих в пределах всей нашей видимой Вселенной в текущую космологическую эпоху

масс могли бы изменяться с коэффициентом  $10^{68}$ ! И все же звезды существуют только в диапазоне масс, значения в котором могут изменяться лишь с тысячным коэффициентом.

Столь скромному диапазону звездных масс можно противопоставить огромный диапазон масс земных форм жизни. Бактерия туберкулеза имеет размер около одного микрона, а следовательно, масса ее приблизительно равна  $10^{-12}$  граммов. На другом конце спектра — голубые киты, имеющие массу около миллиарда граммов. Самые большие растения (например, непрерывная осиновая роща) и самый большой из известных грибов (подземный образец, растянувшийся на несколько миль на Верхнем полуострове штата Мичиган) могут достигать еще больших масс. Отдельные земные организмы простираются на более двадцати одного порядка по массе, т. е. в диапазоне, намного превышающем диапазон масс, отпущенный звездам.

На протяжении всей эволюционной фазы, связанной с горением водорода, массивные звезды светят намного ярче маленьких звезд. Звезда, масса которой в десять раз превышает солнечную (например, звезда Спика в созвездии Девы), в десять тысяч раз ярче Солнца, тогда как обычная малая звезда, масса которой равна всего лишь одной пятой массы Солнца (как, например, звезда Барнарда, почти красный карлик), тусклее более чем в сто раз. В силу того что массивные звезды светят настолько ярче и излучают больше энергии, чем их двойники с более низкой массой, именно они вносят основной вклад в общую мощность излучения галактики. В нашем ночном небе, к примеру, из пятидесяти самых ярких звезд все, кроме одной, имеют массу, превышающую массу Солнца.

Поскольку почти все звезды, которые можно увидеть невооруженным глазом, тяжелее Солнца, можно подумать, будто Солнце — достаточно маленькая звезда. Это предположение, несмотря на всю свою разумность, попросту ошибочно. Из пятидесяти ближайших известных звезд Солнце занимает очень почетное четвертое место, и, вследствие этого, оно достаточно велико. Звезды с более низкой массой, главным образом красные карлики, масса которых не достигает даже половины массы нашего Солнца, численно преобладают в популяции звезд. Большая часть массы всей звездной популяции также содержится именно в этих звездах. Однако несмотря на свою вездесущность, более легкие соседи Солнца остаются практически незамеченными в небе. Их скудное излучение бледнеет по сравнению с редкими и более далекими массивными звездами.

Мы можем высказаться более точно в отношении масс звезд. Распределение, характеризующее процентное отношение звезд, которые ро-

ждаются в каждой части диапазона звездных масс, называется *начальной функцией масс*. Это распределение масс определяет мощность излучения галактик, их химическое содержание и, в конечном итоге, реестр звездных остатков, относящихся к концу эпохи звезд.

На протяжении всей своей молодости звезды ведут себя подобно пироманьякам, беспрестанно превращая водород в гелий в ходе реакций горения. Звезды с более низкой массой поглощают отведенное им водородное топливо крайне экономно и проживут очень долго. Массивные звезды, напротив, сгорают быстро и эффективно. В самом деле, красного карлика можно было бы сравнить с крайне бедным и скупым отшельником, который из года в год копит деньги и практически ничего не тратит. Наиболее массивные звезды, напротив, весьма напоминают богатых и расточительных наследников, которые самым бесстыжим образом за одни выходные проматывают состояние, исчисляемое многими миллионами долларов.

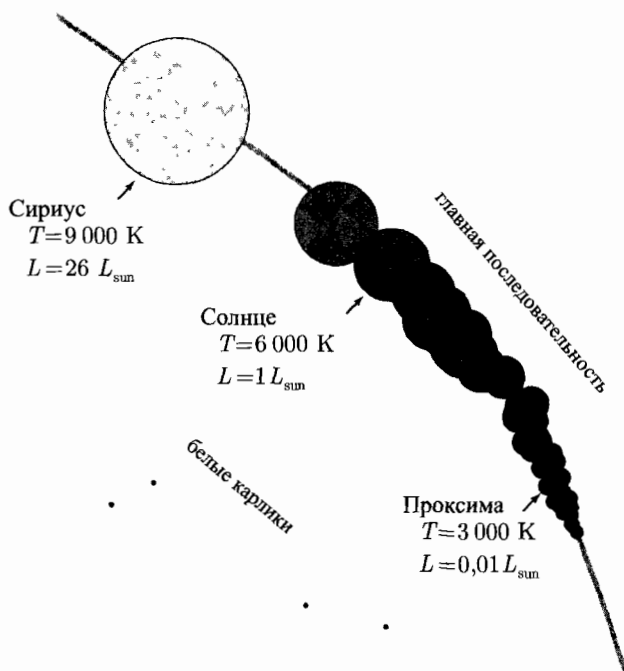


Рис. 8а

По мере того как раскрывается долгосрочное будущее звезд, фундаментальную роль начинают играть их базовые характеристики: масса, светимость и температура. Одним из наиболее практичных методов отображения хода звездной эволюции является *диаграмма Герцшпрунга–Рессела* — частная разновидность графа, которую в начале двадцатого века независимо друг от друга создали астрономы Генри Норрис Рессел и Эйнар Герцшпрунг. Диаграмма Герцшпрунга–Рессела выражает связь между светимостью, или мощностью излучения, откладываемой по вертикали, и температурой звезды, откладываемой по горизонтали. По историческим причинам значения температуры по горизонтальной оси откладываются в обратном направлении, так что увеличение происходит справа налево.

На данной диаграмме Герцшпрунга–Рессела мощность излучения звезд увеличивается к верхней части диаграммы, а температура поверхности звезд — к левой части диаграммы. Здесь изображены пятьдесят ближайших звезд, причем их физические размеры выражены через размеры сфер. Обратите внимание, что большинство ближайших соседей Солнца — небольшие звезды (называемые красными карликами), а следовательно, Солнце светит достаточно ярко по сравнению с большинством его соседей.

Когда мы отображаем на диаграмме Герцшпрунга–Рессела различные звезды, многие из них оказываются вдоль четко определенной линии, называемой *главной последовательностью*. Это не простое совпадение. Звезды, входящие в главную последовательность, имеют такую внутреннюю конфигурацию, которая позволяет поддерживать термоядерные реакции превращения водорода в гелий. Большую часть своей жизни звезды проводят именно в этом состоянии, поддерживающем горение водорода, вследствие чего в пределах главной последовательности находится подавляющее большинство звезд.

;

## Судьба Солнца и Земли

С точки зрения обитателя Земли, самым острым вопросом эволюции звезд является будущее, уготованное нашему Солнцу. Солнце светит неизменно в силу того, что его центральная область достаточно горяча и плотна, чтобы поддерживать ядерные реакции преобразования водорода в гелий (см. рисунок 9). Ядерный синтез — это именно тот процесс, в результате которого в термоядерной бомбе происходит высвобождение колоссального количества энергии. Поскольку процесс ядерного синтеза происходит в недрах Солнца, а не на атолле Бикини, Солнце надежно управляет процессом превращения своего водорода в гелий. Ядерный

синтез, происходящий в недрах Солнца, является саморегулирующимся, в том смысле, что в его результате вырабатывается ровно столько энергии, сколько необходимо для компенсации непрекращающегося гравитационного сжатия. В отсутствие ядерного синтеза Солнце сжалось бы за несколько миллионов лет, превратившись в очень горячего и плотного белого карлика.

Согласно датированию по радиоактивным изотопам самые старые метеориты, а значит, Солнце и планеты, образовались четыре с половиной миллиарда лет назад. После образования нашей Солнечной системы Солнце продолжало сжиматься на протяжении еще нескольких миллионов лет, пока его ядро не стало горячим настолько, чтобы начались реакции горения водорода. Таким образом, эти ядерные реакции питают Солнце на протяжении последних четырех с половиной миллиардов лет. Температура центра Солнца равна шестнадцати миллионам градусов Кельвина. Пока что в гелий превратилась примерно половина всего водорода, который имеется в центре Солнца. В увеличившейся центральной области остается достаточно водорода, чтобы Солнце продолжало светить на протяжении еще шести миллиардов лет. Полная мощность его излучения должна постепенно возрастать по мере увеличения концентрации гелия в его центре. Это увеличение светимости невозможно заметить за время жизни человека. И все же через шесть миллиардов лет Солнце будет светить примерно в два раза ярче, чем сегодня.

Более яркое и горячее Солнце имеет серьезные последствия для жизни на Земле. Как только возрастет поток солнечной энергии, попадающей на Землю, усилится глобальное потепление вместе с его неприятными побочными эффектами. Как только потеплеет вода в океанах, в ней уменьшится содержание растворенного диоксида углерода (углекислого газа). Снижение содержания диоксида углерода в воде приведет к возрастанию его содержания в воздухе. И хотя содержание углекислого газа в атмосфере незначительно, такое увеличение его концентрации будет иметь серьезные последствия.

Когда солнечный свет достигает Земли, некоторая часть его энергии отражается назад в космическое пространство. Солнечный свет, достигающий Земли, нагревает ее поверхность, которая после этого излучает обратно инфракрасный свет. Атмосфера с повышенным содержанием углекислого газа и водяного пара весьма прозрачна для видимого солнечного света, но почти непроницаема для исходящего инфракрасного излучения. Результирующее влияние попадания в атмосферу избыточного количества углекислого газа в некотором смысле аналогично помещению крышки на кастрюлю с кипящей водой. Тепло, поступающее в кастрюлю, никак не может найти выхода из нее.

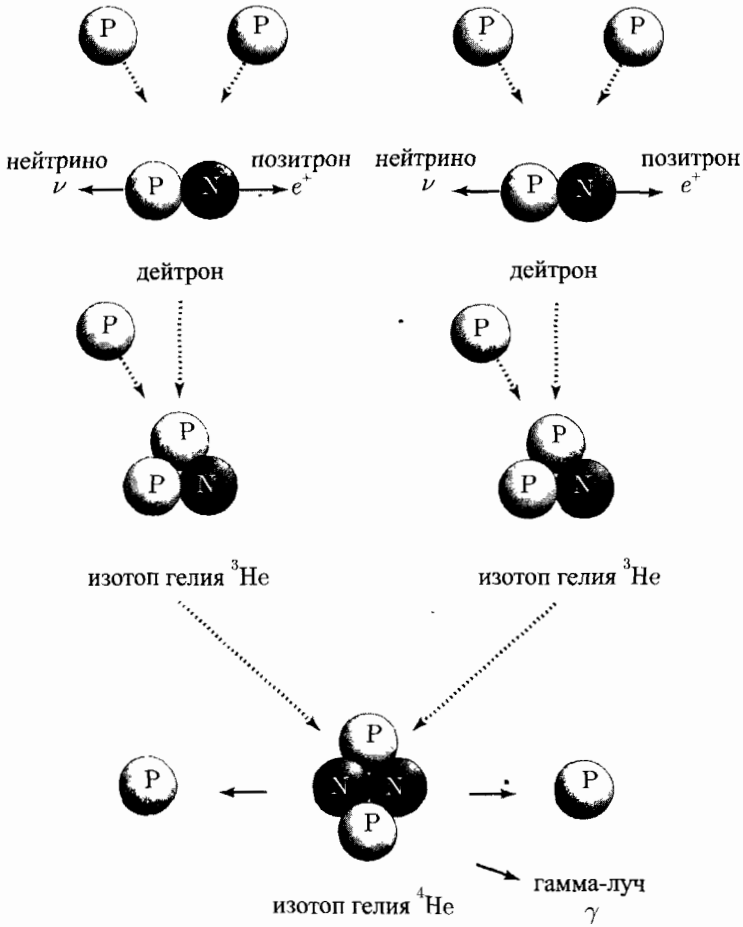


Рис. 9. Стандартная протон-протонная цепочка, изображенная на этом рисунке, — одна из главных последовательностей термоядерных реакций, с помощью которых Солнце вырабатывает свою энергию. Окончательным результатом этого процесса является превращение четырех протонов в одно ядро гелия плюс высвобождение дополнительной энергии, остающейся для питания Солнца

Этот так называемый *парниковый эффект* может превратиться в порочный круг. В результате нагревания океанов высвобождается углекислый газ и образуется водяной пар, что приводит к дальнейшему потеплению, которое, в свою очередь, выбрасывает еще большее количество газа в атмосферу. Развивается неустойчивость. Как только этот стремительный парниковый эффект усиливается, океаны испаряются полностью и ошпаривают Землю, стерилизуя ее атмосферу. И хотя теплолюбивые бактерии могут пережить начальные стадии наступающей жары, вымирание, в конечном итоге, грозит всем формам жизни. Тяжелая туча, нависшая над Землей, может отразить достаточное количество солнечного света, чтобы отсрочить надвигающуюся катастрофу, но массовое вымирание неизбежно. Через несколько миллиардов лет наш мир, сейчас такой зеленый и цветущий жизнью, станет весьма похож на современную Венеру с жуткой атмосферой, созданной стремительным парниковым эффектом.

Оптимизм вселяет лишь тот факт, что, когда Земля и ее климат погибнут от перегрева, Марс будет медленно нагреваться и превратится в более гостеприимное место. Через шесть миллиардов лет количество солнечной энергии, поглощаемое поверхностью Марса, вырастет до того уровня, который получает Земля в наши дни.

Несмотря на то, что уже двукратного увеличения яркости Солнца, вероятно, будет достаточно, чтобы жизнь на Земле погибла в пару, это скромное увеличение мощности — всего лишь начало огненной старости Солнца. После того как весь водород, содержащийся в недрах Солнца, будет преобразован в гелий, процесс термоядерного синтеза продолжится в том слое материала, который находится как раз над центральной частью Солнца. Поскольку температура центра Солнца слишком мала, чтобы переплавлять гелий в более тяжелые элементы, его ядро утратит источник энергии, в силу чего оно не сможет более выдерживать вес поверхностных слоев Солнца. Гравитационная катастрофа, которая произойдет в результате будет сжимать ядро до тех пор, пока центральное давление не уступит непрерывному стремлению к сжатию. Когда ядро сожмется, температура центральной области, соответственно, повысится. Тепло, высвобожденное более горячим ядром, перейдет в верхние слои, где ускорятся реакции термоядерного синтеза. Истощенное гелиевое ядро продолжит сжиматься, и мощность излучения Солнца будет неуклонно расти.

Как ни парадоксально, по мере увеличения светимости Солнца температура его поверхности снижается. Сегодня температура поверхности Солнца достигает почти шести тысяч градусов Кельвина. Однако когда Солнце раздуется до размеров красного гиганта, температура его поверх-



ности упадет почти до трех тысяч градусов Кельвина, а его цвет станет таким же красным, как у пожарной машины. Это охлаждение поверхности происходит потому, что избыточная энергия, выработанная вблизи солнечного ядра, частично остается в средних его слоях. Эти слои вынуждены расширяться, и Солнце эволюционирует, становясь ярче, больше, краснее и холоднее, чем тот желтый шар, который мы видим сегодня.

Поскольку выработка энергии Солнцем непрерывно возрастает, эта недавно увеличившаяся звезда создает сильные ветры. С солнечной поверхности исторгаются потоки энергетических частиц. Эти ветры напоминают более скромный солнечный ветер, наблюдаемый в наши дни, но они уносят куда больше вещества. Когда Солнце превратится в красного гиганта, из-за этого мощного ветра оно, возможно, потеряет более четверти своей массы. По мере испарения Солнца сила его гравитационного притяжения ослабнет и Земля постепенно отодвинется на орбиту большего радиуса, загибающуюся где-то неподалеку от современного положения Марса. Остальные планеты тоже соскользнут на большие орбиты.

Примерно через миллиард лет после того, как в центре Солнца закончатся запасы водорода, его истощенное ядро станет настолько плотным, что основное давление будет создавать вырожденный электронный газ. Термин «вырожденный» употребляется здесь в квантовомеханическом смысле. Вырождение электрона — это, прежде всего, следствие принципа неопределенности Гейзенберга. Когда электроны вынуждены занимать меньшие объемы, чем прежде, возрастают их скорости и увеличивается создаваемое ими давление. Звездный объект, существующий благодаря такому давлению вырожденного газа, называют белым карликом; его размер приблизительно равен радиальному размеру Земли. Расширяющийся красный гигант, в сущности, состоит из центрального белого карлика, окруженного чрезвычайно насыщенной и разреженной звездной атмосферой. Крошечный белый карлик в центре имеет значительную массу — почти половину массы Солнца. Таким образом, ядро достигает абсолютно невероятной плотности, приблизительно в миллион раз превышающей плотность воды.

Сильному сжатию ядра, создающему столь неестественно плотное состояние, способствуют два любопытных свойства вырожденного вещества. Во-первых, если к белому карлику добавляется некоторая масса, то этот дополнительный материал приводит к уменьшению радиуса белого карлика. Такое поведение в корне отличается от поведения обычного вещества. Если к планете типа Земли, которая, в сущности, представляет собой большой камень, добавить вещество, то это дополнительное вещество увеличит радиус планеты. В случае же с белым карликом все

происходит наоборот: по мере того как к нему добавляется больше массы, его радиус неизменно уменьшается.

Второе необычное свойство появляется при нагревании вырожденного вещества. Повышение температуры не вызывает ни расширения этого вещества, ни увеличения давления. Подобное поведение опять-таки полностью противоречит поведению обычных газов, которые при нагревании увеличивают свое давление и стремятся расшириться. Нагревание вырожденного ядра до более высоких температур не приводит ни к чему, что хоть как-то снизило бы чрезвычайно высокие плотности газа.

Когда температура в центре красного гиганта достигает ста миллионов градусов, в вырожденном ядре начинается новая цепочка термоядерных реакций. Ядра гелия превращаются в углерод. Скорость этого образования углерода чрезвычайно чувствительна к температуре. Со всем небольшим повышением температуры приводит к огромному увеличению скорости протекания термоядерных реакций. Эта острейшая чувствительность, вкупе с нежеланием вырожденного ядра увеличивать давление, приводит к тому, что превращение гелия в углерод выходит из-под контроля. Ядро красного гиганта быстро превращается в колоссальную гелиевую бомбу. На короткий промежуток времени энергопроизводительность красного гиганта становится сравнимой с совокупной мощностью излучения всех звезд Галактики. Этот гигантский всплеск энергии, называемый *гелиевой вспышкой*, обладает такой мощностью, что переводит плотное ядро из состояния вырожденности в более крупную и устойчивую конфигурацию.

После того как гелиевая вспышка выведет солнечное ядро из состояния вырожденности, Солнце вступит в относительно устойчивую фазу, когда превращение гелия в углерод остается под контролем. Из-за энергии, образовавшейся в результате гелиевой вспышки, центральная область Солнца больше не будет сжатой и вырожденной. В этом новом состоянии Солнце не может поддерживать конфигурацию раздутого красного гиганта. На пике фазы красного гиганта Солнце будет светить в две тысячи раз ярче, чем сегодня. Однако как только воспламенится гелий, уменьшатся размеры Солнца и его светимость, но увеличится его температура. Относительно спокойный период горения гелия продолжится около ста миллионов лет. В это время Солнце будет светить в сорок-пятьдесят раз ярче, чем сегодня, а его поверхность будет на тысячу градусов холоднее. Температура на Земле вновь снизится до нескольких сотен градусов Цельсия, и поверхность нашей планеты, возможно, вновь затвердеет. На новой земной коре вряд ли останутся какие-то следы геологии, биологии и цивилизаций, которые когда-то украшали поверхность этой планеты.

## Потерявшаяся в пространстве

Пока Солнце проходит свой жизненный цикл, биосфере Земли суджено полностью разрушиться из-за стремительного парникового эффекта через два миллиарда лет. И хотя эта будущая катастрофа не является для нас неотложной проблемой, подобная перспектива все же может на кого угодно нагнать тоску. Способна ли земная жизнь как-нибудь пережить неизбежное увеличение светимости Солнца?

В знаменитом стихотворении Роберта Фроста одни считают, что мир погибнет от огня, другие же утверждают — что от холода. Принимая во внимание астрономическую обстановку, у Земли есть небольшой шанс избежать огненной ярости Солнца, превратившегося в красного гиганта, сместившись со своей орбиты и очутившись в полном одиночестве в ледяных глубинах космоса. Другие звезды, обитающие в нашей Галактике, регулярно проходят неподалеку от нашего Солнца и, в принципе, могут наткнуться на внутреннюю часть нашей Солнечной системы. Если это невероятное событие все же произойдет, разрушительное гравитационное следствие такого столкновения запросто может вытеснить Землю с ее орбиты и даже из Солнечной системы. Таким образом наш мир мог бы избежать огненной смерти, но тогда он лицом к лицу оказался бы перед будущим, скованным льдом.

Вероятность того, что в следующие два миллиарда лет какая-нибудь звезда пройдет достаточно близко, чтобы вытолкнуть Землю с ее орбиты, составляет примерно одну сто тысячную. Хотя в нашей Галактике содержится огромное количество звезд, они настолько разбросаны в космическом пространстве, что значительные столкновения звезд происходят крайне редко. Вспомните, что если бы Солнце сжалось до размеров песчинки, ближайшая звезда оказалась бы на расстоянии нескольких миль от него. В таком масштабе самые близкие звезды двигались бы с чрезвычайно медленной скоростью, проходя относительно Солнца один или два фута в год. В галактике, где столь далекие друг от друга звезды двигаются так медленно, случайные их столкновения крайне редки.

Один шанс из ста тысяч — вероятность довольно маленькая, и все же люди регулярно выстраиваются в очередь за лотерейными билетами, хотя шанс выиграть в лотерею куда меньше. Посмотрим, что может случиться, если какая-нибудь проходящая звезда бесцеремонно отделит Землю от Солнца. На рис. 10 изображена типичная последовательность событий, которые произойдут, если красный карлик пройдет через Солнечную систему. Согласно приведенному здесь сценарию Земля немного нагреется, когда будет проходить рядом с красным карликом, вторгнувшись в Солнечную систему. Самые тусклые красные карлики светят

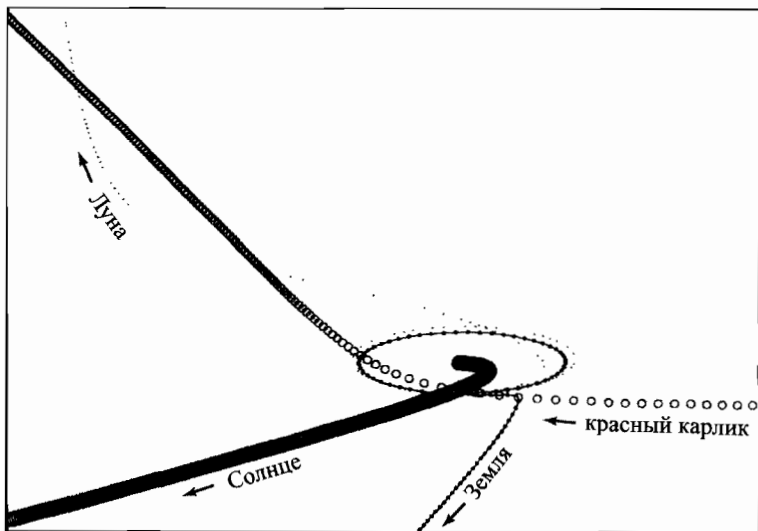


Рис. 10. На данной компьютерной модели изображена реакция Земли, Луны и Солнца на вторжение красного карлика, масса которого равна одной четвертой массы Солнца. Согласно предсказаниям этой модели Земля будет выброшена из Солнечной системы с огромной скоростью. Однако вероятность того, что нечто подобное произойдет прежде, чем Солнце превратится в красного гиганта, очень мала: всего лишь одна сто тысячная (1 из  $10^5$ )

настолько слабо, что температура Земли не успеет значительно измениться за время короткого сближения с такой звездой. Однако подобная встреча вызовет ужасные приливы и поднимет в океанах невероятно громадные волны. Так что, если не принимать во внимание несколько недель грандиозного серфинга, близкое прохождение красного карлика подействует, в основном, как гравитационная «рогатка». В этом случае Земля внезапно окажется удаляющейся от Солнца с высокой скоростью.

Двигаясь с такой скоростью, через несколько лет Земля пересечет орбиту Плутона и покинет Солнечную систему. По мере того как Солнце будет уменьшаться в небе, температура поверхности планеты будет медленно, но неуклонно снижаться. Джунгли, прилегающие к Амазонке, покроются инеем, а тропические растения замерзнут в опускающихся на Землю финальных сумерках. Через год Солнце будет выглядеть подобно сияющей звездообразной точке, на вид совершенно неспособной согреть. Океаны мало-помалу растратят свои запасы тепла и постепенно

превратятся в ледяные глыбы. Температура поверхности будет неумолимо падать. Очень скоро вся планета погрузится в вечный глубокий холод, несравнимый даже с антарктической зимой. При 77 градусах Кельвина сконденсируется и в виде дождя выпадет на твердую заснеженную поверхность азот, из которого, главным образом, состоит атмосфера. Жидкий азот будет стекать вдоль речных русел, собираться на замерзших водоемах и, в конечном итоге, ляжет на застывшую поверхность океанов слоем толщиной в несколько футов. Атмосферный кислород тоже выпадет из застывшего неба, открыв взору холодных мертвых городов далекие звезды.

Однако в самых недрах Земли эти изменения будут практически незаметны. Самые глубокие океанические впадины останутся незамерзшими. Вдоль среднеокеанической гряды продолжит функционировать, словно ничего не случилось, подводная горная цепь, опоясывающая земной шар, — эта странная паутина форм жизни, что существуют в экосистемах, окружающих гидротермальные источники. Эти сообщества питаются теплом вулканов, действующих в недрах Земли, и несколько не зависят от солнечного света. Безразличные к потере Солнца, эти сообщества, обитающие в окрестности гидротермальных источников, будут процветать, пока не прекратится геологическая активность Земли, хотя их характер весьма и весьма изменится, как только уменьшится поступление кислорода. Геологической активностью управляет тепло, которое выделяется при распаде радиоактивных элементов (например, урана), поэтому она будет продолжаться миллиарды лет, много дольше, чем осталось жить нашему Солнцу. Как это ни смешно, жизнь на Земле может действительно просуществовать дольше, если наша планета покинет Солнечную систему.

Для биофилов перспектива анаэробных бактерий и, возможно, кольчатых червей, столпившихся около геотермальных источников, безусловно, представляется более радужной, чем полная тепловая пастеризация всей планеты. И все же эта ледяная кончина, какой бы ни была вероятность ее наступления, не слишком утешительна. Выигрыш, который можно получить благодаря лотерее, хоть и менее вероятен, но все же возможен, и в случае его получения является хорошей компенсацией. Рассмотрим, например, такой исход: Земля не будет выброшена в глубокий космос, а перейдет на пригодную для жизни орбиту вторгшегося в Солнечную систему красного карлика. При таком благоприятном стечении обстоятельств жизнь на Земле вполне смогла бы существовать и развиваться в течение триллионов лет.

Однако крайне маловероятно, что во время прохождения одиночной звезды вблизи Земли произойдет такой удачный обмен. Такая

вероятность значительно повышается, если наша Солнечная система столкнется с двойной или тройной звездой. Подобная встреча ничуть не менее вероятна, чем столкновение с одиночной звездой, поскольку двойными или тройными являются более половины всех звездных систем.

Близкое прохождение трех звезд — крайне сложное предприятие, и его исход находится в достаточно чувствительной зависимости от начальных скоростей и положений этих звезд. На рис. 11 изображен один из возможных исходов. В данном случае Земля переходит на эллиптическую орбиту красного карлика. Вероятность подобного спасения Земли представляется ничтожной: один шанс на три миллиона.

## Судьба массивных звезд

Природа гибели звезды зависит от ее массы. Одиночным звездам с массами, превышающими половину массы Солнца, но не достигающими восьмикратной его массы, суждено разделить его судьбу. В конце жизни они извергают гигантские количества горячих газов (которые называют планетарными туманностями) и превращаются в белых карликов, состоящих, главным образом, из углерода и кислорода. И только лишь звезды с массой, превышающей восемь солнечных, имеют температуры центров достаточно высокие, чтобы в результате реакций ядерного синтеза получились еще и другие элементы. Этим массивным звездам уготован более драматический конец.

Для пущей ясности рассмотрим, что происходит со звездой, масса которой в пятнадцать раз превышает солнечную. Жизнь такого объекта в виде звезды чрезвычайно коротка; такая звезда сжигает свои запасы водорода, превращая его в гелий, за какие-то десять миллионов лет. Затем она легко поджигает образовавшийся гелий еще до того, как электроны ее центральной области превратятся в вырожденный газ, и незадолго до того, как истощатся запасы гелия ядро звезды состоит, главным образом, из углерода и кислорода. Температура такого ядра превышает сто миллионов градусов, а его плотность примерно в тысячу раз больше плотности воды (1000 граммов на кубический сантиметр). Когда запасы гелия в центре истощатся полностью, ядро начнет сжиматься под действием своего собственного веса. Плотность повысится до 100 000 граммов на кубический сантиметр, а температура приблизится к миллиарду градусов.

Когда температура ядра массивной звезды превысит миллиард градусов, звезда окажется перед новым вызовом в ее непрерывной борьбе с гравитационным сжатием. При таких высоких температурах образуются непомерные количества нейтрино. В силу того что появляющиеся

нейтрино не могут взаимодействовать со звездой, они испускают энергию в пространство, но не создают дополнительного давления, которое могло бы удержать звезду от коллапса. В итоге, из-за этих потерь нейтрино, не вся энергия, которая образуется в результате реакций ядерного синтеза, идет на удержание звезды от гравитационного коллапса. Таким образом, потери нейтрино ускоряют конец массивных звезд.

Когда температура центра массивной звезды достаточно высока, чтобы инициировать ядерное горение углерода, сжатие и нагревание ядра ненадолго прекращаются. Углерод загорается, когда объединяются два его ядра, что приводит к образованию возбужденного ядра магния. Это ядро магния может распасться несколькими различными способами, в результате чего получаются неон, кислород, натрий и магний. Широкий диапазон продуктов, образующихся в результате ядерного синтеза, типичен для сложных поздних стадий ядерного горения.

Одна из причин того, почему большую часть своей жизни звезды проводят, сжигая водород, состоит в том, что превращение водорода в гелий является самой *экзотермической* ядерной реакцией. Преобразование водорода в гелий сопровождается гораздо большим высвобождением энергии на грамм материала, чем, скажем, превращение углерода в магний. Уменьшение количества энергии, образующейся при последующих циклах преобразования легких элементов в более тяжелые, вкуче с необходимостью гораздо более высоких температур и энергии, гарантирует, что поздние фазы ядерного горения не будут продолжаться долго. В случае со звездой, масса которой в пятнадцать раз превышает массу Солнца, горение углерода продолжается всего несколько тысяч лет. После того как будет израсходован весь углерод в центре звезды, ядро должно сжаться и снова нагреться.

По завершении фазы горения углерода структура эволюционирующей массивной звезды несколько напоминает луковицу. Ряд отдельных слоев изображает области с различным химическим составом: от неон-кислород-магниевое ядро звезды до поверхностных слоев, содержащих необработанный кислород. Внизу каждого слоя фронт горения воспламеняет ядерный пепел, образовавшийся в результате реакций термоядерного синтеза, проходящих в ближайшем из верхних слоев (см. диаграмму на рис. 12).

В центре эволюционирующей массивной звезды в ходе сложной цепочки ядерных реакций кислород и неон быстро превращаются в кремний, серу и еще более крупные ядра. Эти ядерные реакции продолжают создавать более тяжелые элементы до тех пор, пока не образуется значительный запас железа. Однако, как только в ядре звезды станет преобладать железо, появится новая проблема. Преобразование железа в еще

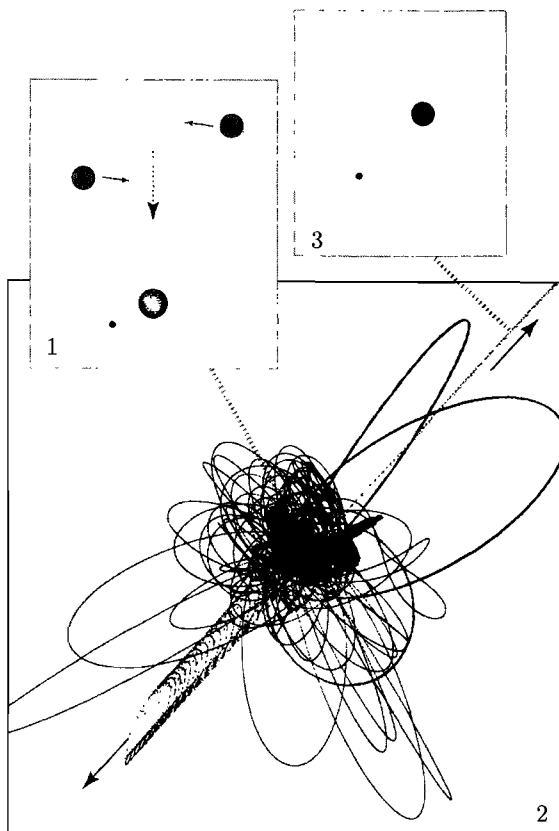


Рис. 11. На этой компьютерной модели изображен исход столкновения двойного красного карлика с нашей Солнечной системой. Красный карлик будет отброшен к Солнцу, а Земля почти сразу же отскочит к меньшей звезде и останется с ней на протяжении трех оборотов. Чуть больше чем через тысячу лет Земля вновь вернется к Солнцу, где будет оставаться на протяжении следующих 6500 лет и испытает много сложных сближений с другими звездами. Через 7500 лет Землю захватит более крупный карлик, и вскоре после этого данная звезда покинет Солнечную систему. Земля окажется на эллиптической орбите, которая вполне может сгодиться для жизни. Вероятность того, что подобный захват произойдет прежде, чем Солнце превратится в красного гиганта, равна одной трех миллионной



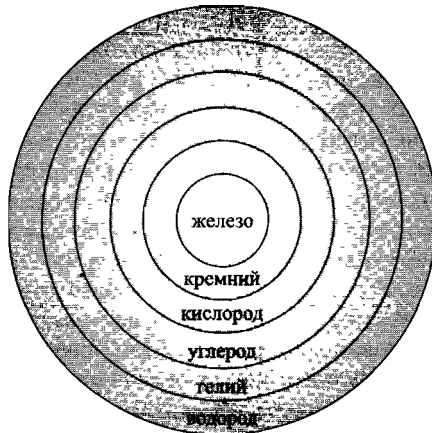


Рис. 12. На этой диаграмме приводится схематическое строение звезды большой массы на поздней стадии ее эволюции — всего за несколько минут до вспышки сверхновой. Каждый «луковичный слой» представляет слой продуктов ядерного горения вокруг центрального инертного железного ядра. Здесь показана только центральная область звезды; остальная ее часть состоит из толстой оболочки, образованной несгоревшим водородом

более тяжелые элементы (например, серебро или золото) не только не сопровождается высвобождением энергии, но и требует ее поглощения. Звезда, ядро которой стало железным, уже не может получать энергию из реакций ядерного синтеза. Умиравшее железное ядро, имеющее плотность около десяти миллиардов граммов на кубический сантиметр и температуру свыше миллиарда градусов, уже не способно сопротивляться действию сил гравитации и начинает сжиматься.

Гравитационный коллапс происходит очень быстро. За одну секунду внутренние области сжимаются до колоссальных плотностей, приближающихся к  $10^{14}$  граммам на кубический сантиметр. Если бы до такой плотности сжалась Земля, то ее диаметр сократился бы до четверти мили! Сразу после начала коллапса температура повышается настолько, что фоновое тепловое излучение разрушает ядра железа, из которого состоит ядро звезды. С таким трудом образовавшиеся ядра железа сначала распадаются на ядра гелия, также называемые  $\alpha$ -частицами, и только потом на протоны и нейтроны. Процесс фотодиссоциации лишает ядро тепловой энергии, которая, в противном случае, могла бы предотвратить коллапс. Кроме того, тепловые фотоны обладают энергией, достаточ-

ной для взаимодействия друг с другом с целью образования электрон-позитронных пар, что только ухудшает положение звезды. Вспомним, что позитрон — антиматериальный партнер электрона. Несмотря на то, что эти пары обычно аннигилируют, образуя фотоны, иногда они создают пары нейтрино-антинейтрино, которые излучаются в космическое пространство, унося с собой еще больше энергии ядра.

Когда плотность ядра приближается к  $10^{14}$  граммам на кубический сантиметр, свободные электроны и протоны объединяются, образуя нейтроны и нейтрино. Этот густой нейтронный туман напоминает одиночное гигантское ядро. По мере дальнейшего развития коллапса этот гигантский нейтронный шар обычно достигает состояния максимальной плотности, а потом снова расширяется. Это расширение посылает через звезду невероятно мощную взрывную волну.

Коллапс железного ядра массивной звезды, за которым следуют расширение при ядерных плотностях и вызванная им взрывная волна, называется *сверхновой*. Во многих случаях взрывная волна настолько сильна, что разрывает наружные слои звезды на части. Тяжелые элементы (включая золото, свинец и уран) синтезируются во время самого взрыва, а различные элементы, образованные на более ранних стадиях ядерного горения, вновь возвращаются в межзвездную среду.

В центре вспышки сверхновой может сохраниться плотное ядро, состоящее из нейтронов, — так называемая нейтронная звезда. Или же, если ядро в несколько раз превышает массу Солнца, оно может коллапсировать в черную дыру. Образование черной дыры является решительной победой гравитации в ее непрерывной борьбе с термодинамикой и производством энтропии. Однако существует и еще одна возможность. Если достаточно массивная звезда претерпит сильный взрыв, в результате которого будет исторгнуто много звездного вещества, то от этой звезды не останется ничего. Такой вариант развития событий является безоговорочной победой энтропии.

Вспышки сверхновых — самое драматическое событие звездной эволюции. На короткое мгновение, в момент коллапса железного ядра, колоссальные температуры и плотности в центре звезды возвращаются к условиям, которые преобладали в первые мгновения существования первичной Вселенной. Соответственно, вспышка сверхновой сопровождается впечатляющим выбросом энергии. На одну-единственную секунду количество энергии, произведенное сверхновой, конкурирует с полной энергией, испущенной всеми звездами нашей видимой Вселенной. На протяжении нескольких дней после вспышки сверхновой ее остаточное свечение сохраняется таким же ярким, как и свечение галактики, которую умиряющая звезда считала своим домом.

## Судьба звезд с низкой массой

Один астроном, работавший в Обсерватории Южно-Африканской республики в Йоханнесбурге в 1916 году, сообщил об открытии тусклой звезды в южном созвездии Центавра. Эта (во всех других отношениях ничем не примечательная) звезда, слишком тусклая, чтобы ее можно было увидеть невооруженным глазом, привлекла его внимание, потому что медленно изменяла свое положение по отношению к другим звездам, находящимся в той же части неба. Это движение указывало на то, что данная звезда вполне может быть близким соседом Солнца, и в 1917 году это предположение получило экспериментальное подтверждение. Оказалось, что расстояние до этой звезды составляет всего 4,3 световых лет: она находилась ближе к Солнцу, чем любая другая известная звезда. Ее чрезвычайная тусклость, несмотря на столь близкое расположение, в сущности, придавала ей статус наименее светящейся звезды, известной астрономии на тот момент. Сейчас мы знаем, что Проксима Центавра, как ее впоследствии назвали, — это всего лишь один из миллиардов красных карликов, населяющих нашу Вселенную.

На сегодняшний день эти красные карлики — самые распространенные звезды, и от Солнца они отличаются в нескольких отношениях. Масса Проксимы составляет около пятнадцати процентов солнечной, ее средняя плотность в несколько раз превышает плотность свинца, а мощность ее излучения — в четыреста раз слабее, чем у нашего Солнца. Но даже это весьма скромное количество энергии с трудом отделяется от плотных недр звезды. Центр Проксимы настолько непроницаем, что излучение не может эффективно перенести всю энергию, вырабатываемую в ходе синтеза, на поверхность звезды. Чтобы донести свой слабый свет до поверхности, Проксима приходится прибегать к конвекции — процессу, в ходе которого турбулентное движение звездного газа физически уносит энергию от центра звезды. В обыденной жизни конвекцию можно наблюдать в кастрюле с водой, нагреваемой на плите. Горячая вода закипает вблизи центра кастрюли, отдает часть своего тепла и возвращается на дно. Это взбалтывание и перемешивание воды весьма напоминает конвекционные движения, благодаря которым в звездах с низкой массой осуществляется перенос энергии.

В конвекции принимает участие почти вся внутренняя область Проксимы, вследствие чего звездное вещество постоянно перемешивается. К примеру, ядро гелия, образовавшееся в самом центре звезды, где происходят реакции ядерного горения, вполне может попасть в поверхностные области звезды за относительно короткий промежуток времени. Такая свобода движения прямо противоположна ситуации, существую-

шей на Солнце, ядро которого является скорее *излучающим*, нежели конвективным. Гелий, образующийся в центре Солнца, никогда не удаляется от места своего образования. Таким образом, ядро Солнца постепенно накапливает гелий, тогда как исходный состав удаленных от него областей остается неизменным. Звезда низкой массы типа Проксимы является полностью конвективной и сохраняет доступ ко всему начальному запасу водородного топлива. Полная конвекция, вкупе с небольшой выработкой энергии, позволяет красным карликам сохраняться в почти неизменном состоянии в течение еще долгого времени после того, как звезды с более высокой массой превратятся в белых карликов или погибнут во вспышках суперновых.

В силу того что красные карлики имеют доступ почти ко всему имеющемуся у них водороду, они живут невероятно долго. Самые маленькие звезды, масса которых равна около одной десятой массы Солнца, светят в тысячу раз тусклее Солнца. Ядерная светимость звезды, в конечном итоге, получается путем прямого превращения некоторой части звездного вещества в энергию согласно знаменитой формуле Эйнштейна  $E = mc^2$ . Каждое ядро гелия имеет несколько меньшую массу, чем четыре ядра водорода, из которых оно образуется. Точный *дефицит массы* составляет семь десятых процента; четыре ядра водорода весят в 1,007 раз больше одного ядра гелия. При преобразовании одного грамма водорода в гелий за одну секунду высвобождается 630 миллиардов ватт — этого хватит, чтобы автомобиль с мощностью двигателя в триста лошадиных сил ездил целый месяц. Запасы водорода, которыми располагает новорожденный красный карлик с массой, равной одной десятой массы Солнца, могут поддерживать его неизменное свечение на протяжении четырнадцати триллионов лет, что примерно в тысячу раз превышает настоящий возраст Вселенной. При выработке энергии звезда теряет соответствующее количество массы. Для красного карлика эта потеря массы аналогична полностью загруженному товарному поезду, который непрерывно увозит вещество с его поверхности со скоростью сто миль в час.

Пока что за всю историю Вселенной красные карлики просто не имели достаточно времени, чтобы эволюционировать дальше самых первых фаз, когда звезда существует за счет горения водорода. По этой причине, если не считать самых общих оценок времени их жизни, характеру их смерти почти не уделялось внимания. Тем не менее судьба Галактики — в руках красных карликов. После того как более массивные звезды растратят свое ядерное топливо и умрут в юном возрасте, красные карлики продолжают светить. Эти маленькие звезды будут кружиться в пространстве триллионы лет, и все это время в них беспрерывно бу-

дет происходить конвекция, они будут медленно сжиматься и постепенно становиться ярче. Таким образом, красные карлики играют важную роль в долгосрочной эволюции Галактики.

Рассмотрим долгосрочную эволюцию звезды с самой низкой массой, составляющей всего восемь процентов массы Солнца. По мере медленного истощения исходного запаса водорода звезда нагревается и сжимается. Светимость звезды увеличивается в десять раз, а температура ее поверхности — более чем в два раза. Через одиннадцать триллионов лет, когда звезда сожжет девяносто процентов своего исходного запаса водорода, конвекция в центральной области, наконец, прекращается. После этого звездная эволюция ускоряется, и звезда быстро сжигает те запасы водорода, которые еще остались в ее центре. Несмотря на то, что теперь звезда состоит из гелиевого ядра и окружающей его оболочки, образованной продуктами ядерного горения, ей не хватает мощности, чтобы превратиться в красного гиганта. Вместо этого, по мере нагревания и уменьшения красный карлик превращается в голубого карлика. После того как звезда потратит более девяноста восьми процентов исходного запаса водородного топлива, ядерное горение прекращается и звезда начинает остывать, постепенно превращаясь в белого карлика, состоящего почти из одного чистого гелия. Звезды, массы которых не превышают двадцати процентов массы Солнца, эволюционируют по этому же сценарию.

Несколько бóльшая звезда, масса которой составляет около четверти солнечной, быстрее теряет конвективное ядро. Внутри звезды создаются такие условия, которые быстро приводят к понижению температуры поверхности звезды по мере увеличения ее светимости, и звезда эволюционирует в красного гиганта. Звезды, рожденные с четвертью солнечной массы, — это самые маленькие звезды, которые впоследствии превращаются в красных гигантов.

Когда массивные звезды умрут, не оставив после себя должной замены, бóльшую долю общего светового излучения Галактики будет производить огромное скопление стареющих красных карликов. Их слабое, но неизменное увеличение светимости будет поддерживать в Галактике свечение, эквивалентное свету миллиарда Солнц на протяжении триллионов лет. Например, звезда с массой, равной 0,2 массы Солнца, по прошествии триллиона лет будет иметь такую же светимость и температуру поверхности, что и наше Солнце сегодня. Если бы эта звезда каким-то образом могла поменяться местами с нашим Солнцем в центре Солнечной системы, Земля и другие планеты внезапно оказались бы на свободных гиперболических орбитах (из-за разности масс), но яркость и цвет такой звезды в небе ничем не отличались бы от нашего Солнца.

Многие звезды с низкой массой проживают продолжительный период, во время которого они сжимаются и становятся горячее, но их общая светимость остается приблизительно постоянной. Для звезды, масса которой равна 0,16 массы Солнца, эта фаза начинается сразу после того, как все ядро превратилось в чистый гелий и фронт горения водорода начинает продвигаться к поверхности. В этот период, длящийся более пяти миллиардов лет, звезда имеет относительно постоянную светимость, равную приблизительно одной трети светимости нашего сегодняшнего Солнца. Эта теплая фаза устойчивой светимости длится достаточно долго, так что на любых планетах, расположенных в подходящем для этого месте, может развиться жизнь. Вспомним, что здесь, на Земле, простые одноклеточные организмы эволюционировали в людей менее чем за четыре миллиарда лет. В эту эпоху звезда достигает максимальной яркости. До этого позднего периода теплого свечения любые планеты, которые могли сопровождать эту звезду, погибли бы от холода, пока звезда в течение триллионов лет пребывала бы на эволюционной стадии конвекции.

По мере старения Галактики и смены звездных поколений концентрация тяжелых элементов в межзвездном пространстве неуклонно возрастает. В результате в далеком будущем звезды будут содержать больше ядер тяжелых элементов, чем современные. Это грядущее увеличение примесей снижает минимальную массу, которую должна иметь звезда, чтобы поддерживать горение водорода. Когда уровень примесей достигнет значения, в несколько раз превышающего современное солнечное, реакции водородного синтеза в своем ядре смогут поддерживать даже те звездные объекты, масса которых составляет всего четыре процента массы Солнца, причем в их атмосферах сконденсируются плотные ледяные облака. Эти странные замерзшие звезды могут похвастаться фактическими температурами, близкими к точке замерзания воды: нулю градусов Цельсия или 273 градусам Кельвина, — куда холоднее самых маленьких и холодных современных звезд. Так как эти бережливые объекты сжигают свое водородное топливо медленно, излучая в миллион раз слабее Солнца, они, соответственно, достигают огромного увеличения продолжительности своей жизни.

## **Поиск внеземной жизни**

Планета, которая вращается по орбите относительно массивной звезды — например, Денеб в созвездии Лебедя, — вряд ли является местом обитания внеземной цивилизации. Звезда вроде Денеба, масса которого в десять раз превышает массу Солнца, живет всего десять

миллионов лет, после чего погибает во вспышке сверхновой. Даже если по орбите Денеба вращается планета типа Земли, ее поверхность остается жидкой или полутвердой и подвержена сильному ионизирующему излучению, которое исходит от кипящей поверхности звезды. Эта гипотетическая планета принадлежит к внесолнечной системе, которая находится в стадии мучительного образования. Интенсивный «обстрел» планеты планетезималиями, метеоритами и кометами активно добавляет планете вещество и непрерывно изменяет ее климат. Подобная система еще слишком молода, чтобы на ней могла развиться хоть какая-то сложная жизнь, не говоря уже о разумной цивилизации.

О необходимости продолжительного времени, которое требуется для возникновения развитых цивилизаций, свидетельствуют два признака. Несмотря на то, что Земля существует уже 4,6 миллиарда лет, эволюционное восхождение человека произошло почти в самом конце этого периода. Первая же технологическая цивилизация на этой планете существует и того меньше — всего несколько сотен лет. Таким образом, в одном известном нам примере на развитие разума ушли миллиарды лет. Второй момент: у нас нет никаких указаний на существование других цивилизаций. В частности, с нами никогда не пытались связаться внеземные сообщества. Если бы технологические цивилизации могли развиваться за короткие периоды времени, то можно было бы ожидать, что какая-нибудь относительно близкая звезда будет распространять сигналы, которые можно засечь. Каменное молчание свидетельствует о том, что для развития технологии требуется долгое время.

Какое сочетание возрастающих успехов приводит к появлению цивилизации и сколько времени требует каждый этап ее образования? Во-первых, должна зародиться примитивная жизнь. Под примитивной жизнью мы подразумеваем простейшие структуры, способные к воспроизведению себе подобных и естественному отбору. Согласно этому определению одной из форм примитивной жизни на Земле можно считать вирусы. Интересно, что вирусы, судя по всему, появились позднее, чем первые клетки. Как бы там ни было, примитивная жизнь появилась на Земле очень рано. Старейшие из известных осадочных пород свидетельствуют о том, что вблизи побережья Южной Африки жизнь процветала уже почти четыре миллиарда лет назад. Появление примитивной жизни на Земле заняло не более нескольких сотен миллионов лет — опасно короткий промежуток времени, составляющий лишь небольшой процент от современного возраста Земли.

Если бы все звезды имели массы, в три раза превышающие солнечную, они прожили бы всего полмиллиарда лет и жизнь в редком случае поднялась бы выше этих простейших одноклеточных организ-

мов. По всей вероятности, галактика, заполненная звездами, имеющими тройную массу Солнца, крайне редко достигала бы второй важной вехи на пути к образованию технологической цивилизации, а именно: развития высокосложных клеток-*эукариотов*.

Для перехода на следующую ступень должна возникнуть сложность. Жизни на Земле потребовалось более трех миллиардов лет, чтобы развить фантастически сложный молекулярный механизм, действующий в современных клетках-эукариотах, к которым относятся и клетки человеческого тела. На протяжении большей части геологического времени жизнь пребывала, главным образом, на ступени одноклеточных организмов, постепенно становясь все более сложной на молекулярном уровне. Одноклеточная амeba, например, безмерно сложнее, чем одноклеточная коли-бактерия.

Если бы самые маленькие звезды в Галактике были на двадцать пять процентов тяжелее Солнца, максимальное время их жизни составило бы около трех миллиардов лет. В этом случае жизнь могла бы подняться выше ступени сложных одноклеточных организмов лишь на очень немногих планетах. Предположим, к примеру, что довольно близкая к нам звезда Процион, которая весит в 1,4 раз больше Солнца, имеет двойника Земли. В отдаленных океанах этой гипотетической планеты могла бы зародиться жизнь, при условии, что она сумела бы пережить фазы красного гиганта, в которого превратится белый карлик — звезда, парная Проциону. Даже во время нашего размышления над этим вопросом сложный молекулярный механизм вполне мог бы развиваться на Проционе аналогично тому, как два миллиарда лет назад это происходило на Земле. К сожалению, это чудесное эволюционное развитие вынуждено будет прекратиться раньше времени. Дни Проциона как обычной звезды, существующей за счет горения водорода, сочтены. Всего через несколько сотен миллионов лет этой звезде суждено раздуться в красного гиганта и самым эффективным образом стерилизовать любые на сегодняшний день обитаемые планеты в ее солнечной системе.

Третьим переломным событием, приведшим к развитию на Земле разумных существ, было появление многоклеточных организмов. Большие формы жизни, в которых согласованно функционируют клетки, выполняющие различные узко специальные функции, впервые появились около восьмисот миллионов лет назад, когда Земле было почти 3,8 миллиарда лет. *Фауна Эдиакары*, названная в честь австралийского нагорья Эдиакара, где были найдены самые известные ископаемые из этой эпохи, судя по всему, лишь весьма отдаленно похожа на современные растения и животных. Эти представители фауны Эдиакары, многие из которых напоминают подушки или надувные матрацы,



очевидно, покачивались на поверхности океана или обитали в более глубоких его слоях и вели оседлую жизнь, получая питание путем фильтрации воды. Возможно, фауна Эдиакары — это альтернативное, в конечном счете, неудачное, эволюционное решение проблемы согласованного действия больших количеств клеток в одном организме. Быть может, эти экзотические организмы были уничтожены первыми хищными червеобразными предками современных фили животных.

Сложные животные восходят в своей родословной непосредственно к *Кембрийскому взрыву*, который произошел 540 миллионов лет назад. За промежуток длиной всего в десять–двадцать миллионов лет интенсивный всплеск видообразования породил самых ранних известных представителей почти всех фили животных, которые в настоящее время имеются на нашей планете. Сочетание событий, приведшее к Кембрийскому взрыву, остается загадкой, и многие ключевые вопросы по сей день не получили ответа. Но что еще более важно, нам нужно знать, действительно ли эволюционный период продолжительностью в четыре миллиарда лет необходим для того, чтобы, главным образом, одноклеточные организмы достигли определенной точки, в которой стало возможным распространение сложных форм жизни. Был ли действительно необходим столь длительный промежуток времени или Кембрийский взрыв был всего лишь исходом случайной совокупности иницирующих событий, которые могли произойти в истории Земли и много раньше?

По сравнению с возрастом Земли, равным 4,6 миллиардам лет, эволюция от момента Кембрийского взрыва вплоть до появления нашего технологического общества произошла достаточно быстро. Было ли это достижение слепой удачей или возникновение разума было фактически гарантировано еще тогда, когда только появились сложные многоклеточные формы жизни? Нам это не известно. Но ответ на этот вопрос имеет решающее значение, в частности, для ведущихся поисков жизни за пределами нашей Солнечной системы. При рассмотрении большинства предположений о внеземном разуме сначала оценивается количество разумных цивилизаций, существующих в Галактике в данный момент. С помощью оценок такого рода делается попытка связать воедино многие аспекты астрономии, биологии и антропологии.

Чтобы оценить число звезд в Галактике, пригодных для жизни, можно взять в качестве примера Землю и потребовать, чтобы звезды жили, по меньшей мере, 4,5 миллиарда лет, что позволяет развитие разумных существ. Поскольку звезды должны жить относительно долго, они должны быть относительно маленькими. По этим сдерживающим меркам, самая большая звезда, способная прожить достаточно долго, содержит 1,15 солнечных масс. Кроме того, у звезды не должно быть пары,

способной разорвать обитаемую орбиту. Вышеописанные требования не являются особо ограничивающими. Наша Галактика содержит около десяти миллионов подходящих звезд, а во всей Вселенной (в настоящем объеме ее горизонта) их насчитывается почти десять миллиардов триллионов ( $10^{22}$ ).

Далее, нужно определить процент пригодных для жизни звезд, у которых действительно имеются планетарные системы. До совсем недавнего времени этот процент был практически неизвестен, хотя обычно считалось, что это достаточно существенная величина. В последние несколько лет было определено число планетарных систем, находящихся за пределами нашей Солнечной системы. Столь быстрое открытие говорит о том, что планетарные системы — это естественный и обычный исход процесса образования звезды. По мере того как за пределами Солнечной системы открывают все новые и новые планеты, доля звезд, имеющих планеты, приближается к единице.

При этом лишь некоторая часть подходящих звезд с планетарными системами имеет на своей орбите планету земного типа, способную поддерживать жизнь. И хотя на данном этапе рассуждения появляется неопределенность, согласно нашим настоящим теориям образования планет эта часть довольно велика. Образование планет земного типа не отличается сложностью. В нашей собственной Солнечной системе содержится четыре таких планеты. Смутно похожие на Землю планеты были обнаружены на орбитах нейтронных звезд. Каждую из планет-гигантов нашей Солнечной системы — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — сопровождает свита каменных лун, которые предположительно образовались в ходе процесса, аналогичного образованию планет, похожих на Землю. Принимая во внимание легкость образования каменных планет, простая, но неумолимая статистика гласит, что на обитаемых орбитах должна иметься значительная их доля. Учитывая ограничивающее требование относительно диапазона, в который должен входить радиус обитаемой планеты, можно сказать, что подобные Земле планеты на пригодных для жизни орбитах имеются у одного процента подходящих для этого звезд.

Однако в отношении доли подобных Земле планет, на которых действительно возникает жизнь, имеющиеся оценки сильно разнятся. Один выдающийся астроном, сэр Фред Хойл, предположил, что шансы на это равны всего одному из  $10^{40\,000}$ . На противоположном конце спектра — более оптимистично настроенные ученые мужи дерзнули назвать вероятность один к одному. При столь различных оценках нам отчаянно нужны фактические данные. Самым впечатляющим свидетельством, потенциально относящимся к данному вопросу, является недавно выполненный

анализ марсианского метеорита, на котором могли оказаться простейшие марсианские формы жизни. После того как этот кусок Марса был оторван от красной планеты из-за столкновения с метеоритом, он в течение многих лет летел через межпланетное пространство и, в конце концов, упал на Землю. Однако ученые так и не пришли к единому мнению относительно того, свидетельствует ли этот метеорит о том, что на Марсе есть жизнь. Каждое имеющееся на этом метеорите свидетельство в пользу существования жизни на Марсе может иметь также другое объяснение, никак не связанное с биологией. Более того, жизнь могла появиться в нашей Солнечной системе лишь однажды (на Марсе или на Земле) и потом распространиться во все возможные пригодные для нее области, расположенные по соседству. Возможен и такой вариант: жизнь возникла вообще за пределами Солнечной системы, как предположил Хойл. Согласно этому сценарию, который носит название *панспермии*, жизнь в наш мир принесла пролетающая мимо комета или астероид.

У нас есть неплохой шанс за время нашей жизни добиться успехов в решении этого жизненно важного вопроса. Если будущие миссии, отправленные на Марс, в конечном итоге, покажут, что на его теперь пустующей поверхности когда-то процветала жизнь, мы сможем определить, имеет ли марсианская биология то же происхождение, что и жизнь на Земле. Интересно было бы также опустить щуп под ледяную корку, покрывающую Европу, одну из лун Юпитера, и в жидкий океан, существующий под ней. Согласно современным научным представлениям воды океана нагреваются теплом приливов и могут поддерживать некоторую разновидность жизни. Открытие независимо развившейся жизни на Марсе или на Европе означало бы, что жизнь является вероятным исходом на любой пригодной для жизни планете. Однако если эти внеземные миры окажутся стерильными, этот вопрос, скорее всего, останется без ответа на протяжении еще долгого времени.

Кроме того, нужно провести границу между похожими на Землю планетами, на которых развиваются только простейшие формы жизни, и планетами, на которых развивается разумная жизнь, способная к межзвездному общению. Разумные виды могут появиться лишь на некоторой доле всех планет, поддерживающих жизнь вообще, и только некоторая часть этих разумных видов сможет поддержать межзвездное общение. Поскольку на Земле развитие от одноклеточных форм жизни до многоклеточных потребовало столь длинного промежутка времени, значит, на этой ранней стадии, вероятно, существует какое-то препятствие. С другой стороны, нет никаких указаний на то, что неизменное увеличение сложности одноклеточных организмов не приводит неизбежно к много-

клеточным формам жизни. Например, представители фауны Эдиакары вполне могли быть независимыми многоклеточными предшественниками, тогда как современные растения, животные и водоросли появились независимо от одноклеточных предков. Совокупность этих открытий весьма красноречиво свидетельствует в пользу гипотезы неизбежности.

Заключительной составляющей является время жизни развитой внеземной цивилизации в сравнении с временем жизни их родительской звезды. Для нашей Земли этот коэффициент в настоящее время очень мал. Хотя Земле уже 4,6 миллиардов лет, наша цивилизация посылает радиосигналы в космическое пространство на протяжении только одного века. Однако, в принципе, наше межзвездное общение может продолжиться и в далеком будущем. Согласно самому оптимистичному сценарию Земля может посылать радиосигналы до тех пор, пока Солнце не превратится в красного гиганта и не стерилизует наш мир. В этом случае Земля будет маяком межзвездного общения на протяжении приблизительно половины всей своей жизни.

Как же нам устранить из этого обсуждения все неопределенности? Наше знание в отношении астрономических составляющих быстро становится более полным. Мы с определенной долей уверенности можем сказать, что Галактика содержит около одного миллиарда пригодных для жизни планет. Однако какая часть этих гипотетических планет содержит разумную жизнь, способную к межзвездному общению, — вопрос, относящийся, скорее, к области буйных предположений, нежели обоснованных мнений. Одной из самых больших неясностей является число пригодных для жизни планет, на которых действительно зарождается хоть какая-то жизнь. История жизни на Земле говорит о том, что, как только начинается эволюция жизни, возникает определенная вероятность развития сложности, разума и даже технологии. Рискуя задним числом показаться безнадежно наивными, мы предполагаем, что жизнь возникает приблизительно на одной из десяти тысяч пригодных для этого планет. Складывая остающиеся факторы и допуская (хотя и не имея для этого достаточных оснований), что цивилизации, создавшие технологию, не уничтожат сами себя, мы полагаем, что всего в нашей Галактике около тысячи цивилизаций. Если эти цивилизации разбросаны в пределах галактического диска случайным образом, типичное расстояние между соседними цивилизациями составляет около трех тысяч световых лет.

Несмотря на то, что, согласно этой оптимистической оценке, Галактика может содержать достаточно большое число разумных сообществ, вероятность того, что мы скоро вступим с ними в контакт, остается крайне малой. Огромные расстояния, разделяющие звезды, обуславливают глубочайшую изоляцию этих сообществ. Предположим, что ближай-

шая разумная цивилизация находится от нас на расстоянии трех тысяч световых лет. Для сравнения, современная перепись ближайших звезд полностью включает только те звезды, которые расположены на расстоянии пятнадцати световых лет; астрономы постоянно обнаруживают новые — ранее неизвестные — красные карлики на удивительно близких расстояниях: от пятнадцати до тридцати световых лет. В пределах же трех тысяч световых лет — типичном расстоянии до внеземной цивилизации — от нас сокрыты миллионы звезд, которые еще только предстоит обнаружить. Соседняя инопланетная цивилизация вполне может посылать сигналы, содержащие столько же энергии, сколько излучает целая звезда, и, несмотря на это, оставаться совершенно незаметной. Безусловно, требования к энергии для межзвездного общения значительно уменьшаются, если рассматриваемая цивилизация использует направленный сигнал, посылаемый в четко определенном направлении. Недостаток такой стратегии состоит в том, что в этом случае в зону распространения сигнала попадает лишь небольшая часть неба. Так что итог не особенно хорош. Даже несмотря на то, что в нашей Галактике, в принципе, может существовать тысяча цивилизаций, для установления контакта с ними необходима изрядная доля везения.

## Колонизация Галактики

Принимая во внимание вероятность существования жизни, разумной или нет, в других солнечных системах, рассмотрим возможность колонизации Галактики. При этом мы можем провести различие между процессами естественного происхождения и процессами, управляемыми разумом того или иного рода.

Даже в отсутствие управляющего разума жизнь может распространиться по галактике благодаря естественно происходящим событиям. Механизмом распространения жизни могли бы послужить метеоры или астероиды, которые сталкиваются с планетой, где есть жизнь, и улетают в космическое пространство, унося с собой семена жизни на новую планету в новой солнечной системе. Направления движения метеоров полностью определяет случай, вследствие чего они могут улететь в любом направлении. Вместо продвижения от одной точки к другой по прямой линии, которая, как известно, служит кратчайшим путем, жизнь распространяется случайными шагами и, в конце концов, удаляется от той планеты, где зародилась. Этот процесс, именуемый *случайным блужданием*, — довольно неэффективный способ передвижения.

Чтобы оценить время, которое потребуется для прохождения всей Галактики путем случайного блуждания, предположим, что Галактика простирается на тридцать тысяч световых лет, а длина шага, который делает несущий жизнь метеор, составляет несколько световых лет — типичное расстояние, разделяющее звезды. Метеоры или кометы, переносящие жизнь через межзвездные пустоты, двигаются со скоростью около тридцати километров в секунду — типичная случайная скорость звезд в галактическом диске (эта случайная скорость накладывается на упорядоченное движение звезд вокруг центра галактики). Согласно этому сценарию время, необходимое для случайного заселения галактики жизнью, составляет почти три триллиона лет, что приблизительно в триста раз превышает современный возраст Вселенной. Таким образом, жизнь вряд ли могла распространиться в нашей Галактике таким способом. Для сравнения, самопроизвольное развитие жизни требует куда меньше времени — около четырех миллиардов лет здесь, на Земле. Учитывая относительную молодость Вселенной и Галактики, самопроизвольное зарождение жизни видится гораздо более вероятным, чем ее распространение посредством случайных процессов.

Однако распространение жизни в Галактике может происходить и строго направленным образом. Предположим, что какие-то цивилизации способны создавать транспортные средства, скорости которых сравнимы со скоростями вышеописанных метеоров — порядка тридцати километров в секунду. Тогда время путешествия между звездами составляет около тридцати тысяч лет. Поскольку этот промежуток времени охватывает множество поколений, по крайней мере, если говорить о людях, следует ожидать, что в данном случае самым большим препятствием станет время транспортировки. В результате некая амбициозная цивилизация может с постоянной скоростью продвигаться через Галактику наступающим фронтом. По этому сценарию время, необходимое для колонизации всей Галактики, примерно равно времени, затраченному на пересечение всей Галактики, — около трехсот миллионов лет. Таким образом, предполагаемое время, необходимое для колонизации Галактики, несколько короче времени, которое требуется для развития разумной жизни, в случае Земли равного четырем миллиардам лет.

Игнорируя внутренние неопределенности, присущие этим оценкам, мы можем подвести итог общей ситуации, связанной с колонизацией Галактики. Талантливая и целеустремленная цивилизация, в принципе, способна колонизировать Галактику примерно за один миллиард лет. Если жизнь распространяется посредством случайного процесса, ей, вероятно, потребуются триллионы лет, чтобы распространиться через всю Галактику. Для сравнения, эволюция разума занимает около четырех

миллиардов лет, а возраст Галактики равен почти десяти миллиардам лет. Таким образом, Галактика сейчас достаточно стара, чтобы уже могла произойти направленная ее колонизация. Однако она не произошла. Пока что никаких контактов с внеземными сообществами установлено не было. Это молчание имеет какое-то значение.

Наиболее правдоподобно это можно объяснить тем, что ни одна цивилизация не преодолела огромных препятствий, связанных с межзвездными путешествиями. Фактическое передвижение в космических кораблях, вероятно, крайне непрактично даже для развитых обществ. Чтобы разогнать корабль до требуемых скоростей, необходимы экстраординарные количества энергии. Более того, не ясно, из каких экономических побуждений могло бы быть предпринято подобное путешествие. Поскольку большинство звезд меньше Солнца, а значит, они живут дольше современного возраста Вселенной, вряд ли какая-то развитая цивилизация была бы вынуждена покинуть свою солнечную систему из-за звездной эволюции.

Однако в будущем эпоха звезд будет более благосклонна к распространению жизни. Значительно увеличиваются как возможности, так и мотивации межзвездных путешествий. Как только относительно тяжелые звезды типа нашего Солнца начнут выгорать и превращаться сначала в красных гигантов, а потом в белых карликов, разумные цивилизации, живущие вблизи этих умирающих звезд, могут счесть заманчивой идею колонизации планетарных систем близких звезд, которые и на тот момент будут активно вырабатывать энергию посредством ядерного синтеза. Например, через несколько миллиардов лет цивилизация, вынужденная покинуть умирающую звезду с массой, равной 1,05 солнечной, может обрести привлекательное, хотя и временное, жилье в нашей Солнечной системе. К этому времени Земля превратится в неприглядную копию Венеры, однако Марс с его теплом и влажностью, а также возрожденной атмосферой и преуспевающим рынком недвижимости может показаться весьма симпатичным местом.

На протяжении более длительного времени, когда развитые цивилизации начнут покидать звезды со все более низкими массами, вполне могут возникнуть споры относительно приоритета. Однако еще очень долго число жизнеспособных планетарных систем будет неуклонно расти: свой вклад в этот процесс внесет появление красных карликов, которые вновь нагреют свои столь долго мерзнувшие планеты. И только после того, как самые маленькие красные карлики (масса которых составляет всего восемь процентов от массы Солнца) сверкнут и угаснут, планеты с жидкой водой превратятся, главным образом, в застывшее воспоминание. Хотя

этот будущий энергетический кризис неизбежен, он произойдет лишь через триллионы лет.

Возможность завоевания Галактики поднимает интересный вопрос. Если какая-то конкретная разумная цивилизация окажется враждебной и агрессивной, то наша Галактика не устоит перед разорением, разграблением и завоеванием. Враждебно настроенная цивилизация может просто захватить Вселенную и установить в ней свою власть. Выше мы уже показали, что достаточно развитая и амбициозная цивилизация, в принципе, способна колонизировать всю Галактику всего лишь за какой-то миллиард лет. Если когда-либо разовьется агрессивно настроенная цивилизация, которая сумеет решить проблемы, связанные с космическим путешествием, в будущем она вполне может покорить нашу Галактику.

Существует и другая альтернатива. Цивилизация, достаточно развитая, чтобы задумываться о межзвездных путешествиях, может осознать бесплодность этой попытки и даже не попытается колонизировать другие солнечные системы. Такое общество, вероятно, будет обладать и хорошим пониманием зарождения и эволюции жизни. Если эта цивилизация сможет постичь фундаментальную основу сознания, она сможет превзойти естественный отбор. Например, возникновение жизни, в сущности, может оказаться автоматическим, то есть жизнь может естественным путем развиться на любой пригодной для этого планете. Кроме того, может оказаться, что эволюция всегда приводит к развитию разумных видов приблизительно сравнимого качества. В этом случае жизнь, естественным образом возникающая на любой пригодной для этого планете, была бы «ничуть не лучше и не хуже» жизни любой цивилизации, которая могла бы туда переселиться. Как только любая мыслящая цивилизация все это осознает, она просто решит остаться там, где обитает.

Делая предсказания относительно внеземного разума и колонизации Галактики, нельзя забывать о голословном характере этого предприятия. Почти два века назад, в 1835 году знаменитый французский философ Огюст Конт писал: «Что касается звезд, все исследования, которые в конечном итоге не сводятся к простым наблюдениям, . . . нам, непременно, недоступны. . . Мы никогда не сможем изучить их химический состав. . . Я считаю любое понятие, связанное с истинной средней температурой различных звезд, вечно недоступным для нас. . . ». В свете современных достижений астрономии это предсказание звучит до безнадёжного наивно. И все же сегодняшние размышления о межзвездном сообщении и космических путешествиях следует воспринимать с разумной долей осторожности. Предсказания же, касающиеся физической Вселенной и особенно будущей эволюции и смерти звезд, напротив, имеют под собой более твердую основу.



## Конец эпохи образования звезд в Галактике

По прошествии триллионов лет умрут даже самые долгоживущие звезды. Хотя, с позиций человека и даже по сравнению с современным возрастом Вселенной, этот промежуток времени кажется долгим, в более обширном контексте отдаленного будущего он не так уж и велик. Поскольку звезды имеют конечное время жизни, галактики смогут поддерживать свой текущий статус, только пока продолжают создавать новые звезды. В течение какого времени Галактика сможет поддерживать образование обычных звезд, прежде чем иссякнут ее сырьевые ресурсы? Какая космологическая декада будет править последними поколениями звезд?

История образования звезд в нашей Галактике, а также в других спиральных галактиках, — сложный предмет. Несмотря на неопределенность будущего звездообразования в Галактике, мы можем дать приблизительное описание того, что произойдет. Для создания новых звезд галактики должны превращать газ в облака, служащие местом образования звезд. Как только газ соберется в облака, удерживаемые действием гравитации, они естественным образом породят звезды. Галактики могут продолжать рожать звезды, покуда они могут создавать такие облака, для чего галактика должна иметь надежные запасы газа. Таким образом, нам хотелось бы знать, сколько времени пройдет, прежде чем Галактика исчерпает все свои сырьевые ресурсы.

Чтобы получить приблизительное представление о том, сколько времени осталось до конца эпохи образования звезд, можно разделить массу газа, в настоящий момент имеющегося в Галактике, на скорость его превращения в звезды. Эта простая процедура подсчета свидетельствует о том, что Галактика истощит запасы своего газа еще через десять миллиардов лет, что примерно сравнимо с настоящим возрастом Вселенной. Ясно, что галактики не смогут производить звезды бесконечно. Однако фактическое время истощения запасов газа несколько длиннее этой наивной оценки.

Когда звезды умирают, часть их массы возвращается в межзвездную среду — галактическое хранилище газа и пыли. Звезды типа Солнца теряют значительную долю своей массы из-за звездных ветров и образования планетарных туманностей. Более тяжелые звезды возвращают большую часть своей массы в межзвездную среду, когда вспыхивают в сверхновые. Таким образом, сами звезды служат источником газа, который впоследствии включается в будущие поколения звезд. Кроме того, дополнительный газ появляется в Галактике, когда на галактический диск падает внешний по отношению к нему материал. Наконец, и это са-

мое важное, скорость образования звезд снижается по мере уменьшения общего запаса газа. Такая переработка и меры по сохранению имеющегося газа отсрочивают ту эпоху, когда в галактиках закончатся запасы газа и они перестанут рождать новые звезды. Однако, даже несмотря на все эти ухищрения, запасы газа в Галактике закончатся через несколько триллионов лет. К четырнадцатой космологической декаде, когда Вселенной исполнится сто триллионов лет, образование обычных звезд в галактиках прекратится практически полностью.

Исключительно по случайному совпадению, образование звезд и звездная эволюция подойдут к концу приблизительно в одну и ту же космологическую декаду. Звезды с низкой массой — красные карлики — сжигают водород и живут продуктивной звездной жизнью на протяжении триллионов лет, что примерно сравнимо со временем, за которое в галактиках истощатся запасы газа, вследствие чего они больше не смогут рождать звезды. Таким образом, характер Вселенной изменится достаточно резко. В тринадцатую космологическую декаду звезды еще будут ярко сиять, а Вселенная будет полна энергии. По завершении четырнадцатой космологической декады звезды погаснут и Вселенная покажется человеку куда более темной.

## ГЛАВА 3

# Эпоха распада

## $15 < \eta < 39$

**Мертвые звездные остатки захватывают темную материю, сталкиваются друг с другом, рассеиваются в космическом пространстве и, наконец, распадаются, уходя в небытие.**

*Пятнадцатая космологическая декада, где-то вблизи поверхности белого карлика:*

Миранда приникла к бортовому иллюминатору космического корабля, чтобы в последний раз окинуть взглядом свой мир. Когда началась подготовка к запуску, она ощутила одновременно грусть и волнение, вызванные столь близкой перспективой покинуть эту устроенную цивилизацию и попытаться найти новое место для основания колонии. Сферическая металлическая платформа, простиравшаяся внизу, была настолько плоской, что кривизна ее поверхности оставалась практически неразличимой. Эта громадная конструкция со слабо светящимися городами и искусственными ландшафтами на протяжении бесчисленных поколений служила пристанищем для ее предков.

Металлическая поверхность, на которой расположилась колония, почти полностью окружила кристаллизованного белого карлика. Эта конструкция была спроектирована с совершенной точностью, что позволило улавливать ту малую энергию излучения, которую еще вырабатывал этот остаток давно погибшей звезды. Благодаря естественному процессу захвата и аннигиляции темной материи, белый карлик вырабатывал энергию в количестве, достаточном для поддержания миллиарда граждан. Теперь же, когда население выросло, увеличилась и потребность в ресурсах. Настало время найти новое место обитания.

Задумавшись, Миранда представила, на что могло походить отдаленное прошлое, в котором из многочисленных водородных облаков рождались яркие молодые звезды. Насколько иначе, должно быть, выглядело небо, освещенное миллиардами звезд, в каждой галактике. Но эта расточительная в прошлом Вселенная уже давно умерла. Как тот, кто

живет всего несколько сотен лет, вообще может в полном объеме постичь временные промежутки, равные триллионам лет? Когда она закрыла глаза, размышляя над этой загадкой, космический корабль мягко оторвался от поверхности.

Тем временем, под самой поверхностью белого карлика происходили, на первый взгляд, безобидные события огромной важности. Мучительно медленно и незаметно для теплокровных существ, обитающих на поверхности, большие молекулы в ходе химических реакций постепенно собирались в еще более длинные цепочки. Это увеличение сложности приводилось в действие случайными всплесками высокоэнергетического излучения, просачивающегося из недр звезды. В то время как Миранда и ее род цеплялись за существование во все более негостеприимной Вселенной, впервые начался синтез строительных кирпичиков, предназначенных для образования биологии нового типа.

Что происходит, когда прекращают светить звезды? Через сто триллионов лет из истощенных межзвездных облаков будут выжаты последние поколения звезд и даже эволюция нескольких еще живых красных карликов будет постепенно подходить к своему завершению. Как только динамический цикл рождений и гибели звезд превратится в простое воспоминание, Вселенная изменит свой темперамент, пополнит свое содержание и продолжит эволюцию.

Когда Вселенная вступает в эпоху распада, перемены становятся довольно-таки очевидными. Обычные звезды, существующие за счет горения водорода, превратились в звездные остатки: коричневые карлики, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. И хотя эти объекты могут показаться холодными и жалкими, именно они будут источником действия и волнения во Вселенной. Часы, измеряющие скорость разворачивания событий, идут гораздо медленнее. Начинают происходить астрофизические события, которые из-за жестких временных ограничений никогда не могли бы произойти в современной Вселенной.

## **Познакомимся с вырожденными звездными остатками**

Масса звездных остатков служит некой «зачанкой» для эпохи распада. Мы уже встречались с этой кастой вырожденных объектов в предыдущей главе. Во всей этой коллекции звездных остатков итогом звездной эволюции, продолжавшейся триллионы лет, служат четыре обычных класса: коричневые карлики, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры (см. рис. 13). Однако, полноты ради, нельзя забывать и о возможности существования пятого варианта. Когда в достаточно массив-



Рис. 13. На левой диаграмме изображено относительное количество звезд, рождающихся в различных диапазонах массы. Самый большой сектор предназначен для коричневых карликов, массы которых находятся в диапазоне от 0,01 до 0,08 массы Солнца. Другой большой сектор отводится под красных карликов, массы которых лежат между 0,08 и 0,43 солнечной массы. Следующий большой сектор содержит средние по весу звезды, находящиеся в диапазоне от 0,43 до 1,2 солнечной массы. Массивные звезды попадают в диапазон от 1,2 до 8 солнечных масс, а самый маленький сектор предназначен для тяжелых звезд, масса которых превышает восемь солнечных. На правой диаграмме приводится распределение звездных остатков — объектов, оставшихся по завершении звездной эволюции. Коричневые карлики остаются коричневыми карликами, но большинство звезд (масса которых меньше восьми масс Солнца) завершают свою жизнь в виде белых карликов. И лишь крошечная часть звезд, масса которых превышает восемь солнечных, могут превратиться в черные дыры и нейтронные звезды. Размер сектора, отведенного под черные дыры и нейтронные звезды, преувеличен ради ясности.

ной обычной звезде возникнет неустойчивость, результирующая вспышка сверхновой иногда может быть настолько мощной, что все звездное вещество рассеется в космическом пространстве. Другими словами, *не останется ничего*. Такой исход является быстрой и решительной победой термодинамики в ее сражении с силой гравитации. В остальных четырех случаях гравитация так легко не сдается.

## Коричневые карлики

Коричневые карлики крупнее планет, но мельче обыкновенных звезд и представляют собой самую легкую разновидность вырожденных остатков. Это звезды-неудачники — в том смысле, что в их недрах не может произойти ядерное возгорание водорода. Им недоступен обычный источник звездной энергии, вследствие чего с самого момента рождения и впредь им суждено вести скромную жизнь остывания и сжатия.

В основе неспособности коричневых карликов превратиться в звезды лежат несколько физических причин. Одна из важнейших состоит в том, что скорости протекания ядерных реакций чрезвычайно чувствительны к переменам температуры. Малейшее увеличение температуры в недрах звезды вызывает гигантский всплеск энергии, вырабатываемой в процессе водородного синтеза. В результате этого температура, при которой в звездах происходит синтез водорода, всегда близка к десяти миллионам градусов Кельвина. (Как только ядро звезды становится горячее, увеличение избыточной энергии заставляет его расширяться и остывать.) Далее, поскольку температура постоянно остается равной десяти миллионам градусов, по мере уменьшения массы звезды возрастает плотность ее недр. Маленькие звезды должны сжиматься сильнее, чтобы достигнуть центральной температуры в десять миллионов градусов, вследствие чего они значительно плотнее более массивных. Последней же каплей становится то, что давление, создаваемое вырожденным материалом, быстро растет с увеличением плотности. То есть если вы попытаетесь сжать кусок вырожденного вещества, он окажется очень жестким и будет сопротивляться сжатию.

Если связать все вышеописанные явления воедино, становится ясно, почему звезды, для того чтобы сжигать водород, должны иметь массу, превышающую некоторый определенный минимум. Как только уменьшается масса звезды, увеличивается плотность ее внутренних областей. Однако, если эта плотность достигает слишком большого значения, давление вырожденного газа доминирует над обычным тепловым давлением и поддерживает звезды до того момента, когда температура достигает требуемых десяти миллионов градусов. Таким образом, возникновение давления вырожденного газа создает максимальную температуру центра, которой способна достичь звезда данной массы. Максимальная температура центра достаточно маленьких звезд не достигает десяти миллионов градусов — значения, при котором происходит горение водорода. Если объект, стремящийся стать звездой, имеет слишком низкую массу, он не может сжигать водород, а потому никогда не станет настоящей звездой.

Самые маленькие звезды, способные поддерживать реакции ядер-

ного синтеза, имеют массу порядка восьми процентов от массы Солнца. Звездные объекты, масса которых не дотягивает до этого минимума, являются коричневыми карликами. Радиальный размер коричневого карлика приблизительно сравним с размером обычной маленькой звезды — одной десятой размера Солнца или примерно десятыми размерами Земли. Заключительной важной характеристикой коричневых карликов является их химический состав. В силу того что они фактически *ничего не делают*, эти полужвездные лодыри практически полностью сохраняют то изобилие элементов, с которым рождаются. Следовательно, они состоят, главным образом, из водорода.

В последние несколько лет астрономы обнаруживали все новых и новых коричневых карликов, и, действительно, ученые полагают, что их во Вселенной достаточно много. Галактика размером с Млечный Путь, вероятно, содержит миллиарды коричневых карликов. И хотя пока что коричневые карлики не оказали на космос большого влияния, эти неудавшиеся звезды еще покажут себя, когда Вселенная станет старше. В эпоху распада именно в коричневых карликах будет содержаться большая часть несгоревшего водорода, который к тому моменту останется во Вселенной.

## **Белые карлики**

Огромное количество звезд, включая наше собственное Солнце, в конце своей жизни превращаются в белых карликов. Несмотря на то, что тусклая звезда, масса которой равна всего восьми процентам солнечной, в сто раз легче горячей звезды с массой в восемь солнечных, испускающей свет, равный свету трех тысяч солнц, и той, и другой в конце их эволюции суждено превратиться в белых карликов. К моменту завершения эпохи звезд в нашей Галактике будет содержаться почти один триллион белых карликов и примерно столько же коричневых карликов. Белые карлики по отдельности имеют гораздо большую массу, поэтому в них будет содержаться наибольшая часть обычного барionного вещества Вселенной.

Среднее значение диапазона масс белых карликов несколько меньше массы Солнца. Самые маленькие звезды-прародители по мере своей эволюции и превращения в белых карликов теряют очень малую долю своей массы. Маленький красный карлик на заключительном этапе эволюции превращается в белый карлик почти такой же массы. Звезды типа Солнца, которым суждено раздуться в красных гигантов, теряют значительно большую долю исходной массы. Солнце породит белый карлик с массой, равной 0,6 солнечной. Более крупные звезды, превраща-

ясь в белых карликов, напротив, теряют основную часть своей массы. Например, звезда с массой в восемь солнечных в конце своей жизни превратится в белого карлика с массой в 1,4 массы Солнца. Остальную массу унесет звездный ветер, когда звезда будет находиться в фазе красного гиганта. Это звездное вещество вернется в межзвездную среду, где будет использована повторно.

Те белые карлики, которых мы видим в небе сегодня, относятся к верхней половине диапазона возможных масс этих звезд. Из-за относительно юного возраста Вселенной и ее звездного содержимого пока что успели погибнуть только те звезды, масса которых превышает 0,8 массы Солнца. Более мелких звезд намного больше, и живут они гораздо дольше. Самые маленькие звезды (масса которых находится вблизи минимума, равного 0,08 массы Солнца) еще только начали свою эволюцию. Однако в далеком будущем даже эти звезды выгорят и превратятся в белых карликов. К началу эпохи распада самые распространенные белые карлики будут иметь относительно небольшие массы.

Белый карлик с типичной массой в 0,25 массы Солнца имеет радиус в 14 000 километров, что примерно в два раза больше радиуса Земли. Как ни странно, более тяжелые белые карлики имеют меньший размер. Белый карлик, по массе равный Солнцу, имеет радиус всего 8 700 километров. Вот каким странным свойством обладают белые карлики: более массивные объекты имеют меньший размер, что обусловливается тем, что они состоят из вырожденного вещества. Это странное свойство диаметрально противоположно свойствам обычного вещества. Если увеличить массу камня, то он становится больше и по размеру. Если увеличивается масса белого карлика, он сжимается!

Почему же белые карлики вообще видны? Если эти объекты являются конечным результатом звездной эволюции, имеющим место по завершении процессов термоядерного синтеза, то за счет чего светят эти звезды? В этих звездных остатках содержится огромный запас тепловой энергии, оставшийся от огненного периода их жизни. Это гигантское хранилище тепла излучает энергию в космос невероятно медленно. В результате белые карлики видны на небосводе. По мере своего старения звезды становятся более холодными и излучают все слабее, весьма напоминая затухающие угли костра. Белому карлику до полного остывания требуются миллиарды лет — время, сравнимое с возрастом современной Вселенной. Когда через триллионы лет от настоящего момента Вселенная вступит в эпоху распада, белые карлики достигнут холодной температуры жидкого азота. Дальнейшему охлаждению воспрепятствует необычный внутренний источник энергии, с которым мы познакомимся в этой главе несколько позже.

Любопытное свойство белых карликов иметь больший размер при



меньшей массе порождает еще один вопрос. Что происходит при последовательном уменьшении массы вырожденного звездного остатка? Этот объект просто постепенно увеличивается? Нет. Существует некоторый предел. По мере уменьшения массы и увеличения размера звезды уменьшается плотность материала. Как только плотность опускается ниже некоторого критического уровня, вещество перестает быть вырожденным и более не ведет себя столь алогичным образом. Когда масса звезды слишком мала, чтобы быть вырожденной, она ведет себя подобно обычному веществу. Таким образом, любой звездоподобный объект, чтобы быть вырожденным, должен иметь некоторую минимальную массу. Эта масса составляет примерно одну тысячную массы Солнца, что приблизительно равно массе Юпитера. Легкие объекты, масса которых не превышает одной тысячной массы Солнца, не выказывают свойств вырожденного вещества. Они ведут себя как обычное вещество и называются планетами.

С другой стороны, белые карлики не могут быть и слишком массивными. Слишком тяжелый белый карлик ожидает сильнейший взрыв. По мере возрастания массы белый карлик становится меньше и плотнее, вследствие чего для поддержания звезды в ее борьбе с противодействующей силой гравитации требуется более высокое давление. Для поддержания этого более высокого давления, в данном случае давления вырожденного электронного газа, частицы должны двигаться быстрее. Когда плотность достигает столь большого значения, что требуемая скорость частиц приближается к скорости света, у звезды начинаются крупные неприятности. Теория относительности Эйнштейна устанавливает строгий предел на любые скорости: никакие частицы не могут двигаться со скоростью, превышающей скорость света. Когда звезда достигает состояния, в котором частицы должны двигаться со скоростями, превышающими скорость света, она обречена. Гравитация побеждает давление вырожденного газа, провоцирует катастрофический коллапс, тем самым инициируя взрыв звезды — вспышку сверхновой. По величине эти эффективные вспышки можно сравнить с теми, что отмечают гибель массивных звезд (как мы уже рассказывали в предыдущей главе).

Чтобы избежать огненной кончины во вспышке сверхновой, белый карлик должен иметь массу, не превышающую 1,4 массы Солнца. Этот жизненно важный массовый масштаб именуется *массой Чандрасекара*, в честь выдающегося астрофизика С. Чандрасекара. В возрасте восемнадцати лет он путем вычислений нашел этот предел массы во время океанского путешествия из Индии в Великобританию, еще до начала учебы в аспирантуре Кембриджского университета в 1930-е годы. Впоследствии за свой вклад в астрофизику он получил Нобелевскую премию по физике.

## Нейтронные звезды

Несмотря на невероятно высокую плотность белых карликов, *нейтронная звезда* является еще более плотной формой звездного вещества. Типичная плотность белого карлика превышает плотность воды «всего лишь» в миллион раз. Однако ядра атомов гораздо плотнее — примерно в квадрильон ( $10^{15}$ ) раз плотнее воды, или в миллиард раз плотнее белого карлика. Если звезду сжать до невероятно высокой плотности атомного ядра, звездное вещество может достигнуть экзотической, но стабильной конфигурации. При этих высоких значениях плотности электроны и протоны предпочитают существовать в форме нейтронов, так что, по существу, все вещество пребывает в форме нейтронов. Эти нейтроны вырождаются, и давление, создаваемое ими, опять-таки в силу действия принципа неопределенности, сдерживает звезду от гравитационного коллапса. Нейтронная звезда, которая образуется в результате весьма напоминающего отдельное атомное ядро гигантских размеров.

Непостижимо высокие плотности, необходимые для образования нейтронной звезды, естественным образом достигаются во время коллапса, который массивная звезда переживает в конце своей жизни. Центральная область звезды, дошедшей до поздней стадии эволюции, превращается в вырожденное железное ядро, которое в ходе гравитационного коллапса сжимается, инициируя вспышку сверхновой, после которой зачастую остается нейтронная звезда. Кроме того, нейтронные звезды могут образоваться в результате коллапса белых карликов. Если белый карлик медленно увеличивает свою массу, приобретая ее от звезды-спутника, ему иногда удастся избежать гибели во вспышке сверхновой и сжаться, превратившись в нейтронную звезду.

По сравнению с белыми и коричневыми карликами нейтронные звезды встречаются относительно редко. Ведь они могут образоваться лишь в результате гибели звезд, масса которых при рождении более чем в восемь раз превышает массу Солнца. Эти массивные звезды представляют собой лишь высококассовый «хвост» распределения звездных масс. Подавляющее большинство звезд слишком малы. Лишь каждая четырехсотая звезда рождается достаточно большой, чтобы взорваться и оставить после себя нейтронную звезду. Но даже несмотря на столь малые шансы, достаточно большая галактика будет содержать миллионы нейтронных звезд.

Масса типичной нейтронной звезды примерно в полтора раза превышает массу Солнца. Так же, как в случае с белыми карликами, которые существуют благодаря давлению вырожденного электронного газа, давление вырожденных нейтронов не способно поддерживать остаток звезды произвольно большой массы. Если масса становится слишком

большой, гравитация побеждает давление вырожденного газа и звезда сжимается. Максимально возможная масса нейтронной звезды лежит в промежутке между двумя и тремя массами Солнца, однако точное ее значение нам не известно. При непостижимо высоких плотностях, которых достигает вещество в центре нейтронной звезды, оно приобретает весьма экзотические и несколько неопределенные свойства. Несмотря на то, что нейтронные звезды тяжелее Солнца, их радиус достаточно мал: всего десять километров. Маленький размер вкупе с большой массой говорит о невероятной плотности вещества. Кубический сантиметр вещества (размером с кусочек сахара), из которого состоит нейтронная звезда, весит почти столько же, сколько миллиард слонов!

### **Черные дыры**

Четвертым возможным вариантом гибели звезды является ее превращение в черную дыру. После взрыва и угасания самых массивных звезд может остаться объект, масса которого превышает допустимый максимум для нейтронной звезды (значение, находящееся между двумя и тремя массами Солнца). Достаточно массивный звездный остаток не может существовать за счет давления вырожденного газа и должен коллапсировать, превратившись в черную дыру. Аналогичным образом, полностью сформировавшиеся белые карлики и нейтронные звезды могут приобрести дополнительную массу, как правило от сопутствующих им звезд, и стать слишком большими, чтобы существовать за счет давления вырожденного газа. Слишком тяжелые остатки, которые появляются в результате этого, также должны коллапсировать и иногда могут образовать черные дыры.

Черные дыры — странные создания: их гравитационные поля так сильны, что их не может покинуть даже свет. Вообще-то, именно это свойство служит определяющей характеристикой черных дыр. Для этих объектов космическая скорость (скорость, которая требуется, чтобы оторваться от поверхности) превышает скорость света. В силу релятивистского ограничения скорости, наложенного Эйнштейном, — ничто не движется быстрее скорости света — черную дыру не могут покинуть ни частицы, ни излучение. И все же это несомненно строгое утверждение не является абсолютно истинным из-за действия принципа неопределенности Гейзенберга. По истечении весьма долгого времени черные дыры все же вынуждены будут отдать столь крепко удерживаемые в их тисках массы, но это случится лишь через большой срок по завершении эпохи распада.

Черные дыры невероятно компактны. Черная дыра с массой Солнца

имеет радиус всего в пару километров (около одной мили). В качестве другого примера отметим, что черная дыра размером с бейсбольный мяч приблизительно в пять раз тяжелее Земли. Эти выдающиеся звездные объекты имеют еще очень много других экзотических свойств, которые будут рассмотрены в следующей главе.

Массивные звезды встречаются относительно редко, а черные дыры, образуемые ими, — еще реже. Менее одной звезды из трех тысяч имеет шанс стать черной дырой после завершения того этапа ее жизни, на котором она сжигает водород. По причине такой скудности эти дублиеры звезд не будут играть важной роли, пока не завершится эпоха распада.

Помимо черных дыр, образовавшихся в результате гибели звезд, нашу Вселенную населяет еще одна разновидность этих объектов. Черные дыры, относящиеся к этому второму классу, находятся в центрах галактик. По сравнению с их звездными двойниками эти *сверхмассивные черные дыры* воистину огромны. Их масса составляет от одного миллиона до нескольких миллиардов масс Солнца. Для сравнения, фактический радиус черной дыры, масса которой равна массе миллиона Солнц, превышает радиус Солнца приблизительно в четыре раза.

## Сталкивающиеся галактики

В настоящее время наша Галактика, Млечный Путь, содержит сто миллиардов светящихся звезд, которые в совокупности выглядят как слабо светящаяся полоса, простирающаяся по ночному небу. В эпоху распада небо будет черным как смоль. Но самые большие галактики, удерживаемые от распада гравитационным действием холодных мертвых звезд и темной материи, останутся нетронутыми.

Однако самой неизбежной угрозой для обычных галактик типа Млечного Пути является вовсе не гибель составляющих их звезд, а скорее разрушительные столкновения с другими галактиками. Как правило, галактики существуют скоплениями или группами. От разлетания эти скопления удерживает действие гравитационного притяжения, причем каждая галактика движется через скопление по своей собственной орбите. Когда большие объекты с неплотной структурой, вроде галактик, проходят рядом друг с другом, они испытывают некоторого рода трение, заставляющее их сдвигаться к центру скопления. Вблизи центра скопления галактики располагаются относительно свободно и проявляют склонность к взаимным столкновениям.

Столкновения галактик окажут свое влияние на Вселенную уже в относительно близком будущем. Некоторые галактики сталкиваются

даже в наше время — в эпоху звезд. Когда же Вселенная вступит в эпоху распада, эти галактические взаимодействия будут иметь все более важные следствия.

При столкновении галактик звезды, принадлежащие к двум исходным галактикам, смешиваются, образуя более крупную, но и менее организованную, составную галактику. Смешанная составная галактика, в отличие от отдельных дисковых галактик с изящной спиральной структурой, хаотична и аморфна. Во время столкновения галактика выпускает длинные полосы звезд, которые также называются приливными хвостами. Орбиты звезд становятся сложными и нерегулярными. Смешанная галактика весьма напоминает кашу.

Столкновениям галактик часто сопутствуют мощные всплески образования звезд. Гигантские облака газа, находящиеся в пределах галактик, во время таких столкновений смешиваются и с поразительной скоростью рождают новые звезды. Многочисленные сверхновые, возникающие в результате гибели более массивных звезд, могут иметь весьма серьезные следствия.

Несмотря на то, что после столкновения структура галактики в целом выглядит совершенно по-другому, отдельные звезды и их солнечные системы его практически не ощущают. Галактика типа Млечного Пути — это, главным образом, пустое пространство: звезды в галактике подобны отдельным песчинкам, которые в любом направлении отделены друг от друга несколькими миллиардами пустоты. И даже в несколько более плотных слившихся галактиках расстояние между звездами превышает один световой год, что в тысячу раз больше Солнечной системы и в десять миллионов раз больше звезды. Планетарные системы, имеющиеся в переживающей столкновение галактике, даже не почувствуют медленную катастрофу, которая происходит вокруг них и продолжается миллионы лет. Самым заметным последствием подобной катастрофы для планеты типа Земли стало бы постепенное удвоение числа звезд, видимых на ночном небе.

На самом деле, Млечному Пути суждено пережить галактическое столкновение (и утратить свою индивидуальность) в относительно близком будущем. Соседняя с ним галактика Андромеда, также известная как М31, в настоящее время движется по траектории, которая приведет к столкновению с Млечным Путем. Однако из-за сложности проведения точных астрономических измерений скоростей галактик мы не можем точно определить направление, в котором движется Андромеда. Однако совершенно ясно, что эта крупная галактика пройдет очень близко от нашей Галактики и, возможно, даже столкнется с ней примерно через шесть миллиардов лет: как раз тогда, когда Солнце начнет раздувать-

ся, превращаясь в красного гиганта. Даже если Андромеда и Млечный Путь не столкнутся именно в эту будущую встречу, рано или поздно им все равно не избежать друг друга. Млечный Путь определенно находится в гравитационной связи с Андромедой. По мере того как две эти галактики движутся по орбите друг вокруг друга и из-за динамического трения теряется энергия, будущее слияние становится почти неизбежным.

Таким образом, долгосрочная судьба скоплений галактик предрешена полностью: галактики, входящие в скопление, в конечном итоге будут взаимодействовать и сольются. Их самостоятельные индивидуальности объединятся, когда все скопление превратится в одну гигантскую и беспорядочную коллекцию звезд. Когда Вселенная перейдет из эпохи звезд в эпоху распада, современные скопления галактик станут огромными галактиками будущего. В действительности вся наша местная группа галактик, включая Млечный Путь и Андромеду, постепенно превратится в единую метагалактику.

## Галактики в процессе релаксации

Промежутки между звездами в галактике типа Млечного Пути настолько огромны, что звезды пережили крайне мало прямых столкновений, если и пережили их вообще. По крайней мере, пока. Продолжая уже знакомую нам тему, скажем, что даже редкие события могут произойти, если предоставить им достаточно времени. По мере приближения эпохи распада столкновения звезд или события, близкие к ним, будут приобретать все большую важность. Такие встречи кардинальным образом изменяют структуру Галактики и, в конечном итоге, приведут к ее гибели. Однако, в силу того что эта эра разрушения наступит лишь в разгар эпохи распада, звезды к тому времени уже будут звездными остатками, а Галактика давным-давно как станет расплывшимся продуктом целого ряда галактических слияний.

Но даже в эпоху распада прямые лобовые столкновения звезд относительно редки. Сближения и близкие прохождения случаются гораздо чаще истинных столкновений. По мере развертывания эпохи распада звезды регулярно проходят рядом друг с другом, взаимодействуя через взаимное гравитационное притяжение. Близкое прохождение двух звезд приводит к небольшому изменению скорости и направления каждой из них. Звезды имеют тенденцию к взаимному разбросу всякий раз, когда оказываются рядом, что показано на рис. 14.

С течением времени происходит множество таких разбросов, а их эффекты медленно накапливаются. Конечным итогом длинной последова-

тельности подобных разбросов является перераспределение индивидуальных скоростей звезд, вращающихся по орбитам в пределах галактики. Более маленькие и легкие звезды имеют тенденцию к увеличению скорости и орбитальной энергии, тогда как более тяжелые звезды теряют орбитальную энергию. Когда в этом перераспределении «богатства» участвует много звезд, структура Галактики медленно изменяется в процессе *динамической релаксации*. По мере протекания этой релаксации некоторые звездные остатки приобретают столь большую энергию, что бывают вынуждены покинуть галактику. С течением времени из умирающей галактики испаряется все большее число звезд, которые, сталкиваясь, удаляются в межгалактическое пространство со скоростями, равными тремстам километров в секунду (675 000 миль в час).

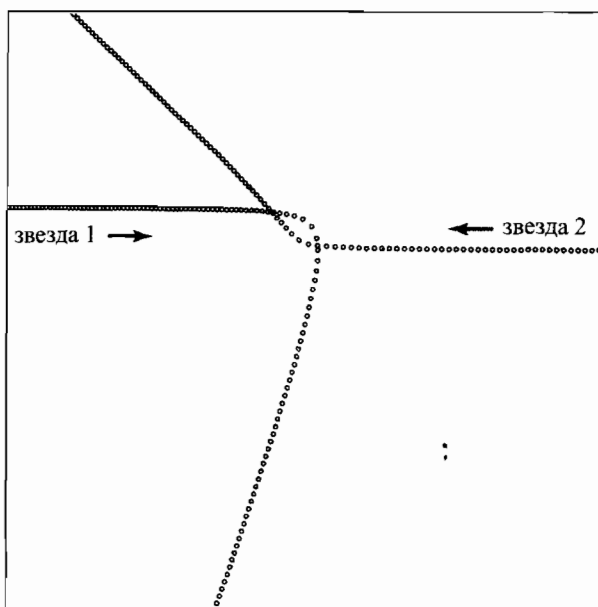


Рис. 14. На этой диаграмме показана реакция двух звезд на сближение. По завершении взаимодействия каждая звезда начинает двигаться в новом направлении, приобретает другое значение энергии, а следовательно, и скорость. Очень большое число подобных сближений приведет к динамической релаксации галактики и тем самым по истечении продолжительных промежутков времени изменит ее структуру

В ходе динамической релаксации число изгнанных звезд возрастает, из-за чего в галактике происходят важные структурные изменения. Поскольку галактику покидают звезды, имеющие максимальные энергии, оставшиеся звезды, в среднем, обладают меньшей энергией. Таким образом, происходит утечка энергии. В ответ на возрастающий энергетический кризис галактика вынуждена становиться меньше и плотнее. Это уменьшение галактики провоцирует еще большее число звездных сближений и изгнание все большего числа звезд. По мере ускорения этого процесса ситуация может выйти из-под контроля: галактика извергнет большую часть своих звезд, после чего их останется совсем мало и они будут сгруппированы в плотный комок.

Не слишком радужные перспективы ожидают низкоэнергетические звезды, которые упадут к центру галактики, где, как полагают ученые, имеется сверхмассивная черная дыра, причем это справедливо для каждой галактики. Эти гигантские черные дыры имеют массы, в миллионы или даже миллиарды раз превышающие солнечную. В процессе релаксации галактики черная дыра, расположенная в ее центре, поглотит блуждающие звезды, которые подойдут к ней слишком близко: окажутся в пределах горизонта событий. На протяжении всей эпохи распада эти сверхмассивные черные дыры будут постепенно увеличивать свой вес за счет непрерывного поглощения падающих звезд.

Галактики просуществуют в миллиарды раз дольше современного возраста Вселенной. Столь длительное время жизни обуславливается гигантскими расстояниями, разделяющими отдельные звезды и той медленной скоростью, с которой звезды их преодолевают. Однако по истечении достаточного времени и галактикам придется взглянуть в лицо своей гибели. В течение следующих девятнадцати или двадцати космологических декад ( $10^{19}$  или  $10^{20}$  лет) большинство мертвых звезд в галактике покинет ее в ходе процесса испарения звезд. Маленькую и невезучую часть звезд, быть может, порядка одного процента, поглотит черная дыра, расположенная в центре галактики. По завершении данного процесса динамической релаксации жизнь галактики, фактически, подходит к концу.

В ходе релаксации и рассеивания галактики сближения проходящих звезд оказывают разрушительное влияние на любые планеты, которые до сих пор вращаются по орбитам звезд. Эти события, изменяющие траектории движения звезд, имеют тенденцию смещать планеты с занимаемых ими орбит, в результате чего планеты уносятся в безбрежную пустоту космоса. О судьбе таких «беспризорных» планет мы рассказывали в предыдущей главе. Планеты, орбитальные радиусы которых сравнимы с радиусом нашей Земли, будут выброшены из своих сол-



нечных систем в пятнадцатую космологическую декаду. Внешние планеты с большими орбитами более чувствительны, в силу чего к тому времени они уже давно канут в вечность. Планета вроде Нептуна, орбитальный радиус которой равен тридцати астрономическим единицам, будет изгнана из солнечной системы всего через двенадцать космологических деkad — триллион лет. В эпоху распада даже самые внутренние планеты могут покинуть свои орбиты. Планета, орбита которой в десять раз меньше земной (несколько меньше орбиты Меркурия), будет выброшена с орбиты примерно через семнадцать космологических деkad. Таким образом, звезды утратят свои солнечные системы задолго до девятнадцатой—двадцатой космологической декады, когда они навсегда покинут галактику.

Таким образом, долгосрочное будущее планет вообще и нашей Земли, в частности, довольно безрадостно. В ближайшее время планеты попадут под обстрел кометами и астероидами, что вызовет глобальные изменения климата и катастрофические разрушения общего характера. После этого, когда родительские звезды внутренних планет раздуются до размера красных гигантов, эти планеты выгорят дотла и станут абсолютно стерильными. Потом все выжившие планеты будут силой выдворены из их солнечных систем и по одиночке выброшены в вечную тьму межзвездного пространства.

## **Столкновения вырожденных звезд**

Редкие прямые столкновения мертвых звездных остатков являют собой мгновения воистину экстраординарного волнения, подобные восклицательным знакам, расставляющим акценты на почти бесконечно пустынных просторах эпохи распада. Эти столкновения могут породить обыкновенные новые звезды, странные новые типы звезд и эффектные вспышки.

В эту будущую эпоху большая часть обычного барионного вещества галактики сосредоточена в белых карликах. И хотя в коричневых карликах, имеющих меньшую массу, содержится меньше вещества, их присутствует примерно столько же. В большой галактике типа Млечного Пути совокупная популяция белых и коричневых карликов должна исчисляться миллиардами. В процессе движения мертвых звезд по своим орбитам время от времени происходят прямые столкновения: примерно одно такое соударение в каждые несколько сотен миллиардов лет. Если принять во внимание современный возраст Галактики, порядка десяти миллиардов лет, велика вероятность (составляющая приблизительно девять десятых) того, что звездных столкновений пока не

было. Столкновения начнут происходить, когда Вселенной исполнится более нескольких сотен миллиардов лет. В пятнадцатую космологическую декаду галактику сотрясут сотни или даже тысячи столкновений.

Столкновения двух коричневых карликов интересны с точки зрения астрономии, геологии и, возможно, даже биологии. Большая доля оставшегося во Вселенной водорода заключена именно в коричневых карликах, которые не превращают его в более тяжелые элементы. Когда два коричневых карлика сталкиваются под углом, близким к прямому, они могут образовать составной звездный объект, который будет содержать основную часть исходной массы двух звезд (см. рис. 15). Если его объединенная масса превысит пороговое значение массы, которое должна иметь звезда, этот продукт взаимодействия может сжаться и нагреваться до тех пор, пока длительный водородный синтез не воспламенит новообразованное звездное ядро. Родится звезда. Маленькие красные звезды, образующиеся в результате таких причудливых столкновений, впоследствии проживут триллионы лет.

Посредством этих астрономических катастроф новые звезды могут создаваться даже тогда, когда в межзвездной среде уже давно закончились все запасы газа. В галактике размером с Млечный Путь в любое данное время будет светить порядка сотни таких звезд. Совокупное свечение этих тусклых красных остатков наделяет галактику общей мощностью излучения, сравнимой с мощностью излучения современного Солнца.

Кроме того, столкновения коричневых карликов могут породить планеты. Если только это не прямое лобовое столкновение, часть газа коричневых карликов закружится слишком быстро, чтобы стать частью вновь сформированной звезды. Это вращающееся вещество легко образует околозвездный диск из газа и пыли вокруг новорожденного звездного объекта. Поскольку образование планет является вероятным исходом выделяющегося диска, эти новые звезды имеют склонность порождать новые солнечные системы.

Планеты, образующиеся в результате столкновения двух коричневых карликов, должны иметь все ингредиенты, необходимые для развития жизни. Планета, находящаяся на попечении красного карлика, может оставаться теплой триллионы лет, много больше современного возраста Земли. Эти системы имеют большой запас тяжелых элементов, включая кислород и углерод, лежащие в основе земной жизни. На планетах, вращающихся по благоприятным орбитам, может иметься и жидкая вода. В принципе, знакомые типы жизни могут возникнуть и развиваться на подобных новых планетах, пока не распадется Галактика. И только по истечении двадцатой космологической декады, когда испарится Га-

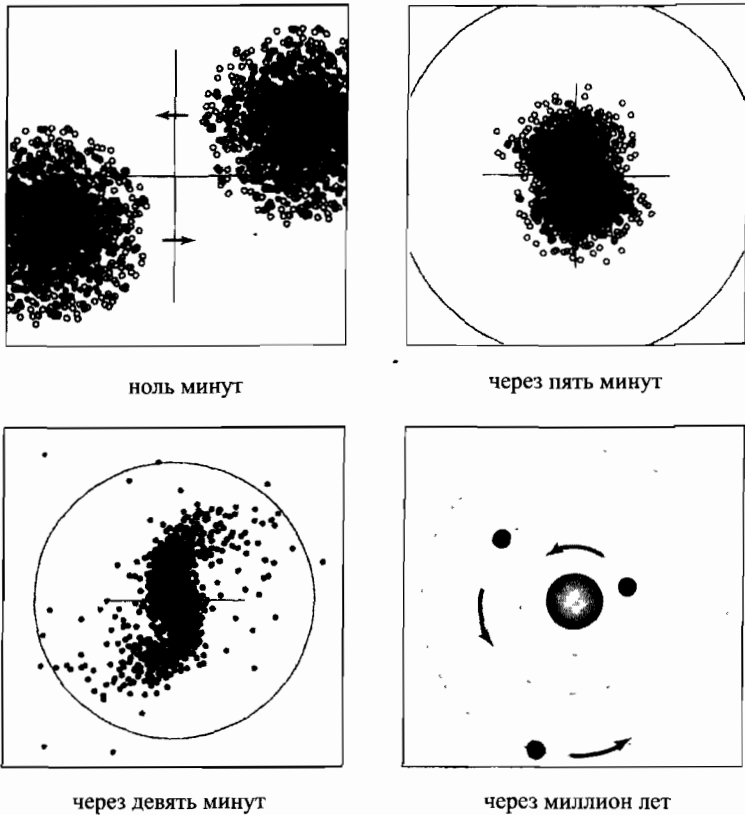


Рис. 15. Данная компьютерная модель изображает столкновение двух коричневых карликов. На трех первых картинках показаны первые несколько минут данного события. Окончательный результат столкновения, схематически изображенный на четвертой картинке, — настоящая звезда, масса которой достаточно, чтобы инициировать синтез водорода. Столкновение естественным образом создает газопылевой диск, окружающий новорожденную звезду; этот диск является средой, в которой могут образоваться планеты

лактика и частота столкновений коричневых карликов сведется к нулю, последние землеподобные миры падут жертвой вечной ночи.

Столкновения белых карликов могут вызвать еще более яркий, хотя и более краткий, фейерверк. Если столкнутся и сольются два белых карлика и если масса вновь образовавшегося объекта окажется

больше предела Chandrasekara, давление вырожденного газа не сможет удержать продукт этого слияния от гравитационного коллапса. Тогда недавно родившаяся, но чрезмерно тяжелая звезда должна будет вспыхнуть в сверхновую. Приблизительно одно из десяти столкновений белых карликов завершится вспышкой сверхновой. Таким образом, Галактике, покуда она остается в целостности и сохранности, на протяжении примерно двадцати космологических декад суждено переживать одну такую вспышку каждые триллион лет. Вспышки сверхновых и сегодня весьма эффектны, но в убогом окружении умирающей Галактики эпохи распада они будут воистину впечатляющими.

Однако наиболее вероятным исходом редкого столкновения двух белых карликов является не вспышка сверхновой, а образование звезды странного нового типа. Большинство белых карликов происходят от звезд низкой массы и практически полностью состоят из гелия. В результате столкновения двух таких типичных белых карликов образуется звездный объект несколько большего размера, состоящий из гелия. Если масса итогового продукта столкновения превышает 0,3 массы Солнца, гелий в его недрах, в принципе, может воспламениться. Такие звезды способны переплавлять гелий в более тяжелые элементы точно так же, как и развитые (старые) звезды с более высокой массой (что мы уже описывали в предыдущей главе). Однако чтобы звезда начала сжигать гелий, столкновение должно наделить ее достаточно большой тепловой энергией, что весьма напоминает обыденную для нас ситуацию, когда мы используем теплоту горящей спички, чтобы поджечь лист бумаги. Если температура звезды недостаточно высока, чтобы сжигать гелий, она сожмется и превратится в очередного белого карлика, блуждающего по Галактике в ожидании либо нового столкновения, либо изгнания в межгалактическое пространство.

По сравнению с их обыкновенными двойниками, существующими за счет горения водорода, эти звезды, сжигающие гелий, горячее, ярче, плотнее и живут куда меньше. Радиус типичной звезды, масса которой равна половине солнечной, в десять раз меньше радиуса Солнца, а ее светимость в десять раз больше. Поверхность такой звезды невероятно горяча: ее температура равна 35 000 градусов Кельвина, что примерно в шесть раз превышает температуру поверхности Солнца. В ядре звезды условия еще более экстремальные: температура в сто миллионов ( $10^8$ ) градусов и плотность почти в 10 000 граммов на кубический сантиметр. Эти звезды живут всего несколько сотен миллионов лет — долгий период по человеческим меркам, но всего лишь мгновение по сравнению с продолжительным временем их образования. Даже если вокруг этих звезд образуются планетарные системы, они, судя по всему,

не успеют увидеть развития на них сложной жизни в силу краткости своего существования. Если провести экстраполяцию по времени, которое потребовалось для развития сложных форм жизни на Земле, жизнь в этих системах вряд ли поднимется выше самых примитивных форм, представленных вирусами и одноклеточной биотой.

При столкновении несколько более тяжелых белых карликов может возникнуть звезда другого странного типа. Если масса продукта столкновения превысит 0,9 массы Солнца, но не достигнет предела Чандрасекара (в силу чего не взорвется), новый объект, в принципе, сможет поддерживать в своем ядре синтез углерода. Звезда, которая сжигает углерод, имеет еще более экзотические свойства, чем звезда, сжигающая гелий. Углеродная звезда с массой, равной солнечной, примерно в тысячу раз ярче Солнца, а ее поверхность кипит 140 000 градусами Кельвина. По звездным меркам радиус такая звезда имеет крошечный — чуть больше радиуса Земли. В ядре звезды температура приближается к миллиарду градусов, а его плотность в сто тысяч раз превышает плотность камня. Эти ярко горящие свечи живут всего миллион лет. Любые сопутствующие им планеты все еще будут находиться на самых ранних стадиях формирования, когда звезда истощит запасы своего ядерного топлива и погаснет. Вряд ли за это время сможет развиться хотя бы самая примитивная биосфера.

## Аннигиляция темной материи

Гало галактик состоят главным образом из темной материи, большая часть которой, видимо, существует в виде частиц небарионного вещества. Вспомним, что барионное вещество состоит, главным образом, из протонов и нейтронов, вследствие чего оно составляет большую часть того, что мы считаем обычным веществом. Как мы уже говорили в первой главе, современные астрономы полагают, что большая доля массы Вселенной должна приходиться на небарионное вещество. Причем считается, что значительное количество этой необычной материи находится в галактических гало.

Один из кандидатов на роль темной материи получил название *слабо взаимодействующих массивных частиц*. Эти довольно странные частицы, масса которых в десять–сто раз превышает массу протона, взаимодействуют только посредством слабого ядерного взаимодействия и гравитации. Они не несут электрического заряда, вследствие чего безразличны к действию электромагнитной силы. Они также не восприимчивы к сильному взаимодействию, в силу чего не связываются друг

с другом и не образуют ядер. Поскольку эти частицы взаимодействуют очень слабо, в рассеянных областях типа гало галактик они могут жить очень долго. В частности, они могут прожить куда дольше современного возраста Вселенной. Однако по истечении достаточно продолжительных промежутков времени эти частицы взаимодействуют с обычным веществом, что приводит к их взаимной аннигиляции.

Аннигиляция темной материи происходит при двух различных обстоятельствах. В первом случае, когда две частицы встречаются в галактическом гало, они могут вступить во взаимодействие, что приведет к их прямой взаимной аннигиляции. Во втором случае частицы захватываются остатками звезд, например белыми карликами, и впоследствии аннигилируют друг с другом уже внутри звездного ядра. Оба этих механизма играют важную роль в будущем Галактики и Вселенной.

В галактическом гало частицы темной материи имеют низкую плотность: порядка одной частицы на кубический сантиметр, — и достаточно большие скорости: около двухсот километров в секунду. Поскольку эти частицы ощущают только слабое взаимодействие, вероятность аннигиляции чрезвычайно мала. Однако по истечении двадцати трех космологических декад ( $10^{23}$  лет) из-за этих взаимодействий популяция частиц темной материи, населяющих гало, претерпит значительные изменения. При аннигиляции частицы темной материи обычно оставляют после себя более мелкие частицы с релятивистскими скоростями — настолько большими, что частицам удается преодолеть гравитационное притяжение Галактики. Таким образом, конечным результатом процесса аннигиляции является излучение массы-энергии галактического гало в межгалактическое пространство.

Поскольку наличием темной материи объясняется большая доля общей массы Вселенной, продукты аннигиляции от взаимодействий темной материи служат важной частью содержимого Вселенной в поздние эпохи, особенно между двадцатой и сороковой космологическими декадами. Остаточные продукты прямых аннигиляционных событий в галактических гало обеспечивают огромное разнообразие частиц, включая фотоны, нейтрино, электроны, позитроны, протоны и антипротоны.

Темную материю захватывают звездные остатки типа белых карликов. Темная материя галактических гало обеспечивает фоновое море частиц, непрерывно текущих сквозь космическое пространство. Эти частицы также проходят через все объекты, имеющиеся в галактике: звезды, планеты и, в настоящую космологическую эпоху, людей. Порядка ста миллиардов ( $10^{11}$ ) таких частиц пронизывают тебя, читатель, ежесекундно. Однако в силу того, что эти частицы взаимодействуют только

посредством слабого взаимодействия, а оно действительно *очень* слабое, они пронизывают все типы вещества, не оказывая на нее, в сущности, никакого воздействия. Однако время от времени частица темной материи вступает во взаимодействие с ядром какого-нибудь атома и тем самым лишает его некоторой доли энергии.

Если такое взаимодействие произойдет в недрах белого карлика, частица темной материи может остаться в гравитационной связи со звездой. По прошествии длительного времени популяция таких частиц внутри звездного объекта постепенно увеличивается. Время, необходимое для того, чтобы темная материя была захвачена в ходе именно такого процесса, много длиннее водородной части жизни звезд, которые почти все это время ведут жизнь звездных остатков. По мере увеличения в звездном ядре концентрации частиц темной материи возрастает вероятность аннигиляции этих частиц. В конце концов, звезда достигает устойчивого состояния, в котором аннигиляция в звездном остатке происходит с той же скоростью, с которой частицы захватываются из галактического гало.

Процесс захвата и аннигиляции темной материи служит жизненно важным источником энергии для белых карликов будущего. Эти звездные объекты являются остатками звезд, погибших после завершения реакций термоядерного синтеза в их недрах. В отсутствие дополнительного источника энергии белые карлики становились бы более холодными и тусклыми, пока их температура не сравнялась бы с фоновой температурой Вселенной. Однако благодаря энергии, которую они извлекают из аннигиляции темной материи, белые карлики могут излучать энергию на протяжении очень долгого времени. Полная мощность излучения одного белого карлика, обусловленная этим процессом аннигиляции, составляет приблизительно один квадрильон ( $10^{15}$ ) ватт. И хотя эта незначительная мощность примерно в сто миллиардов ( $10^{11}$ ) раз меньше мощности излучения Солнца, именно этот механизм производства энергии будет править Вселенной в будущем. Такая выработка энергии может продолжаться, пока галактическое гало остается целым — примерно на протяжении двадцати космологических декад ( $10^{20}$  лет) или в десять миллиардов раз дольше того периода, на протяжении которого Солнце будет сжигать водород.

Частицы темной материи, захваченные белыми карликами, в конечном итоге, аннигилируют в излучение, которое, в конце концов, начинает преобладать в фоновом поле излучения Вселенной. Однако, прежде чем покинуть звезду, это излучение переходит в диапазон более длинных волн, а значит, и более низких средних значений энергии. Фотоны поки-

дают поверхность звезды, имея характеристическую длину волны около пятидесяти микрон (одна двадцатая миллиметра) — значение, в сто раз превышающее длину волны света, испускаемого Солнцем. Это излучение невидимо для человеческого глаза, но современная аппаратура без особого труда улавливает эти инфракрасные фотоны. Температура поверхности звезды невысока — всего 63 градуса Кельвина — чуть ниже температуры жидкого азота.

В эту эпоху будущей истории Вселенной галактики будут выглядеть совсем не так, как сегодня. Типичная галактика будущего содержит миллиарды звездных остатков, каждый из которых излучает энергию вследствие процессов захвата и аннигиляции темной материи. При этом полная мощность излучения целой галактики таких звездных остатков сравнима с мощностью излучения одного нашего Солнца. Среди этих тлеющих остатков разбросано порядка сотни более традиционных звезд, образовавшихся в результате столкновений коричневых карликов. И хотя, по современным меркам, эти маленькие звезды светят довольно тускло, в непроглядной тьме будущего они будут истинными маяками. Совокупная мощность излучения, вырабатываемого этими немногочисленными настоящими звездами, затмит миллиарды белых карликов.

## **Жизнь в атмосфере белого карлика**

Несмотря на то, что известные нам формы жизни вполне могут оказаться под угрозой гибели, занятная возможность для жизни в будущем существует в атмосферах старых белых карликов. Не будем забывать, что любое обсуждение будущих форм жизни непременно уводит нас в область предположений. Однако следующая цепочка суждений не только вызывает определенный интерес, но и ясно описывает физические условия, которые будут существовать внутри белых карликов в далеком будущем.

После смерти исходной звезды белый карлик быстро остывает, пока его главным источником энергии не станет захват и последующая аннигиляция частиц темной материи. Как только это произойдет, белый карлик переходит в более или менее устойчивое состояние, в котором он будет находиться до тех пор, пока не закончится вся темная материя, имеющаяся в галактическом гало, или пока сама звезда не будет исторгнута из галактики в процессе ее динамической релаксации. В любом случае типичные белые карлики имеют около двадцати космологических декад ( $10^{20}$  лет) на то, чтобы в пределах их атмосферы развилась жизнь. Этот огромный временной промежуток в сто миллиардов раз



превышает время, которое потребовалось для развития жизни на Земле. При наличии столь долгого времени возможность биологической эволюции какого-либо типа становится весьма правдоподобной, а возрастание сложности, — быть может, даже вероятным.

В некоторых аспектах сценарий для жизни на белом карлике смутно напоминает жизнь на Земле. Белый карлик имеет приблизительно такой же радиальный размер, что и Земля. Как земные формы жизни ограничиваются областями, расположенными вблизи поверхности нашей планеты, так и любые возможные формы жизни в атмосфере белого карлика тоже будут находиться во внешних слоях звезды. Внутренняя часть звезды состоит из вырожденного вещества, и химические реакции в недрах звезды не происходят. Интересная химия может быть связана только с внешним слоем. Источником энергии для белого карлика служит поле излучения, нагревающее поверхностные слои изнутри, тогда как Земля получает тепло сверху — от Солнца. Самое важное различие состоит в том, что жизнь на Земле основана на наличии жидкой воды, тогда как в атмосфере белого карлика жидкой воды практически не будет. В окружающей среде белого карлика самое большее, на что можно надеяться, — это существование химических реакций какого-нибудь типа.

Первым требованием для существования жизни является надлежащая смесь химических элементов. Белые карлики с более высокой массой естественно содержат большие количества двух самых важных для земных организмов элементов — углерода и кислорода. Самые маленькие белые карлики, масса которых не превышает и половины солнечной, напротив, состоят практически из одного гелия. Гелий практически абсолютно химически инертен, а потому не желателен для окружающей среды, в отношении которой мы питаем надежду на возникновение жизни. Таким образом, у более крупных белых карликов шансы приютить на себе биосферу значительно выше.

На протяжении долгого промежутка времени температура поверхности белого карлика равна примерно 63 градусам Кельвина, что очень близко к температуре жидкого азота. В недрах звезды несколько горячее, хотя и ненамного. Основная часть внутренних областей белого карлика заполнена вырожденным веществом, в силу чего тепло легко распространяется из внутренних областей к наружным. Благодаря этому относительно легкому переносу тепла, звезда достигает почти постоянной температуры на протяжении практически всей своей внутренней области. Однако внешние слои звезды, близкие к ее поверхности, состоят не из вырожденного, а из обычного вещества.

Самый верхний слой звезды, в принципе, способен поддерживать

химические реакции и имеет доступ к обширному диапазону энергий фотонов, которые эти реакции запускают. Аннигиляция темной материи, которая происходит в ядре звезды, производит высокоэнергетическое излучение — гамма-лучи, энергия которых достигает миллиардов электронвольт. Пока это излучение добирается до верхних слоев звезды, его волны становятся длиннее, а энергия фотонов, соответственно, уменьшается. На внешней поверхности звезды энергия фотонов, в среднем, составляет некоторую долю электронвольта. Для сравнения скажем, что в химических реакциях типичные значения энергии на частицу составляют несколько электронвольт. Таким образом, в атмосфере белого карлика имеется именно тот диапазон энергий фотонов, который необходим для запуска химических реакций.

А как насчет совокупного энергетического запаса такой звезды? Белый карлик, существующий за счет аннигиляции темной материи, вырабатывает энергию, равную порядка  $10^{15}$  ватт. Эта мощность излучения мала по сравнению со светимостью современного Солнца, но достаточно велика по сравнению с совокупной мощностью, которую вырабатывает вся человеческая цивилизация. В качестве другого сравнения отметим, что доля солнечной энергии, которую воспринимает Земля, составляет около  $10^{17}$  ватт. Другими словами, мощность, необходимая для запуска биологической эволюции в атмосфере белого карлика, составляет один процент от полной мощности, доступной земной биосфере в наши дни.

Зайдем в этом мысленном эксперименте еще дальше, приблизительно-но оценим вероятность существования в атмосферах белых карликов каких-либо форм жизни. Следуя примеру Фримена Дайсона, предположим, что жизнь подчиняется некой разновидности закона соответствия масштабов, что, в свою очередь, означает, что субъективное время, которое ощущает живое существо, зависит от температуры, при которой оно функционирует. В случае более низких температур жизнь течет медленнее, поэтому на ощущение того же числа мгновений сознания у такого существа будет уходить больше времени.

Что касается нашей гипотетической биоты, развивающейся вблизи поверхности белого карлика, ее окружающая температура должна быть около 63 градусов Кельвина, что примерно в пять раз меньше, чем температура млекопитающих. Гипотеза соответствия масштабов гласит, что такому существу требуется в пять раз больше реального (физического) времени, чтобы пережить такое же фактическое «количество» жизни. Таким образом, по сравнению с жизнью на Земле, жизнь в атмосфере белого карлика теряет коэффициент пять в силу того, что имеет меньшую скорость метаболизма, а также коэффициент сто в силу того, что имеет меньшую мощность. Эта потеря коэффициента 500 более чем компенсируется имеющимся в наличии временем, которое в сто миллиардов раз длиннее. Объединяя эти два конкурирующие действия, мы полагаем,

что жизнь в атмосфере белого карлика имеет численное преимущество примерно в сто миллионов. Даже если эволюция жизни в атмосфере белого карлика в сто миллионов раз менее эффективна, чем биологическая эволюция на Земле, эта звезда все равно располагает такими временем и энергией, которых достаточно, чтобы породить целую сеть различных форм жизни, по своему масштабу сравнимую с биосферой сегодняшней Земли.

Однако наше понимание жизни и эволюции далеко от полного. Данная линия экстраполяции служит не строгим предсказанием, а скорее интересной возможностью. Атмосферы белых карликов располагают достаточно большим источником энергии и воистину огромным количеством времени. В такой среде возникновение интересной химии, в принципе, возможно. Хотя, вообще, мы не можем гарантировать, что время, энергия и химия являются достаточными условиями для появления биологии. Однако в единственном известном нам примере интересная химия привела к эволюции жизни. Реализуется ли такая возможность в будущем — нам не известно.

## **Жизнь за пределами атмосферы белого карлика**

Можно представить и более традиционную точку зрения на существование жизни в будущем. Белые карлики, живущие за счет захвата и аннигиляции частиц темной материи, обеспечивают фактическую светимость в  $10^{15}$  ватт. Этот достаточно большой объем мощности испускает поверхность звезды, по размеру сравнимой с Землей. Пожелай какая-нибудь будущая цивилизация использовать эту энергию, она могла бы окружить эту звезду сферической оболочкой, которая улавливала бы излучаемую ею энергию. Такое предприятие потребовало бы развертывания строительства планетарного масштаба — дорогая, но вполне осуществимая для высокоразвитой цивилизации цель.

В подобных системах белых карликов полная имеющаяся мощность значительно превышает ту мощность, которая в настоящее время вырабатывается и расходуется нашей цивилизацией на Земле. Эту номинальную мощность белых карликов можно включить в перспективу еще одним способом. Предположим, что цивилизация, живущая вблизи белого карлика, насчитывает миллиард граждан. Тогда каждый член этого общества имел бы доступ к одному полному мегаватту мощности: этого достаточно, чтобы на полную громкость работали десять тысяч стереомагнитофонов. Более того, такая поставка энергии может продолжаться двадцать космологических декад (сто миллиардов миллиардов лет) — значительно больше тех двухсот лет, за которые мы полностью исчерпаем запасы ископаемого топлива на нашей Земле.

## Рост черных дыр

В эпоху распада черные дыры увеличиваются и становятся более массивными. Они набирают массу, пожирая звезды и газ, которые оказываются в опасной близости к «поверхности» черной дыры — горизонту событий. Как мы увидим из следующей главы, в конечном итоге черные дыры должны отдать свою гигантскую массу посредством испускания излучения, но это случится много-много позже того момента, когда наступит и завершится эпоха распада. А пока они продолжают набирать вес.

В принципе, сверхмассивные черные дыры могут поглотить всю галактику, в которой живут. Сколько времени занял бы этот процесс? Если бы черная дыра весом в один миллион Солнц, вроде той, что находится в центре Млечного Пути, поглотила звезды случайным образом, она всосала бы в себя всю нашу Галактику приблизительно за тридцать космологических декад (миллион триллионов триллионов лет). Если бы черная дыра изначально имела гораздо бóльшую массу, скажем в один миллиард Солнц, она успела бы погубить Галактику за куда более короткий срок — примерно за двадцать четыре космологические декады. Как бы то ни было, оба этих периода куда длиннее предполагаемого времени жизни галактик. Как мы уже говорили, звезды, образующие галактики, испарятся в межгалактическое пространство по истечении всего лишь двадцати космологических декад. В результате этого большинству звезд удастся избежать «ярости» черных дыр, но некоторые из них все же погибнут именно так.

Однако и черные дыры, и многочисленные остатки звезд будут существовать и после исчезновения галактик. По прошествии приблизительно двадцати космологических декад черные дыры и остатки звезд принадлежат к своему местному сверхскоплению, следующей по иерархии крупномасштабной структуре, к которой когда-то принадлежала галактика. Эта более крупная структура остается связанной силами гравитации и ведет себя в некотором роде как гигантская галактика. Черные дыры, по меньшей мере по одной на бывшую галактику, принадлежавшую к данному скоплению, будут блуждать по этому скоплению, поглощая звезды и прочее встречающееся им вещество. Таким образом, черные дыры продолжают наращивать массу и увеличиваться

В отсутствие противодействующих физических эффектов динамические процессы испарения звезд, гравитационного излучения (см. главу 4) и поглощения звезд черными дырами будут продолжаться в еще больших пространственных и, соответственно, временных масштабах. Конец этой иерархии должен наступить с завершением эпохи распада.

Остатки звезд и все, что мы считаем обычными веществом, образованы протонами. А по истечении огромного периода времени характер этих самых протонов изменится до неузнаваемости.

## Распад протона

Один из сюрпризов, преподнесенный нам физикой частиц во второй половине двадцатого века, состоит в том, что протон, оказывается, не вечен. Протоны, на протяжении продолжительного времени считавшиеся стабильными и бесконечно долго живущими частицами, как оказалось, по истечении достаточно долгого времени могут распасться на более мелкие частицы. В сущности, протонам свойственна экзотическая разновидность радиоактивности. Они излучают более мелкие частицы и превращаются в нечто новое. Этот процесс распада займет невероятно долгое время, значительно превышающее современный возраст Вселенной, значительно превышающее время жизни звезд и даже намного превышающее время жизни галактик. Однако, по сравнению с вечностью, протоны исчезнут довольно скоро.

Как это возможно? Мы уже знакомы с позитроном — несущим положительный заряд антиматериальным партнером более привычного нам электрона. Можно предположить, что в результате распада протона должен появляться позитрон и дополнительно выделяться определенная энергия, поскольку масса протона почти в две тысячи раз больше массы позитрона. Таким образом, позитрон представляет собой состояние с более низкой энергией. Один из фундаментальных физических принципов гласит, что все системы эволюционируют в направлении состояний с более низкой энергией. Вода стекает с холма. Возбужденные атомы испускают свет. Легкие ядра типа водорода в ходе синтеза превращаются в более тяжелые, от гелия и до железа, потому что более крупные ядра имеют более низкую энергию (на частицу). Большие ядра вроде урана являются радиоактивными и распадаются на более мелкие ядра с более низкой энергией. Так почему протоны не могут распасться на позитроны или другие маленькие частицы?

На самом фундаментальном уровне многие физические теории имеют неотъемлемый закон, запрещающий распад протонов, даже несмотря на то, что в результате этого распада они могли бы перейти в состояние с более низкой энергией. Кратко этот закон можно сформулировать так: *барионное число* всегда сохраняется. Протоны и нейтроны состоят из обычного вещества, которое мы зовем барионным. Каждый протон или нейтрон содержит одну единицу барионного числа. Частицы типа электронов и позитронов имеют нулевое барионное число, равно как

и фотоны, частицы света. Таким образом, если протон распадается на позитроны, в этом процессе происходит потеря барионного числа.

Однако в более новых версиях теорий частиц имеется лазейка. Закон, запрещающий распад протона, иногда может нарушаться, но исключительно иногда. На практике этот кажущийся оксюморон<sup>1</sup> означает, что протоны распадутся по истечении очень долгого времени, намного превышающего современный возраст Вселенной.

Распад протона может пойти по множеству разных путей, вследствие чего могут получиться много разных продуктов этого распада. Один из типичных примеров изображен на рисунке 16. В этом случае протон распадается на позитрон и нейтральный пион, который впоследствии распадется на фотоны (излучение). Возможны и многие другие пути распада. Все разнообразие продуктов этого распада и их популярностей нам пока не известно.

Читатель может спросить, а почему, собственно, мы обсуждаем распад именно протона, а не нейтрона. Дело в том, что нейтроны, находящиеся внутри ядра, распадаются примерно через тот же период времени. Свободные же нейтроны живут не слишком долго. Нейтрон, предоставленный самому себе, распадается на протон, электрон и антинейтрино примерно через десять минут. Такой способ распада не разрешен для нейтронов, связанных в атомные ядра. Связанные нейтроны могут пережить лишь долгосрочные способы распада, аналогичные путям распада протона.

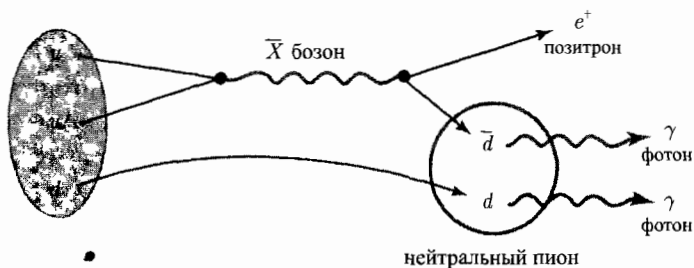


Рис. 16. Здесь изображен один из возможных путей распада протона. В данном случае конечным результатом распада протона является позитрон (античастица электрона) и нейтральный пион. Пион крайне нестабилен и быстро превращается в излучение (т.е. распадается на фотоны). Если такой распад происходит в плотной среде типа белого карлика, позитрон быстро аннигилирует с электроном, образуя еще два высокоэнергетических фотона

<sup>1</sup>Сочетание противоположных по значению слов. — *Прим. пер.*

Современная физика не дает точного определения среднего времени жизни протона. Простейшая версия этой теории предсказывает, что протон распадется примерно через тридцать космологических декад ( $10^{30}$  лет, или квадрильон квадрильонов лет). Однако это простое предсказание уже было опровергнуто экспериментами, которые показывают, что время жизни протона должно превышать тридцать две космологические декады. Распад протона предсказывает *теория великого объединения* — теория, объединяющая сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия. Эти теории связаны с невероятно высокими энергиями, которые существовали в нашей Вселенной только в первые несколько мгновений после Большого взрыва. Энергии самых больших ускорителей частиц в миллиарды раз меньше тех, что требуются для изучения этого интересного физического режима. В результате этого физики пока не располагают окончательной версией теории великого объединения. В настоящее время изучается много возможных вариантов, причем все они дают разные предсказания относительно времени жизни протона.

Если принять во внимание, что Вселенной всего десять миллиардов лет, мысль о том, чтобы провести опыт по измерению времени в квадрильон квадрильонов лет (тридцать космологических декад), выглядит практически нереальной. Однако, если иметь общее представление о процессе радиоактивного распада, становится понятной лежащая в ее основе идея. Все частицы, в данном случае протоны, не живут в течение какого-то определенного времени, по истечении которого одновременно распадаются. Напротив, существует вероятность распада частиц *в любое время*. В силу того что вероятность такого распада ничтожно мала, большинство частиц доживет до глубокой старости. Время жизни частицы — это *среднее* время, которое проживают частицы, а никак не *реальное* время, отпущенное каждой из них. Всегда будут частицы, которые распадутся рано. И эту разновидность младенческой смертности среди частиц можно измерить опытным путем.

Чтобы обнаружить процесс распада, нужно большое количество частиц. Для пушей ясности предположим, что мы хотим измерить распад протона, предполагаемое время жизни которого составляет  $10^{32}$  лет. Если взять большой резервуар, содержащий  $10^{32}$  протонов (в его качестве вполне может выступить небольшой плавательный бассейн двадцать метров в длину, пять в ширину и два в глубину), то в пределах этого экспериментального аппарата будет распадаться приблизительно один протон в год. Если бы нам удалось создать чувствительные инструменты, позволяющие зарегистрировать каждый такой распад, то нам оставалось бы только подождать несколько лет, по истечении которых наше измерение можно было бы считать законченным. На практике же эти измерения сопряжены с несколько более замысловатыми экспери-

ментальными проблемами, но основная идея при этом вполне понятна. В частности, чтобы узнать ответ на поставленный нами вопрос, совсем необязательно ждать  $10^{32}$  лет. Эксперименты такого типа уже показали, что время жизни протона превышает  $10^{32}$  лет. В настоящее время эксперименты по обнаружению распада протона продолжаются.

Распад протона можно предсказать в очень общих терминах. В ранней Вселенной какой-то процесс, протекавший с нарушением барионного числа, создал вещество, которое мы наблюдаем в современной нам Вселенной. Вспомним, что небольшой избыток вещества над антивеществом образовался в первую микросекунду истории космоса. Количество вещества во Вселенной может превышать количество антивещества только в том случае, если в результате какого-то физического процесса образуется дополнительное барионное число. Но если может иметь место подобный процесс, в ходе которого нарушается закон сохранения барионного числа, значит, протоны обречены на гибель. Тогда распад протона — это лишь вопрос времени.

Возможные пути распада протона, упомянутые до сих пор, не включают четвертой силы природы — гравитации. Вместе с тем именно сила гравитации управляет дополнительным механизмом распада протона. На самом деле, протон не является неделимой частицей: он образован тремя составляющими частицами, которые носят название кварков. Кварки в протоне не пребывают в покое: они находятся в состоянии постоянного возбуждения. Хоть и очень-очень редко, но они все же могут занять почти одно и то же положение внутри протона. Как только такое сходжение происходит, если кварки оказываются достаточно близко друг к другу, они могут слиться в микроскопическую черную дыру. Оценки среднего времени, которое потребуется протону, чтобы туннелировать в миниатюрную черную дыру, весьма разнятся: от сорока пяти до ста шестидесяти девяти космологических декад, причем предпочтение отдается меньшему концу этого диапазона. Нет нужды говорить, что этот процесс еще недостаточно хорошо изучен, вследствие чего соответствующее ему время жизни протона может быть названо только в очень грубом приближении. Но если только протоны не распадутся еще раньше, им суждено исчезнуть в ходе этого процесса — принять смерть от силы гравитации.

Как мы расскажем в следующей главе, черные дыры тоже не вечны. Причем маленькие черные дыры живут гораздо меньше больших. После самостоятельного превращения протона в черную дыру он почти мгновенно испарится, оставив после себя позитрон. Таким образом, протон служит еще одним полем боя гравитации и термодинамики. Из-за неослабевающего действия гравитации, рано или поздно, она может спровоцировать гибель протонов и образование крошечных черных дыр.



Но этот явный триумф гравитации недолговечен. Черные дыры испаряются сразу после их появления. Большая часть массы-энергии протона уходит в излучение, энтропия высвобождается во Вселенную, и термодинамика празднует окончательную победу.

Существует еще один, даже более экзотический, механизм распада протонов. Вакуумные конфигурации пустого пространства могут иметь более одного возможного состояния. В принципе, вакуум способен самопроизвольно изменять свою конфигурацию в ходе процесса квантово-механического туннелирования. Поскольку переходы вакуума из одного состояния в другое вызывают изменения барионного числа, они могут послужить спусковым крючком для протонного распада. Однако подобные переходы сильно подавлены, вследствие чего они требуют огромного времени. В отсутствие более быстрого пути распада протоны будут разрушены под действием этого механизма в сто сороковую–сто пятидесятью космологическую декаду.

## Судьба вырожденных остатков

Заключительная глава звездной эволюции являет себя в распаде протонов. Хотя истинное время жизни протона опытным путем измерено не было, в данной книге мы принимаем, что типичное время жизни протона составляет тридцать семь космологических декад (десять триллионов триллионов триллионов лет). Когда протоны распадаются внутри звезды, например внутри белого карлика, образовавшаяся энергия пополняет энергетические запасы этой звезды. Наиболее распространенными продуктами этого распада являются позитрон и пион, причем последний мгновенно распадается на высокоэнергетические гамма-лучи. Позитрон быстро находит электрон, и две эти частицы аннигилируют, образуя еще два высокоэнергетических фотона гамма-излучения. Таким образом, в конечном итоге *масса покоя* протона превращается в гамма-излучение, нагревающее звезду. Следовательно, распадающиеся протоны обеспечивают звезду внутренним источником энергии, только вот цена этого невероятно высока: чтобы создать тепло и свет, звезда должна отдать свою собственную массу покоя.

Белый карлик, существующий за счет распада протона, имеет светимость примерно в четыреста ватт: этого едва хватит на то, чтобы поддержать свечение нескольких электрических лампочек. Светимость целой галактики таких звезд в десять триллионов раз меньше светимости нашего Солнца. Даже если сложить мощности излучения всех звезд во всех галактиках, которые в настоящее время попадают в пределы нашего космологического горизонта, получившаяся светимость все равно будет в сто раз меньше светимости нашего Солнца. Да уж, такое будущее вряд ли можно назвать светлым.

Излучение внутри белого карлика будет рассеиваться много раз, прежде чем доберется до поверхности звезды. В эту будущую эпоху температура поверхности белого карлика составит всего 0,06 градусов Кельвина — примерно в сто тысяч раз холоднее Солнца. Так что эти четырехсотваттные лампочки вряд ли сгодятся в качестве настольных. Они испускают излучение, характеристическая длина волны которого равна пяти сантиметрам — приблизительно в пятьдесят тысяч раз длиннее тех волн, которые способен уловить глаз человека.

Во время эволюционной фазы распада протона химический состав белого карлика изменяется до неузнаваемости. Предположим, что мы начали со звезды, состоящей из чистого углерода. Каждое ядро углерода содержит шесть протонов и шесть нейтронов. По мере распада протонов и нейтронов ядра становятся меньше и содержат меньшее количество частиц. В ходе этого процесса исходные ядра углерода сокращаются до одной частицы, и звезда завершает свой жизненный цикл в виде чистого водорода.

Эту простую картину несколько осложняют две вещи. Во-первых, высокоэнергетическое излучение, которое выделяется в результате распада протона, может высвободить из ядер другие протоны и нейтроны. Эти освобожденные частицы, как правило, отказываются от своей вновь обретенной свободы и объединяются с другими ядрами. В среднем, каждый распад протона сопровождается одним переходом дополнительного протона или нейтрона от одного ядра к другому. Таким образом, мы получаем своего рода ядерную чехарду.

Второй проблемой является холодный синтез. Даже при низких температурах, в данном случае не превышающих один градус ниже абсолютного нуля, иногда, из-за принципа неопределенности Гейзенберга, могут синтезироваться ядра. По причине волновой природы частиц определить точное место их положения не представляется возможным. В результате два ядра иногда оказываются достаточно близко друг к другу, чтобы синтезировать более тяжелое ядро. В недрах белого карлика, который в миллион раз плотнее Земли, холодный синтез водорода занимает всего сто тысяч лет, а углерода — около двухсот космологических декад ( $10^{200}$  лет). Таким образом, белые карлики имеют тенденцию сохранять гелиевый состав. Однако приведенные временные интервалы настолько велики, что холодный синтез не оказывает значительного влияния на эволюцию белого карлика во время фазы протонного распада, которая произойдет через  $10^{37}$  лет. Ясно также и почему холодный синтез не играет хоть сколько-нибудь интересной роли в современной Вселенной.

По мере того как в ходе распада протонов белый карлик продолжает терять массу, его строение претерпевает заметные изменения. Из-за

алогичной природы вырожденного вещества радиальный размер белого карлика увеличивается по мере уменьшения его массы. Когда звезда расширяется, ее плотность уменьшается, и вещество, в конечном итоге, перестает быть вырожденным. Этот переход происходит, когда масса звезды уменьшается до массы Юпитера — приблизительно в тысячу раз меньше массы Солнца. На этом этапе эволюции звезда имеет плотность воды и радиус в десять раз меньший, чем у Солнца. Звезда состоит из застывшей массы атомов водорода: этаким огромный шар из ледяного водорода.

После исчезновения вырожденного состояния кристаллический белый карлик продолжает уменьшаться до тех пор, пока не станет настолько маленьким, что более уже не сможет выполнять функции звезды. Этот финальный переход становится концом звездной эволюции. По-настоящему звезда умирает тогда, когда становится прозрачной, когда излучение, распространяющееся внутри звезды может свободно, без рассеивания отрываться от нее. В этот поворотный момент масса звезды составляет всего  $10^{24}$  граммов — примерно в шесть тысяч раз меньше массы Земли.

Таким образом, большинству звезд на предпоследнем этапе эволюции суждено превратиться в водородную глыбу, размер которой примерно в семьдесят раз меньше Луны. По мере того как процесс распада протона подходит к завершению, эта глыба продолжает испаряться. Таким образом, становится понятна окончательная судьба белых карликов: от них не остается ничего. Вся энергия звезды, в конечном итоге, излучается в межзвездное пространство. И вновь термодинамика, в конечном итоге, побеждает гравитацию.

Нейтронные звезды, эти редкие и плотные родичи белых карликов, испаряются аналогичным образом. Распад протона обеспечивает нейтронные звезды примерно такой же полной светимостью: около четырехсот ватт. Нейтронные звезды при этом намного меньше белых карликов. Поэтому чтобы иметь такую же мощность излучения, поверхность этих звезд должна быть горячее: около трех градусов Кельвина в случае типичной нейтронной звезды. Примерно такую температуру имеет современное реликтовое излучение, определяющее минимальную температуру, имеющуюся во Вселенной в наши дни. В период же с тридцать седьмой по тридцать девятую космологические декады нейтронные звезды, испускающие слабый свет при температуре в три градуса Кельвина, будут одними из самых горячих объектов во Вселенной.

Однако в заключительные фазы своей жизни нейтронные звезды несколько отличаются от белых карликов. По мере того как в процессе протонного распада нейтронная звезда теряет свою массу, она становит-

ся менее плотной и, в конечном итоге, вырождение нейтронов исчезает. Как только нейтроны перестают быть вырожденными, они преобразуются в протоны, электроны и антинейтрино. Этот переход происходит, когда масса звезды падает ниже одной десятой массы Солнца, а ее радиус равен примерно ста шестидесяти четырем километрам. На этом этапе плотность все еще достаточно велика для того, чтобы электроны оставались вырожденными, и звезда весьма напоминает белый карлик. Оставшийся звездный объект, подобный белому карлику, продолжает терять массу по мере того, как распадается все большее число протонов, до тех пор пока не исчезнет вырожденность электронов. Вот тогда наш объект превращается в ледяную водородную глыбу, масса которой не превышает одной тысячной массы Солнца. Затем распадаются протоны в кристаллической решетке, что, в конце концов, приводит к полному испарению звезды и превращению ее в излучение и мелкие частицы. В конечном итоге от нейтранных звезд не остается ничего.

Долгосрочная судьба планет имеет аналогичную историю. Планеты тоже состоят, главным образом, из протонов, которые распадаются, в результате чего планета испаряется, превращаясь в излучение. К тому времени, когда оставшиеся планеты начнут разрушаться в процессе распада протонов, они уже давно будут оторваны от родительских звезд и будут блуждать в полном одиночестве по необъятным просторам космоса. По мере медленного разрушения планеты вырабатывают довольно скромную мощность: всего один милливатт в случае планеты типа Земли. И хотя изначально планеты содержат больше тяжелых элементов, чем звезды, в свое время они тоже превратятся в застывший водород. Даже планета, состоящая из чистого железа, разрушится к тридцать восьмой космологической декаде — примерно через шесть периодов полураспада протона. В течение тридцать девятой космологической декады планета эволюционирует из маленького комка водородных кристаллов в полностью разрушенное состояние.

К сороковой космологической декаде почти все протоны во Вселенной распадутся, а вырожденные звездные остатки исчезнут. На смену этим, на первый взгляд, твердым и неразрушимым звездным остаткам придет рассеянное море излучения, состоящего, главным образом, из протонов и нейтрино с небольшой примесью позитронов и электронов. Вселенная приобретет новый характер. Изредка на этой гигантской арене поразительного запустения встречаются уединенные области крайне искривленного пространства-времени, так называемые черные дыры. По завершении эпохи распада черные дыры, содержащие от одной до нескольких миллиардов солнечных масс, упорно стремятся попасть в следующую эпоху.

## ГЛАВА 4

# Эпоха черных дыр

$$40 < \eta < 100$$

**Черные дыры наследуют Вселенную, деформируют пространство-время, испаряют свою массу-энергию и погибают во взрыве.**

*Девяностая космологическая декада, на краю скопления черных дыр:*

Боб был в замешательстве. Его расплывчатое тело, содержащее более миллиона солнечных масс, захлестнул пугающий калейдоскоп ощущений. Несмотря на свои почти  $10^{79}$  лет, он никогда не испытывал ничего, что хотя бы отдаленно напоминало эту внутреннюю бурю. Деформирующая волна достигла почти невыносимого максимума, а потом внезапно спала, оставив после себя ощущение тошноты — чувство, которое можно было бы описать как морскую болезнь, если бы в эту пору еще существовали понятия воды и океанов. Позитроны и электроны в его мозге медленно двигались по спирали вычисления, и мало-помалу он осознал, что столь сильный дискомфорт был вызван вспышкой гравитационного излучения. Две черные дыры слились где-то вдалеке, создавая гигантский гравитационный потенциал. Черные дыры оставались одной из немногих опасностей для представителей его вида, поэтому Боб почувствовал облегчение от мысли о том, что это столкновение двух небесных объектов произошло очень и очень далеко.

Бобу, конечно, рассказывали о предельной важности черных дыр. Их зловещее сияние омывало Вселенную разреженным морем излучения и служило источником энергии, позволявшим существование практически всего, в том числе и самой жизни. Он знал, что без необходимой энергии, извлекаемой из испарения черных дыр, Вселенная была бы мертвой и скучной.

И хотя волнения Боба носили чисто практический характер, среди представителей его вида были и такие, кто пытался понять свойства

Вселенной в первые  $10^{40}$  лет ее существования, «в эти почти невообразимо краткие мгновения после Большого взрыва». Особенно модной была совершенно нелепая гипотеза, утверждавшая, будто высокосложные структуры могли основываться на взаимодействии электронов с протонами и нейтронами. Существование протонов и нейтронов, экзотических частиц с коротким временем жизни, которые уже давным-давно распались, с энтузиазмом приняли самые смелые современные физики, и в то же время нарекли «безумной спекуляцией» те, кто был «сшит» из более консервативной материи.

Когда распадаются протоны, Вселенная теряет пыль, белых карликов, замерзшую Землю и вещество, которое мы встречаем каждый день. После исчезновения протонов структура Вселенной претерпевает значительные изменения. Самыми важными сохранившимися объектами являются черные дыры, которые по завершении эпохи распада остаются в целостности и сохранности. Черные дыры — это звездоподобные объекты, хотя и обладающие некоторыми очень необычными свойствами. Пережив белых карликов, они наследуют ту роль, которую в наше время выполняют обычные звезды. Когда Вселенная достигает сороковой космологической декады, черные дыры «берут в свои руки» верховную власть. Они дают свет, тепло и динамику, позволяющие Вселенной оставаться интересным местом.

Черные дыры разбросаны по невероятно разреженному морю элементарных частиц. Представьте себе просеивание через большие объемы этого почти идеального вакуума. Время от времени попадает электрон — отрицательно заряженная частица, вращающаяся по орбите вокруг ядра современных атомов и текущая по проводам электрической цепи. В результате длительных поисков было обнаружено, что каждому сохранившемуся электрону соответствует антиматериальный партнер — позитрон. Каждый позитрон несет единичный положительный заряд, так что Вселенная в целом остается электрически нейтральной. В результате дальнейших поисков обнаруживаются невидимые обитатели межзвездных пустот: аксионы, различные ароматы нейтрино и т. п.

Вселенная в эпоху черных дыр погружена в море низкоэнергетических фотонов — света, длины волн которого слишком велики, чтобы их мог различить глаз человека. Свет, улавливаемый нашими глазами, состоит из фотонов, длины волн которых составляют около половины микрона (половина одной тысячной миллиметра). Длина волны типичного излучения в сороковую космологическую декаду гораздо больше — почти километр. Чтобы иметь способность «видеть» в эпоху черных дыр, нужно иметь глаза размером с материки.

## Определение черных дыр

Что такое черная дыра? Традиционное определение могло бы звучать так: черная дыра — это объект, искажающий пространственно-временной континуум настолько сильно, что даже свет не может покинуть поверхность этого объекта. В этой главе мы исследуем смысл данного определения подробно, хотя основную идею, лежащую в основе феноменальной гравитации черной дыры, понять совсем несложно.

Наверное, трудно найти человека, который не видел бы зернистые кадры высадки экипажа «Аполлона» на поверхность Луны. Астронавты легко прыгают в объемных космических скафандрах. В их прыжках на прямых ногах проявляется одно загадочное качество, которое легко объяснимо: сила притяжения на Луне в шесть раз меньше земной. Мяч, брошенный вверх с заданной скоростью, поднимется над поверхностью Луны выше, чем над поверхностью Земли. Аналогично, чтобы вырваться из гравитационных объятий Луны, потребуется меньшая энергия.

Скорость, которую нужно развить, чтобы преодолеть гравитационное притяжение некоторого тела, называют *второй космической скоростью*. Например, чтобы оторваться от поверхности Земли (в отсутствие трения воздуха), нужно развить скорость, равную 25 000 миль в час (11 километров в секунду). Огромные ракеты-носители «Сатурн V» обеспечили эту необходимую скорость, для того чтобы попасть на Луну. Вместе с тем, чтобы покинуть Луну и вернуться на Землю, оказалось достаточно сравнительно скромных ракет на лунных модулях. Вторая космическая скорость для Луны невелика, потому что Луна имеет меньшую плотность и меньшую массу, чем Земля. Если два объекта имеют одинаковый размер, но разные массы, вторая космическая скорость будет больше для более тяжелого объекта. Например, если представить объект, имеющий массу Солнца и диаметр Земли, вторая космическая скорость для этого плотного видоизмененного шара составила бы 6 500 километров в секунду — в 588 раз больше второй космической скорости для Земли. Если увеличивать массу, сохраняя неизменным диаметр, увеличивается и вторая космическая скорость, в силу чего оторваться от поверхности становится гораздо сложнее. В конце концов, после того как в сферу размером с Землю будет втиснуто две тысячи солнечных масс, вторая космическая скорость превысит скорость света (300 000 километров в секунду). Если вторая космическая скорость превышает скорость света, то ничто, даже сам свет, не может оторваться от такой поверхности. Наша гипотетическая плотная сфера становится черной дырой. И название это исключительно уместно: объект, не излучающий света, кажется внешней Вселенной абсолютно черным.

Несмотря на то, что ничто не движется настолько быстро, чтобы покинуть поверхность черной дыры, черная дыра *не* есть космическая утроба, которой суждено поглощать все, что находится рядом. Гравитационное притяжение любого объекта, и черные дыры здесь не исключение, ослабевает по мере удаления от этого объекта. На достаточном расстоянии притяжение черной дыры неотлично от притяжения обычной звезды сравнимой массы. Вдалеке от черной дыры локальная вторая космическая скорость всегда меньше скорости света, поэтому частицы или космические корабли могут свободно прилетать и улетать. По мере приближения к черной дыре вторая космическая скорость неуклонно растет. На расстоянии четко определенного радиуса вторая космическая скорость, наконец, превышает скорость света. Эта точка невозвращения отмечает место положения фактической поверхности черной дыры и называется *радиусом Шварцшильда*, в честь немецкого физика Карла Шварцшильда, который одним из первых принял общую теорию относительности Эйнштейна. Вскоре после выведения радиуса, который сейчас носит его имя, Шварцшильд скончался от болезни, которой заразился на русском фронте во время Первой мировой войны.

Радиус Шварцшильда для черной дыры, масса которой равна массе Солнца, составляет всего несколько километров. Невероятную плотность такого тела можно в какой-то степени постигнуть, если представить, что Солнце сжали до размеров небольшого студенческого городка. Радиус Шварцшильда увеличивается строго пропорционально массе черной дыры. Например, черная дыра, масса которой равна миллиону солнечных, имеет радиус в три миллиона километров, что примерно в четыре раза больше современного Солнца. Если бы Землю сжали до такого состояния, что она превратилась бы в черную дыру, такая дыра имела бы размер небольшого шарика. Представьте, что Сирз-тауэр, гора Эверест, огромное железное ядро Земли и все прочее, что известно человечеству, втискивается в сферу, которая без труда умещается в вашей ладони! Сколь бы удивительным это ни казалось, но такой странный объект действительно может существовать.

Сферическая поверхность, отмеченная радиусом Шварцшильда, окружает часть пространственно-временного континуума, настолько искаженную, что от нее не может оторваться ни одна частица. Поскольку эту локальную область не может покинуть никакая информация, она фактически отделена от остальной Вселенной. Таким образом, радиус Шварцшильда можно считать величиной, определяющей гипотетическую поверхность, служащую границей между этой внутренней областью, которую не может покинуть никакая информация, и всей остальной Вселенной.



Таким образом, черные дыры несколько напоминают банковский сейф. Информация, заключенная в пределах горизонта событий, скрыта от остальной Вселенной. Однако у банковского сейфа есть ключ, и его владелец может достать информацию или наличные, которые в нем хранятся. Ключа от черной дыры нет ни у кого. Информация заперта навечно. . . ну, или почти навечно.

## Типы черных дыр

С одной стороны, черные дыры можно отнести к нескольким разным типам. С другой же, все они, в сущности, одинаковы. Столь различные точки зрения определяются историческими соображениями.

Рассматривая их прошлые истории — процессы, в результате которых образуются черные дыры, — мы узнаем, что черные дыры создаются несколькими различными механизмами, причем каждый из этих механизмов образует черные дыры в конкретном диапазоне масс. Черные дыры с массами звезд образуют массивные погибающие звезды, тогда как самые большие черные дыры создаются галактиками. Много меньшие черные дыры могут получиться в результате экзотических процессов, длившихся крошечные промежутки времени сразу после Большого взрыва. Когда, наконец, наступает эпоха черных дыр, главную роль начинают играть, по меньшей мере, две разновидности этих призрачных объектов.

Вне зависимости от механизма образования, как только появилась какая-то конкретная черная дыра, ее характеристики полностью описываются всего тремя величинами: массой, электрическим зарядом и скоростью вращения. Вся история черной дыры заключена в этих трех определяющих характеристиках. Поскольку их прошлое фактически поглощается, черные дыры являются очень однородными объектами, лишены неподатливых индивидуальных сложностей. Эту предельную простоту часто выражают в утверждении, что «черная дыра не имеет волос».

Черная дыра самого распространенного типа образуется в ходе звездной эволюции. Когда достаточно массивные звезды завершают свой жизненный цикл во вспышке сверхновой, от них иногда остаются звездные остатки, имеющие слишком высокую массу, чтобы существовать за счет давления вырожденного газа. Эти плотные остатки гравитационно нестабильны и быстро коллапсируют, превращаясь в черную дыру. Эти *звездные черные дыры* имеют массы, сравнимые с массами обычных звезд, хотя их размер приблизительно в сто тысяч раз меньше.

Например, относительно близкий к нам кандидат в черные дыры — Лебедь  $X_{-1}$  — имеет массу, примерно в десять раз превышающую массу Солнца, и радиус где-то в тридцать километров.

Такие звездные черные дыры кажутся неважными по сравнению со *сверхмассивной черной дырой*, расположенной в центре Галактики. Черные дыры, относящиеся к категории сверхмассивных, могут содержать миллиарды солнечных масс и иметь радиус Шварцшильда, превышающий размер орбиты, по которой Юпитер движется вокруг Солнца. Сейчас астрономы полагают, что в центре практически каждой галактики имеется гигантская черная дыра. В центре нашей собственной Галактики, по-видимому, обитает достаточно скромный для категории сверхмассивных черных дыр образчик; судя по последним измерениям, эта дыра весит столько же, сколько и три миллиона Солнц.

Несмотря на то, что происхождение сверхмассивных черных дыр в центрах галактик еще до конца не изучено, они появились, когда первичные газовые облака коллапсировали, образуя галактики. Когда начинается коллапс галактики, в центре рождающейся галактики собирается столько вещества, новорожденных звезд и газа, что просто вынуждена образоваться черная дыра. Когда рождается черная дыра, переполненные окрестности ядра молодой галактики естественным образом заставляют дыру поглощать все больше и больше вещества, которое подходит слишком близко, вследствие чего черная дыра постоянно увеличивается. Квазары, чрезвычайно ярко светящиеся ядра далеких и древних галактик, «питаются» от сверхмассивных черных дыр, собирающих пыль, газ и остатки погибших звезд в вихреподобный аккреционный диск. По мере того как газ по узкому каналу движется в центральную черную дыру, из-за возникающего трения аккреционный диск нагревается и получающаяся энергия поддерживает яркое свечение квазара.

Наша третья категория, *первичные черные дыры*, имеет более спекулятивную основу, чем две первые. Если первичные черные дыры существуют, они должны были возникнуть вскоре после Большого взрыва. Они также, скорее всего, имеют очень маленький размер; они гораздо менее массивны, чем звезды. Подобно тому как в кимберлитовой трубке образуется алмаз, крошечная первичная черная дыра является следом, оставшимся от чудовищных давлений и температур — условий, которые властвовали в самые первые мгновения истории космоса.

Несмотря на свою репутацию нерушимых, черные дыры не будут существовать вечно. Как мы увидим, энергия, образующаяся при медленном испарении черных дыр, питает Вселенную в эпоху черных дыр. Более крупные и массивные черные дыры живут гораздо дольше маленьких. На самом деле, самые маленькие черные дыры, которые весят

менее  $10^{25}$  граммов и предположительно возникли в первичную эпоху, испаряются еще до начала эпохи черных дыр. Максимальный размер этих так рано гибнущих черных дыр составляет лишь около одной сотой миллиметра, хотя они весят столько же, сколько и довольно большая Луна в нашей Солнечной системе. Более крупные черные дыры с массами, превышающими одну шестисотую долю массы Земли, выживут и проявят себя в эпоху черных дыр.

## Необычность черных дыр

Черные дыры — это насмешка над теми представлениями о пространстве и времени, которые диктует нам здравый смысл. В эпоху черных дыр Вселенная становится очень недобрым местом. С наших сегодняшних выгодных позиций в эпоху звезд, черные дыры — не более чем любопытная штука. Они имеют очень малое отношение к нашей земной жизни и не оказывают сколько-нибудь значительного влияния на эволюцию Галактики. Однако в эпоху черных дыр общая теория относительности и черные дыры оказываются верховными правителями: они совершенно необходимы для каждодневного управления Вселенной. Но прежде чем перевести часы за сороковую космологическую декаду, мы должны рассмотреть ряд идей из общей теории относительности. Только тогда мы сможем вкусить пленительную смесь простоты, изящества и явной странности, которая характеризует черные дыры.

Вообразите ракету, которая парит в космическом пространстве в удалении от гравитационного притяжения планет или звезд. Двигатели заглушены, и ракета движется по прямой линии с постоянной скоростью. Внутри этой ракеты невесомый груз. Астронавты находятся в подвешенном состоянии, а апельсиновый напиток превращается в блестящие оранжевые сферы, по мере того как ракета и ее содержимое движутся сквозь космическое пространство. Внезапно кто-то на полную мощность включает двигатели ракеты. Из двигателей малой тяги выбрасывается газ, корпус делает рывок вперед, и напуганные астронавты видят, как пол начинает двигаться к ним навстречу. Апельсиновый напиток расплескивается. По мере дальнейшей работы двигателей ракета ускоряется и ее скорость непрерывно возрастает. Астронавты оказываются прижатыми к полу.

Ускорение ракеты, оснащенной слабыми двигателями, происходит не слишком быстро. Если бы астронавты подпрыгнули к потолку, пол ракеты «догнал» бы их лишь постепенно. Им показалось бы, будто они на Луне, где сила гравитации мала и подпрыгнуть легко. Однако когда

двигатели создают большее ускорение, пол ракеты начинает походить на поверхность Земли. То есть если двигатели отрегулированы так, что каждую секунду скорость ракеты увеличивается на 9,8 метров в секунду, то предметы будут падать на пол точно так же, как они падают на поверхность Земли. Что самое важное, если у ракеты нет иллюминаторов, космические путешественники, которые находятся внутри, не имеют возможности узнать, обусловлено ли ощущаемое ими ускорение силой, создаваемой двигателями ракеты или гравитационным притяжением планеты.

На первый взгляд, это заявление об эквивалентности, приравнивающее эффекты гравитации и ускорения, возможно, не покажется особенно интересным. Однако Эйнштейн осознал, что эквивалентность гравитации и ускорения имеет чрезвычайно глубокий смысл. Он взял данную концепцию за отправную точку при создании общей теории относительности, которая, в свою очередь, просветила нас в отношении странных свойств черных дыр.

Безусловное принятие этого принципа эквивалентности вынуждает нас отказаться от нашего обычного представления об абсолютном времени. Рассмотрим одни часы, прикрепленные к полу большой ракеты, и вторые часы, прикрепленные к ее потолку. Часы устроены так, что через радиопередатчик объявляют время: «Сейчас. . .». Когда ракета движется в пустом пространстве, астронавт, который парит прямо над полом ракеты, может сверять время, которое отсчитывают часы, слушая радиопередатчик. По истечении часа часы издадут звуковой сигнал. Астронавт принимает сигнал часов, которые расположены около него на полу, а затем, через крошечную долю секунды, он получает сигнал от часов с потолка. Эта чрезвычайно маленькая, но все же реальная, разница во времени прибытия двух сигналов возникает из-за того, что часы, находящиеся на потолке, в большей степени удалены от астронавта. Радиосигналу, который со скоростью света движется от часов на потолке, нужно чуть больше времени, чтобы достигнуть астронавта, чем сигналу, испущенному близко расположенными часами на полу. После тщательного сравнения сигналов в течение нескольких часов астронавт приходит к заключению, что часы отмеряют время с одной и той же скоростью, но часы на потолке немного отстают (на время, которое занимает движение света от потолка к полу). Все часы на ракете идут с одинаковой скоростью, если ракета движется в космическом пространстве с постоянной скоростью.

При ускорении ракеты ситуация становится гораздо более интересной. Астронавт, стоящий на полу, не замечает никакого изменения в ско-

рости часов, находящихся рядом с ним. Однако из-за ускорения ракеты, которое направлено вверх, он замечает, что часы на потолке идут быстрее. Часы на потолке посылают сигнал (в виде радиоволны) к полу. Поскольку пол ускоряется вверх, он принимает радиоволну быстрее, чем в случае движения ракеты с постоянной скоростью. Если ускорение продолжается, последующие сигналы также прибывают раньше, чем их ожидает астронавт. С точки зрения астронавта, который находится на полу, часы на потолке сообщают о пройденных промежутках времени чаще и идут быстрее по сравнению с часами на полу.

Согласно принципу эквивалентности несовпадение скоростей хода часов, происходящее из-за ускорения ракеты, *также* имеет место и в однородном гравитационном поле. Следовательно, принцип эквивалентности настойчиво утверждает, на первый взгляд, очень странную вещь. Двое часов, расположенные на разной высоте над поверхностью Земли, должны измерять поток времени с разной скоростью. Столь странное поведение является внутренней особенностью гравитации. Изменение потока времени в гравитационном поле совершенно не зависит от механизма, который используется для измерения времени. Атомные часы, кварцевые часы, биологические ритмы — все они ощущают, что течение времени растягивается или сжимается одним и тем же образом.

Интуитивно мы не чувствуем релятивистского растяжения времени, так как в нашей окружающей среде оно создает эффекты, которыми вполне можно пренебречь. В обыденной жизни изменчивость времени под действием гравитации смехотворно мала. Предположим, например, что однайцевые близнецы проводят ночь в двухъярусной кровати. Один спит в метре от второго. На следующее утро близнец, спавший наверху, становится на несколько триллионных долей секунды старше того, что спал внизу. Хотя близнецы не проживут достаточно долго, чтобы растяжение времени, обусловленное гравитацией, стало важным источником соперничества между ними, сама Земля проживет тридцать восемь космологических деkad. За столь продолжительный временной интервал это растяжение времени создаст временной дифференциал в  $10^{22}$  лет, или двадцать две космологические декады.

Сильное гравитационное поле черной дыры приводит к крайне резкому растяжению времени. Вблизи черной дыры часы идут гораздо медленнее, чем в пустом пространстве. Вблизи горизонта событий, фактической поверхности черной дыры, часы практически полностью останавливаются. Но, как и в случае со всеми эффектами, обусловленными относительностью, точное значение этого заявления зависит от наблюдателя. Неподвижный наблюдатель, зависший около горизонта событий,

прижат к полу своего космического корабля и ощущает как чрезвычайно замедленное течение времени, так и сокрушительную силу гравитации черной дыры. Однако наблюдатель, пребывающий в состоянии свободного падения, вообще не почувствует ни силу гравитации, ни ускорение, ни изменение скорости течения времени.

Растяжение времени, обусловленное близостью к черной дыре, порождает ряд замечательных возможностей. Часы, расположенные на особых орбитах вблизи черной дыры, идут чрезвычайно медленно. На самом деле, при условии тщательного выбора орбиты, время можно замедлить на произвольно большую величину. Этот эффект можно использовать, например, поместив на особую орбиту протоны. Тогда протоны обитали бы в среде, где поток времени, в сущности, близок к остановке. Они существовали бы и тогда, когда все обычное вещество во внешней Вселенной, где время течет с нормальной скоростью, уже давно распалось. Однако такое долгосрочное хранение имеет свою цену. Если кто-либо в будущем захотел бы воспользоваться этим запасом протонов, скажем, чтобы построить какой-то механизм или вырастить клон, извлечение этих частиц с их орбит потребовало бы больших затрат энергии. Требования к энергии были бы примерно такими же, как для создания протонной из чистой энергии, согласно знаменитой формуле Эйнштейна  $E = mc^2$ .

Другая долгосрочная возможность заключается в размещении вблизи черной дыры, на орбите, подверженной сильному растяжению времени, наблюдателя (человека в космическом корабле или робота). Тогда этот наблюдатель мог бы фактически «путешествовать» в будущее. В крайнем случае, например, растяжение времени могло бы быть таким сильным, что путешественнику во времени показалось бы, что прошел всего один год, тогда как внешняя Вселенная (удаленная от черной дыры) постарела бы на шестьдесят космологических декад. Данный эффект дает нам возможность путешествия в далекое будущее, в медленно текущую эпоху черных дыр.

## Кривизна

Черные дыры искажают строение пространства почти так же сильно, как и течение времени. Пространство (или, точнее, пространство-время) вблизи черной дыры сильно искривлено. Мы уже встречались с понятием искривленного пространства при разговоре о расширении Вселенной в целом. Если Вселенная открыта, геометрия пространства в самых крупных масштабах имеет *отрицательную* кривизну. Если Вселенная замкнута, то пространство имеет *положительную* кривизну. Ес-

ли же Вселенная лежит точно на границе, разделяющей открытый и замкнутый варианты, значит, пространство является *плоским* (см. рис. 17).

Что же означает кривая геометрия пространства? Кривизну трехмерного пространства крайне сложно представить визуально. Размышляя о пространстве, мы невольно представляем плоское евклидово пространство, которое однородно простирается в трех перпендикулярных друг другу направлениях. Нам совершенно чуждо представление о кривизне пространства, так как пространство, в котором мы живем, имеет чрезвычайно маленькую кривизну. Наша способность к визуализации определяется эволюцией, а поскольку пространство нашего мира почти идеально плоское, то способность к мысленному представлению кривого трехмерного пространства не является жизненно важным преимуществом, которое могло бы развиться в процессе эволюции. Ведь только на протяжении последней сотни лет мы столкнулись с необходимостью всерьез задуматься о кривом пространстве и связанной с ним неевклидовой геометрии.

Несмотря на то, что кривизна трехмерного пространства — вопрос не самый простой, читателю не составит труда понять идею кривизны двумерного пространства. Попробуем заново исследовать знакомое каждому из нас понятие круга. В двумерном пространстве круг — это совокупность точек, которые лежат на определенном расстоянии от центральной точки. В обычной плоской двумерной плоскости длина границы круга (окружности) в  $\pi = 3,14159\dots$  (пи) раз больше, чем расстояние от одной точки окружности до строго ей противоположной (диаметр). Это отношение можно проверить экспериментальным путем, если самым тщательным образом провести измерения круга, нарисованного на листе бумаги.

Далее, предположим, что мы могли бы измерить параметры больших кругов, нарисованных на поверхности Земли. Для проведения этого эксперимента находим идеально гладкую равнину (например, полярное плато в Антарктике) и привязываем к стойке (расположенной, например, на Южном Полюсе) длинную веревку. Затем мы измеряем расстояние, которое пройдем по кругу вокруг полюса. Если мы сделаем несколько измерений такого рода, каждый раз используя более длинную веревку, мы обнаружим нечто любопытное о получающихся кругах. Если взять веревку длиной десять миль, диаметр круга окажется в 1,000001 раз длиннее, чем нужно, т. е. длиннее диаметра, который получается, если измеренную длину окружности поделить на  $\pi$ . Если длина веревки будет сто миль, то диаметр круга окажется длиннее в 1,0001 раз. Если мы возьмем веревку длиной в 6250 миль, так что она протянется от

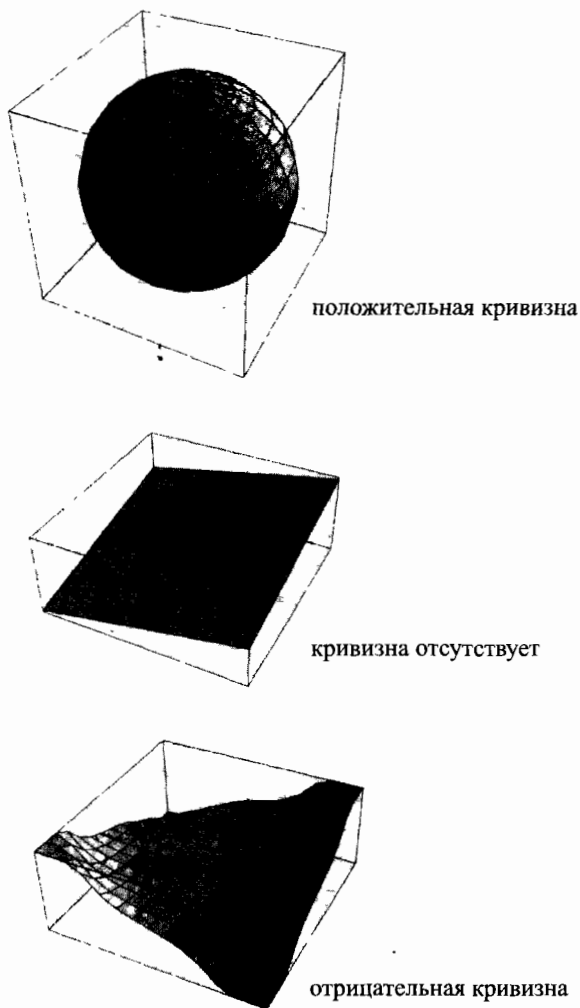


Рис. 17. Сетчатая поверхность на нижнем рисунке изогнута как седло; про такую поверхность говорят, что она имеет отрицательную кривизну. Поверхность на среднем рисунке плоская: у такой поверхности нулевая кривизна. Сфера, изображенная на верхнем рисунке, имеет положительную кривизну



Южного Полюса до Экватора, то расстояние «поперек круга» составит половину расстояния «по кругу»: в 1,57 раз длиннее.

Круги, очерченные на Земле, ведут себя так, потому что Земля представляет собой кривую двумерную поверхность. Мы без труда можем представить кривизну сферической поверхности, потому что видим, как она располагается в плоском трехмерном пространстве. Однако, к сожалению, визуальное представление искривленного трехмерного пространства требует от нас умения представить четырехмерное пространство, в котором располагается интересующее нас трехмерное. Это крайне сложно для человеческого разума.

Если искривленная поверхность ведет себя подобно поверхности Земли, в том смысле, что диаметр круга длиннее частного длины ее окружности и  $\pi$ , то мы говорим, что данная поверхность имеет положительную кривизну. Аналогично, если диаметр круга меньше длины его окружности, поделенной на  $\pi$ , кривизна отрицательна.

Общая теория относительности гласит, что кривизну трехмерного пространства вызывает масса. Радиус гипотетической сферы, окружающей массивное тело, немного длиннее, чем тот, который получился бы из измерения расстояния вокруг экватора этой сферы. Точно так же, фактический объем, содержащийся внутри сферы, которая окружает место сосредоточения массы, больше, чем тот объем, который можно было бы предсказать из измерения поверхности этой сферы и последующего применения формул обычной евклидовой геометрии.

Кривизна, создаваемая массой Земли, очень мала. Расстояние до центра Земли приблизительно на полтора миллиметра длиннее, чем частное от деления длины окружности нашей планеты на  $2\pi$ . В этом смысле геометрия нашего локального пространства отличается от идеальной плоскостности на одну четырехмиллиардную. Если бы Земля была тяжелее, она создавала бы более сильную кривизну. Объекты с большей массой способны создавать и большую кривизну. Расстояние от центра до поверхности Солнца, например, приблизительно на полкилометра длиннее, чем частное длины его окружности и  $2\pi$ . Белые карлики и нейтронные звезды, которые гораздо плотнее Солнца, создают гораздо большие значения кривизны в примыкающих к ним областях. Расстояние до центра нейтронной звезды почти на десять процентов больше, чем частное от деления окружности этой звезды на  $2\pi$ .

Кривизну трехмерного пространства вблизи плотной звезды можно изобразить с помощью графического метода, именуемого *диаграммой вложения*. Чтобы создать одну из таких диаграмм, мы сначала мысленно разрезаем звезду пополам. Затем мы показываем внутреннюю кривизну в экваториальной плоскости, изображая эту плоскость в ви-

де кривой двумерной поверхности в плоском трехмерном пространстве (см. рис. 18). С помощью этой хитрости можно получить некоторое представление о пространственных отношениях между точками, лежащими на экваториальном поперечном сечении звезды. Диаграмма вложения показывает, что «кусочек» пространства, проходящего через нейтронную звезду, имеет положительную кривизну. На данной диаграмме графическое прогибание двумерной экваториальной плоскости показывает, почему диаметр плотной звезды удивительно велик по сравнению с длиной ее окружности. Другими словами, пространство, занятое звездой, описываемой с помощью данной диаграммы вложения, имеет положительную кривизну.

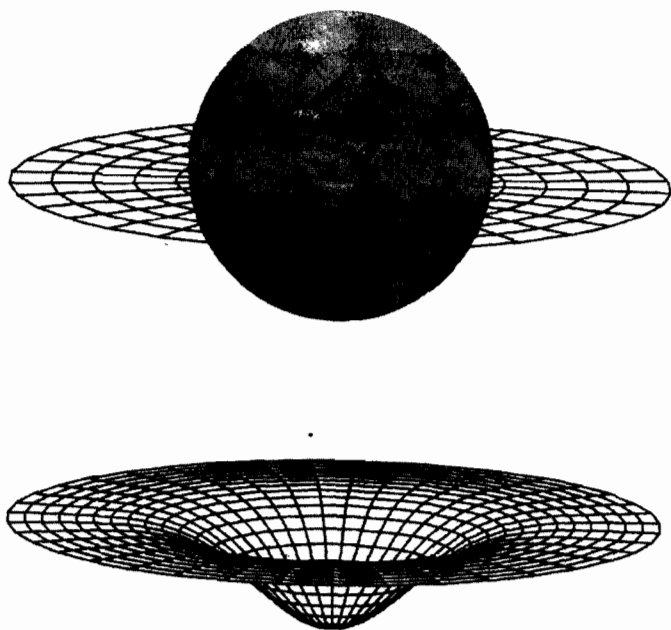


Рис. 18. Диаграмма вложения, которая помогает визуально представить кривизну пространства, создаваемую массивным сферическим телом. Прогибание поверхности показывает пространственное отношение между точками, лежащими на поперечном сечении плотной сферы

Вблизи черной дыры локальная кривизна пространства настолько велика, что расстояние до центра черной дыры бесконечно длиннее, чем длина ее окружности (поверхности этой дыры с радиусом Шварцшильда). Именно из-за этого бесконечного искажения пространства внутри черной дыры эти объекты кажутся такими странными. Эта кривизна создает горизонт событий, кривизна вызывает сильнейшую разницу в течении времени для разных наблюдателей, и кривизна же дарует крупным черным дырам стойкость, которая позволит им прожить до крайне отдаленного будущего.

## Приливные силы

Эйнштейн показал, что кривизна пространства, вызванная сосредоточением массы, создает *приливную силу*. Дурная слава звездных черных дыр обусловлена, в основном, чрезвычайно большими приливными силами, которые действуют вблизи их горизонтов событий. Но что же такое эта приливная сила? Ответ лучше всего дать на примере. Если вы стоите на поверхности Земли, ваша голова находится несколько дальше от ее центра, чем ноги. Поскольку сила гравитации, с которой на вас действует Земля, ослабевает с увеличением расстояния, сила гравитации, действующая на вашу голову, будет чуть слабее, чем сила, действующая на ваши ноги. Из-за этой разницы ваше тело подвергается растяжению. К счастью, этот приливный эффект достаточно мал. В силу того что Земля создает совсем крошечную кривизну пространства, приливная сила растяжения примерно в два миллиона раз меньше самой силы гравитации, и поэтому, гуляя по поверхности Земли, мы этой силы не чувствуем.

Однако вблизи поверхности черной дыры приливные силы огромны. Для пушей ясности вообразите, что вы находитесь неподалеку от черной дыры, имеющей массу Солнца. Ее шварцшильдовский радиус составляет всего около трех километров. Если бы вам удалось встать на поверхность черной дыры, ваше тело опять-таки подверглось бы действию приливной силы растяжения. Однако на этот раз эта сила в миллиард раз превышает силу притяжения Земли. Другими словами, вы оказались бы под действием растягивающей силы примерно в сто миллиардов фунтов. Столь мощные приливные силы разорвали бы на мелкие кусочки любой обычный макроскопический объект: будь то камень, космический зонд или астронавт.

Кроме того, приливные силы создают еще один эффект. Они сжимают объекты в перпендикулярном направлении. Поскольку гравитаци-

онные силы всегда направлены радиально внутрь, к центру черной дыры (или любого другого массивного объекта), сила, действующая на одну сторону тела, направлена немного иначе, чем та, что действует на другую его сторону. Эта разница в направлениях порождает эффект сжатия. Как и в случае приливного растяжения, в слабом гравитационном поле, вроде того, что существует на поверхности Земли, величина этой дополнительной силы крайне мала. Однако вблизи черной дыры эти сжимающие силы могут быть огромны, примерно так же велики, как и приливные силы растяжения. Так вот: вообразите, что вы стоите вблизи поверхности черной дыры, имеющей массу Солнца. В вертикальном направлении ваше тело растягивает сила в сто миллиардов фунтов, тогда как в горизонтальном направлении вас сжимает примерно такая же сила: довольно неприятная перспектива.

Если масса черной дыры увеличивается, то ее гравитационное действие усиливается, но приливные силы вблизи ее поверхности ослабевают. В непосредственной близости от черной дыры, имеющей массу миллиарда Солнц, например, приливные силы настолько умеренны, что позволяют астронавту пересечь горизонт событий и не почувствовать при этом особого дискомфорта. Однако эти сверхмассивные черные дыры таят для будущих космических путешественников свои собственные опасности. Слабость приливных сил и совершенная чернота такой черной дыры позволяют пересечь радиус Шварцшильда — точку невозвращения, — прежде чем станет ясно, что все потеряно.

## **Зверинец черных дыр**

Когда наконец наступит эпоха черных дыр, сколько черных дыр будет содержать Вселенная? Попробуем дать приблизительную оценку. Почти каждая современная галактика, включая нашу собственную, имеет в своем центре сверхмассивную черную дыру. Эти гигантские черные дыры в центре галактик весят от одного миллиона до нескольких миллиардов солнечных масс. Нам также известно, что на внешних просторах галактик сверхмассивные черные дыры не скитаются *в больших количествах*. Если бы в пределах гало спиральных галактик вращались большие популяции сверхмассивных черных дыр, они тут же разрушили бы чувствительные диски галактик, резко разорвав орбиты звезд. Отсутствие этого разрушительного процесса предлагает простую схему подсчета числа сверхмассивных черных дыр — по одной на галактику.

Звездные черные дыры, образовавшиеся в результате вспышек сверхновых, имеют более многочисленную популяцию по сравнению

со сверхмассивными черными дырами. Примерно три звезды из каждой тысячи рождаются с достаточной массой, чтобы образовалось железное ядро и произошла вспышка сверхновой. Процент сверхновых, после вспышки которых образуются черные дыры, а не нейтронные звезды или вообще ничто (т. е. все вещество рассеивается в пространстве), лежит в диапазоне от одного до десяти процентов. Таким образом, каждая галактика будет содержать приблизительно один миллион звездных черных дыр к тому моменту, когда завершится образование звезд и звездная эволюция. Массы этих звездных черных дыр варьируются от трех до ста солнечных, причем средняя черная дыра расположена ближе к нижнему концу этого диапазона.

К сороковой космологической декаде галактики разрушаются полностью. К тому времени галактические газ и пыль уже давно рассеются или войдут в состав звезд. Из-за распада образующих их протонов звездные остатки, коричневые карлики и планеты полностью испарятся. За исключением блуждающего излучения и рассеянных элементарных частиц, единственным наследием каждой галактики является одна сверхмассивная черная дыра и порядка одного миллиона звездных черных дыр. По мере того как эти черные дыры медленно движутся по своим орбитам в огромных, связанных гравитацией, скоплениях, некоторые из сверхмассивных черных дыр сливаются, образуя гигантские «сборные» черные дыры. Тот объем пространства, который в настоящее время составляет нашу видимую Вселенную, вкладывает в общую массу примерно тридцать миллиардов сверхмассивных черных дыр и тридцать миллионов миллиардов звездных черных дыр. Общее число черных дыр во всей видимой Вселенной в начале эпохи черных дыр невероятно велико. Горизонт находится в  $10^{30}$  раз дальше, чем сейчас. Если крупномасштабная геометрия пространства-времени является плоской, то видимая Вселенная будет содержать около  $10^{40}$  сверхмассивных черных дыр и почти  $10^{46}$  звездных черных дыр: один триллион триллионов дыр на каждую звезду, находящуюся в пределах космологического горизонта сегодняшней Вселенной.

## Черный апокалипсис

В эпоху звезд и эпоху распада черные дыры постоянно растут и набирают массу, обрастая веществом, которое они собирают из окружающей их Вселенной. Этот прирост вещества происходит за счет действия обычных сил гравитации — черные дыры не ведут себя как космические пылесосы, втягивающие в себя все без разбора. На объекты, распо-

женные достаточно далеко от пределов радиуса Шварцшильда, черная дыра действует так же, как звезда или любой другой астрономический объект с большой массой. Например, если космический зонд приблизится к черной дыре, сила гравитации этой дыры протащит этот зонд по гиперболической орбите и выбросит в новом направлении. Зонд может пересечь горизонт событий, если только он направлен точно в центр черной дыры. В реальности наибольшая аккреция вещества в черные дыры происходит, когда вещество, газ или пыль, собирается на круговой орбите вокруг черной дыры, образуя *аккреционный диск*. Силы типа силы трения, действующие на газ, приводят к тому, что движущееся по орбите вещество нагревается, постепенно теряет энергию и быстро проваливается в черную дыру.

Образование аккреционного диска обусловлено сильными приливными силами, которые создает черная дыра. Чтобы продемонстрировать необычайную силу этих приливов, рассмотрим довольно мрачный сценарий, согласно которому Земля сталкивается с черной дырой. Поскольку в нашей Галактике всего около миллиона звездных черных дыр, вероятность столкновения Земли с черной дырой слишком мала, чтобы вызывать у нас особое беспокойство. Шансы на прямое столкновение составляют примерно один на  $10^{26}$  в год. Тем не менее мы можем описать последовательность событий, которые произошли бы, если бы по какому-то ужасно несчастливому стечению обстоятельств черная дыра с массой двух Солнц оказалась на встречно пересекающейся траектории с Землей.

Вторгающаяся на орбиту Земли черная дыра образовалась в результате гибели массивной звезды в диске нашей Галактики. Она движется через космическое пространство навстречу Земле со скоростью несколько километров в секунду. Первые неясные признаки вторгающейся черной дыры появляются за несколько тысячелетий до самого столкновения. Когда крошечное чудовище проходит сквозь облако Оорта — размытую сферу комет, окружающую Солнце, — оно смещает кометы с их орбит. Некоторые из них при этом оказываются выброшенными в открытый космос, многие попадают на орбиту вокруг самой черной дыры, а некоторые отправляются внутрь Солнечной системы, чтобы время от времени озарить ночное небо яркими вспышками. За много веков до прибытия этой черной дыры астрономы замечают сильные изменения орбит внешних планет, которые таким образом реагируют на гравитационное влияние черной дыры. Изучая отклонения планет от предсказанных орбит, астрономы могут сделать вывод о месте нахождения, массе и скорости движения приближающейся черной дыры. То, что вторгающийся объект обычной звездой не является, стало бы ясно сразу. Звезда с массой в два

раза больше солнечной, проходящая через облако Оорта, выглядела бы также ярко, как фонарь, расположенный на расстоянии нескольких кварталов. Возможно, ученые начали бы спорить, приближается к нам черная дыра или нейтронная звезда, но эти пререкания выглядели бы весьма бледно на фоне осознания того, что к центру нашей Солнечной системы направляется объект, масса которого в два раза больше солнечной.

Телескопы, наведенные в направлении этой черной дыры, отмечают странные колебания яркости фоновых звезд и галактик. Если смотреть издалека, черная дыра ведет себя подобно линзе, так как ее гравитация деформирует пространство-время, увеличивая и искажая изображения объектов, лежащих на линии зрения. Возможно, астрономы получают печальное удовольствие от ошеломляющей точности, которую обеспечит вторгающийся без приглашения «телескоп».

Тем временем, вычисления траектории черной дыры вызывают настоящие опасения. Ужасно близкое прохождение гарантировано, причем в область возможных событий попадает прямое столкновение. Когда черная звезда пересекает орбиту Плутона, планеты начинают очень сильно отклоняться от своих обычных траекторий движения. На немного нестандартной, но математически правильной модели, изображенной на рис. 19, Юпитер и Уран захватывает черная дыра, тогда как Сатурн и Нептун выбрасываются в области межзвездного пространства, не попавшие на наш рисунок. Этим изгнанным планетам суждено странствовать в одиночку триллионы лет, отделяющие одну важную встречу с другими солнечными системами от следующей.

Если смотреть с безрадостной позиции Земли, черная дыра приближается с обратной стороны Солнца. Объединенная гравитация Солнца и черной дыры исказят продолжительность земного года. Всего за несколько недель Солнце окажется ближе к Земле, чем когда-либо за 4,6 миллиардов лет истории нашей планеты. Земля равномерно вращалась вокруг Солнца на протяжении почти половины существования космоса. Теперь же, за несколько последних дней, разрушается весь этот упорядоченный механизм. Ошеломленное человечество борется с ожидающей его судьбой. По мере того как Солнце сжигает материки, антарктический лед пугающе быстро тает, затопляя прибрежные города. В морях свирепствуют бури, которым не было равных по силе.

Конец наступает быстро. При наблюдении в телескоп черная дыра выглядит как необыкновенно яркая комета, окруженная слабо светящимся газом и искаженными изображениями фоновых звезд и галактик. В последний час начинается истинное опустошение. Как только черная дыра подходит достаточно близко, чтобы ее приливные силы могли себя проявить, та сторона Земли, что оказывается перед черной дырой, ощу-

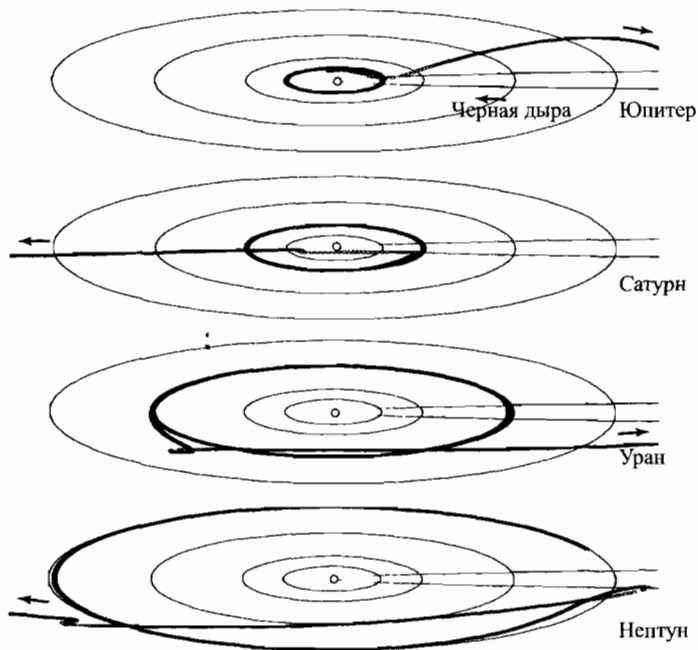


Рис. 19. Разрушение внешней Солнечной системы в результате близкого прохождения черной дыры, имеющей массу двух Солнц. В данной компьютерной модели, охватывающей период в двести лет, черная дыра вторгается через орбитальную плоскость Солнечной системы и попадает на прямую встречно пересекающую траекторию с Землей. На каждой из четырех диаграмм изображено разрушительное действие вторгающейся черной дыры на орбитальное движение определенной внешней планеты. Для ясности отметим, что это действие накладывается на исходные орбитальные пути планет. В этой конкретной модели Сатурн и Нептун выбрасываются из Солнечной системы, тогда как Юпитер и Уран захватываются вторгающейся черной дырой и попадают на ее эллиптические орбиты. Последующие орбитальные положения планет на их траекториях показаны с двухнедельными интервалами

щает силу ее притяжения гораздо больше противоположной и планета начинает значительно деформироваться. В коре Земли возникают напряжения, а ее поверхность сотрясают землетрясения. Шесть, семь, восемь, девять, . . . — шкалы Рихтера попросту не хватает для описания этих чу-



довишных землетрясений. Цунами омывают материки. Земная кора разрывается по старым линиям сброса породы, и каменные обломки плывут вместе с кипящей лавой по деформирующейся планете. Землю, подобно ириске, растягивают, превращая в диск из испаряющегося камня, который, стремясь убежать, завихряется, чтобы в конечном итоге кануть во вторгающуюся черную дыру. Энергия, которая высвобождается во время этой окончательной гибели, видна далеко за пределами Галактики.

Этот сценарий столкновения имеет гипотетический характер из-за того, что мы допустили крайне невероятное прямое столкновение, и из-за того, что мы очень переживаем за поглощаемое тело. Но вымышленная гибель Земли из-за поглощения ее черной дырой — это очень даже реальная судьба многих звезд и, возможно, более чем немногих планет. В самом деле, близкая черная дыра Лебедь  $X_{-1}$  сейчас обрастает веществом своего спутника — голубой звезды-сверхгиганта. Этот сверхгигант и черная дыра заключены на тесной орбите, причем звезда значительно расширяется из-за приливной силы черной дыры. С поверхности звезды непрерывно срывается поток вещества, который образует вихреподобный диск горячего светящегося газа. Из-за трения газ нагревается и по спирали всасывается внутрь, тем самым питая черную дыру. Образующийся в результате диск искрится рентгеновым излучением. Несмотря на то, что самому голубому сверхгиганту суждено вспыхнуть в сверхновую, до этого времени черная дыра поглотит значительную долю звезды.

Рождающиеся сверхмассивные черные дыры в центрах галактик — это самые громадные пожиратели звезд. Более маленькие предвестники этих сверхмассивных дыр образуются в плотных центрах новорожденных галактик, где имеется огромное множество сырья для их питания. Некоторая часть газа вблизи черной дыры имеет слишком большой кинетический момент, чтобы упасть прямо на дыру. Этот газ образует диск вокруг массивной черной дыры, во многом напоминающий диск вокруг Лебеда  $X_{-1}$ , разве что большего размера. Звезды, которые осмеливаются подойти к дыре слишком близко, ее приливные силы разрывают на куски и добавляют к диску. Огромное количество энергии, которое высвобождается в ходе этого процесса, мы можем наблюдать в виде квазара.

## Гравитационное излучение в эпоху черных дыр

По мере того как разворачивается эпоха черных дыр, вращающиеся по своим орбитам астрономические системы теряют энергию из-за диссипативного действия гравитационного излучения. Поскольку такая по-

теря источника энергии вряд ли служит определяющей характеристикой повседневной жизни, начнем с аналогии. Вообразите, что вы натягиваете тонкий упругий лист на металлический обруч, а затем помещаете в центр этого листа тяжелый мяч. Мяч проваливается и образует впадину. Далее, подумайте о том, как катался бы по этому листу мраморный шарик. Если для начала должным образом его толкнуть, то мраморный шарик движется по кругу вокруг тяжелого шара. Прodelав несколько орбит, он по спирали движется внутрь и, в конце концов, покрутившись, останавливается недалеко от низа впадины. Кинетическая энергия мраморного шарика теряется из-за сил трения между шариком и листом; энергия рассеивается, превращаясь в тепло и звуковые волны.

Аналогичное явление имеет место, когда черные дыры или звезды движутся по орбите вокруг друг друга. Масса вызывает местное искривление пространства. На наших диаграммах вложения искривленное двумерное пространство — аналогичное поверхности упругого листа — показывает, каким образом формируются расстояния между точками в искривленном пространстве. Около звезды кривизна пространства разрешает орбиту планеты и аналогична кривизне листа. Система планета-звезда также имеет одну особенность, аналогичную трению между листом и мраморным шариком: именно из-за этого трения мраморный шарик по спирали скатывается внутрь углубления. Гравитация и вправду создает эффект типа трения. Когда массивные тела движутся по кругу или совершают колебания, они создают чрезвычайно слабые возмущения или рябь в основной структуре пространства-времени. В процессе движения массивного тела в пространстве должна двигаться и кривизна пространства-времени, и это движение создает возмущения, которые распространяются через пространство-время. Этими возмущениями являются гравитационные волны. Они уносят энергию от массивных гравитирующих тел почти так же, как вибрации в упругом листе и колебания в воздухе уносят энергию от катящегося мраморного шарика.

Благодаря другому аналогичному процессу радиопередатчики могут транслировать радиопередачи. В радиопередатчике движутся заряженные частицы (электроны), которые создают возмущения в электромагнитных полях. Этими возмущениями являются радиоволны, переносящие музыку, спорт и прогнозы погоды по всей нашей планете. Электромагнитное излучение обусловлено движением электрических зарядов, а следовательно, электромагнитными силами, тогда как гравитационное излучение возникает из-за движения масс и гравитационной силы.

Из-за явной слабости гравитации количество энергии, переносимое гравитационными волнами, обычно очень мало. Однако если подождать достаточно долго, влияние этой крошечной утечки энергии становится

существенным, в силу чего объекты, движущиеся по орбите, должны медленно смещаться по спирали внутрь. Разрушение орбит посредством гравитационного излучения обычно происходит мучительно медленно. В отсутствие других катастрофических событий Земля, например, смещаясь по спирали, врезалась бы в Солнце более чем через девятнадцать космологических декад.

Несмотря на свою медлительность, именно гравитационное излучение виновато в разрушении орбиты одной наблюдаемой астрономической системы — *двойного пульсара*. Эта двойная система состоит из пары нейтронных звезд, которые оборачиваются по орбите относительно друг друга каждые восемь часов. Они разделены миллионом километров — расстоянием, сравнимым с диаметром нашего Солнца. Диаметр самих нейтронных звезд всего двадцать километров, так что, по сравнению с размером, их разделяет довольно большое расстояние. Этот двойной пульсар служит для нас двумя невероятно точными часами. Радиоимпульсы, образующиеся в результате вращения одной из нейтронных звезд, определяют один тип часов. Нейтронная звезда, испускающая радиоимпульсы, называется пульсаром. Регулярные изменения импульсов, обусловленные орбитальным движением двух нейтронных звезд, служат часами второго типа. И первые, и вторые позволяют производить очень точные измерения времени, но при сравнении их показаний орбитальные часы выказывают явную тенденцию к забеганию вперед. Из-за гравитационного излучения орбита разрушается, и расстояние между звездами постепенно уменьшается. Это уменьшение орбиты, в свою очередь, вынуждает звезды вращаться вокруг друг друга быстрее, что еще больше ускоряет ход орбитальных часов (по сравнению с часами пульсара).

Орбита двойного пульсара раскручивается в точном соответствии с общей теорией относительности и сопутствующей ей идеей о том, что гравитационное излучение приводит к разрушению орбиты. Таким образом, двойной пульсар позволяет нам чрезвычайно точно измерить предсказания общей относительности. Джо Тейлор и Рассел Халс открыли эту систему в 1974 году. На протяжении двух следующих десятилетий они проводили тщательные измерения времени. Полученные ими результаты потрясающим образом совпали с предсказаниями общей теории относительности, за что в 1993 году им присудили Нобелевскую премию по физике.

Двойной пульсар проживет не слишком долго по сравнению с теми длинными временными эпохами, к которым мы уже привыкли. Всего через 250 миллиардов лет две нейтронные звезды завершат свое спиральное сближение и сольются воедино. В результате их гравитационного объединения образуется новая черная дыра вкупе с огромным выбросом

гравитационного излучения. Таким образом, двойной пульсар исчезнет задолго до завершения эпохи звезд. Однако образующаяся в результате этого слияния черная дыра куда более долговечна и вполне способна дожить до шестьдесят пятой космологической декады.

Когда Вселенная вступает в эпоху черных дыр, сохраняются только те двойные «звездные» системы, которые составляют черные дыры. Так же, как двойной пульсар сжимает свою орбиту, все бинарные системы испытывают разрушение орбиты и финальное слияние, изобилующее фейерверками гравитационного излучения. Чтобы дожить до эпохи черных дыр, в начале своего существования двойная система должна быть разделена расстоянием, превышающим два световых года. Чтобы прожить дольше, двойным системам нужно еще большее разделение в начале, позволяющее пережить неумолимую утечку гравитационного излучения. К пятидесятой космологической декаде сохранившиеся бинарные системы изначально должно было разделять расстояние в 650 световых лет; чтобы пережить шестидесятую космологическую декаду, двойные системы в самом начале должны быть разделены расстоянием, превышающим размер Млечного Пути. Чтобы прожить до восьмидесятой космологической декады, двойная система из черных дыр в начале своего пути должна быть разделена расстоянием, превышающим всю видимую сегодня Вселенную.

## Излучение Хокинга и гибель черных дыр

Черные дыры не абсолютно черные. На протяжении огромных периодов времени они чрезвычайно медленно излучают в космическое пространство тепло. Тепло — это разновидность энергии, а энергия эквивалентна массе. Таким образом, объект, генерирующий тепло, также должен и медленно терять массу. По мере того как утекает масса-энергия черной дыры, скорость потери ею тепла постепенно возрастает, в силу чего черная дыра не может существовать вечно. Ей суждено испариться, превратившись в ничто.

Нам известно, что черная дыра — это «объект, гравитация поверхности которого не позволяет оторваться от нее даже свету», и все же она может излучать энергию в пространство, что выглядит противоречивым. В самом деле, феномен излучения черной дыры — это квантово-механический эффект, который невозможно понять в рамках только лишь общей теории относительности. Испарение черной дыры — один из нескольких вычислимых результатов, относящихся к области *квантовой гравитации*.

Квантово-механический процесс, вызывающий испарение черной

дыры, открыл в 1974 году Стивен Хокинг; именно в его честь он получил название *излучения Хокинга*. Излучение Хокинга, испускаемое поверхностью звездной или сверхмассивной черной дыры, состоит, главным образом, из протонов и нейтрино, а также некоторой доли гравитонов. Спектр излучения, испускаемого черной дырой, имеет точно такую же форму, как и спектр абсолютно черного тела, который испускается объектом, имеющим однородную неизменную температуру (как уже обсуждалось в первой главе). Температура конкретной черной дыры определяется ее массой: чем больше черная дыра, тем ниже ее температура. Черная дыра с массой Солнца имеет температуру лишь на 0,0000001 градуса выше абсолютного нуля, тогда как сверхмассивные черные дыры намного холоднее.

Тепловое излучение черной дыры можно объяснить квантовым принципом неопределенности Гейзенберга. Исследуя свойства белых карликов, мы видели, что принцип неопределенности не позволяет нам точно знать одновременно импульс и положение частицы. Аналогичным образом, принцип неопределенности предполагает, что энергия системы и временной промежуток, на протяжении которого эта система содержит определенное количество энергии, невозможно знать точно одновременно. Эта энергoвременная форма принципа неопределенности Гейзенберга означает, что закон сохранения энергии справедлив в среднестатистическом случае, но не в абсолютно точном смысле. Закон сохранения энергии может нарушаться при условии, что это нарушение имеет место в течение достаточно короткого времени. Более значительные нарушения закона сохранения энергии происходят в течение более коротких промежутков времени. Пары частиц, называемых из-за их временного статуса *виртуальными частицами*, непрерывно создаются из квантовой материи пространства. Эти частицы живут лишь очень короткое время, по истечении которого они должны вновь аннигилировать — превратиться в ничто. Один из способов, позволяющих получить хоть какое-то представление об этой необычной концепции виртуальных частиц, — вообразить, что вакуум, который считается пустым пространством, способен заимствовать энергию. Пары виртуальных частиц получают энергетическую «ссуду», после чего проживают короткий промежуток времени, «взятого взаймы», а потом бывают вынуждены отдать свой долг вакууму и исчезнуть.

Чтобы понять, как данная концепция связана с испарением Хокинга, представьте пару виртуальных частиц, образовавшихся неподалеку от горизонта событий черной дыры. В краткие мгновения существования этой пары один из ее членов может упасть в черную дыру и тем самым приобрести энергию. Если таким образом приобретает достаточное количество энергии, частицам удается продвинуться из положения

временных виртуальных в разряд реально существующих. Чтобы это произошло, для создания массы-энергии частиц используется небольшая доля гравитационной энергии черной дыры. Обретя реальное существование, вторая частица из пары — та, которая не падала в черную дыру, — может спастись. Во многих случаях вновь созданная частица упадет в черную дыру и полностью компенсирует ей оказанную энергетическую поддержку. Однако может случиться и так, что вторая частица вырвется из «лапа» черной дыры и улетит в космос. После такого побега масса-энергия черной дыры немного уменьшится. Получится, что черная дыра отдала часть своей энергии окружающей Вселенной.

Есть еще один способ визуального представления образования частиц посредством эффекта Хокинга. Он связан с невероятно огромными приливными силами, которые действуют вблизи поверхности черной дыры. Когда создаются пары виртуальных частиц, эти мощные приливные силы могут растащить их, из-за чего те уже не смогут аннигилировать друг с другом. Приливная сила совершает над парой частиц работу и тем самым наделяет их энергией. Если пара получит достаточное количество энергии, то есть если приливная сила совершит достаточную работу, то частица может сменить свой статус виртуальной на положение реальной частицы, уносящей энергию, изначально принадлежавшую черной дыре.

Как бы там ни было, в результате процесса Хокинга черная дыра испускает излучение и частицы, уносящие ее энергию. Таким образом черная дыра медленно теряет свою энергию и, соответственно, массу. По истечении достаточно продолжительных промежутков времени утечка энергии, вызванная излучением Хокинга, берет свое, и черная дыра постепенно испаряется.

Согласно одному из законов термодинамики тепло должно распространяться из областей повышенной температуры в более холодные области, но не наоборот. Поскольку черные дыры излучают тепло (энергию), значит, они должны иметь и температуру. Каждая из черных дыр немного горячее абсолютного нуля — температуры холодного пустого пространства. Эти температуры черных дыр невероятно малы: черная дыра с массой Солнца имеет температуру всего в одну десятиллионную ( $10^{-7}$ ) градуса Кельвина. Более крупные черные дыры держатся за свою массу-энергию крепче, излучают куда менее эффективно и имеют еще более низкие температуры. Температура поверхности черной дыры обратно пропорциональна ее массе. Черная дыра с массой трех миллионов Солнц, расположенная в центре нашей Галактики, имеет фактическую температуру менее  $10^{-13}$  градусов Кельвина. Самые большие черные дыры, которые весят как миллиарды Солнц и живут в центрах активных галактик, имеют еще более низкие температуры.

Вселенная погружена в море излучения, оставшегося от первичной эпохи, начавшейся сразу после Большого взрыва. Это космическое фоновое излучение придает Вселенной фактическую температуру, в настоящее время составляющую около трех градусов Кельвина. Вселенная, имеющая такую температуру, значительно горячее черных дыр, поэтому в настоящее время космической истории тепло переходит от Вселенной к черным дырам. И хотя этот эффект относительно мал, черные дыры, поглощая излучение, действительно наращивают массу. Однако по мере старения Вселенной поля фонового излучения растягиваются до больших длин волн, вследствие чего фактическая температура падает. В некоторый момент времени в будущем, когда Вселенная наконец станет достаточно прохладной, черные дыры отдадут свою энергию и массу окружающей их Вселенной. Время этого перехода зависит от того, насколько быстро расширяется Вселенная — является ли Вселенная открытой или замкнутой — и от массы черных дыр.

В случае плоской Вселенной температура неба становится ниже температуры черной дыры с массой Солнца в двадцать первую космологическую декаду. Для черных дыр, масса которых составляет миллион солнечных, этот переход случится в тридцатую космологическую декаду. Черные дыры, содержащие миллиард солнечных масс, соответственно, начинают испаряться в тридцать пятую космологическую декаду. К началу эпохи черных дыр все, кроме самых больших черных дыр, активно излучают энергию и теряют массу.

В дополнение к космическому фоновому излучению море излучения, пронизывающее Вселенную будущего, образуется также в результате аннигиляции темной материи и распада протонов в белых карликах. Это дополнительное фоновое излучение также отсрочивает испарение черных дыр. Однако, в конце концов, вследствие расширения Вселенной эти поля излучения растягиваются до достаточно низких температур, так что черные дыры начинают излучать энергию быстрее, чем поглощать ее.

Полное время жизни черной дыры зависит от ее начальной массы. Черные дыры большего размера имеют большую массу, которую они могут излучать, более низкие температуры и живут дольше. Черная дыра с массой Солнца испаряется примерно за шестьдесят пять космологических декад (сто тысяч квадрильонов квадрильонов квадрильонов квадрильонов лет) — время настолько долгое, что записывать его таким образом кажется почти смешным. Самые маленькие черные дыры, которые, согласно предположениям ученых, существуют в значительных количествах, имеют массы, в три–пять раз превышающие массу Солнца, и испарятся в шестьдесят седьмую космологическую декаду.

Черные дыры с массой в миллион Солнц, типа черной дыры, живущей в центре нашей Галактики, проживут значительно дольше звезд-

ных черных дыр. Однако через восемьдесят три космологические декады исчезнут и они. В ходе этого процесса к девяносто восьмой космологической декаде испаряется даже черная дыра, масса которой сравнима с массой нашей Галактики (сто миллиардов солнечных масс). В результате по истечении сотой космологической декады большинство черных дыр исчезнет и Вселенная будет состоять, главным образом, из излучения, нейтрино, электронов, позитронов и прочих продуктов распада.

Испарение черных дыр в процессе излучения Хокинга служит еще одним примером непрерывной астрофизической борьбы гравитации с термодинамикой. Черные дыры являются естественным следствием сильной гравитации, как описывается в общей теории относительности. Они образуются, когда гравитация одерживает победу над давлением и подавляет все остальные силы. С другой стороны, испарение черных дыр — это классический пример образования энтропии. Излучение, образующееся в ходе этого процесса, имеет большое количество энтропии. Тот факт, что испаряются даже черные дыры, означает, что окончательную победу должна одержать термодинамика, даже в случае с такими исключительными астрофизическими объектами.

## Внутри черных дыр

Что же на самом деле содержится внутри черной дыры? Ответить на этот вопрос, который в настоящее время находится в авангарде современных исследований черных дыр, крайне сложно. Тем не менее этот вопрос служит базой для обсуждения многих замечательных возможностей.

Одной из сложностей при рассуждении о внутреннем содержимом черной дыры является существование горизонта событий, который ведет себя подобно однонаправленной мембране. Этот горизонт пропускает информацию в черную дыру, но не выпускает ее обратно. Существование такого горизонта, вкупе с законами общей теории относительности, означает, что черные дыры, в каком-то смысле, — очень простые объекты. Как уже говорилось выше, волс у них не имеется.

Но что же на самом деле означает это выражение? С одной стороны, не имеет значения, вещество какого типа используется для образования черной дыры. Как только любое вещество попадает внутрь черной дыры, снаружи можно различить только ее массу, электрический заряд и момент импульса. Протоны ли, ядра железа или частицы экзотической темной материи — все они имеют один эффект, когда используются для образования черной дыры. Свой вклад в свойства черной дыры вносят только их масса, электрический заряд и кинетический момент.



Для большей конкретики рассмотрим обычную звезду и мысленно представим, что она сжимается в черную дыру. У такой звезды будет много «волбс» — сложных структур типа магнитных полей, ярких вспышек, поверхностных деформаций и звездных пятен. Теперь предположим, что звезда взорвалась, образовав черную дыру. У этой дыры нет никакой возможности сохранить магнитные поля, вспышки и прочие структуры. Грубо говоря, если бы черная дыра имела способность «держаться» за такие особенности, то между тем, что находится внутри горизонта событий, и тем, что расположено снаружи, существовала бы какая-то связь. Но поскольку подобное сообщение строго запрещено, черная дыра должна отказаться от всех поступающих извне свойств. В реальности черная дыра делает это, излучая всю излишнюю энергию, связанную с этими структурами. В конце концов, остаются только три свойства: масса черной дыры, ее электрический заряд и спин (момент импульса). Все прочие воспоминания, оставшиеся от исходной звезды, должны быть стерты.

Таким образом, все черные дыры с одинаковой массой, электрическим зарядом и моментом импульса *абсолютно одинаковы*. Из-за этой изящности и простоты и несмотря на всю свою экзотичность, среди всех звездных объектов именно черные дыры имеют наилучшее теоретическое описание. Свойства черной дыры определяются всего тремя числами, и все эти числа включает общая теория относительности. Совсем по-другому дела обстоят с обычными звездами вроде нашего Солнца. Мы располагаем хорошим теоретическим пониманием звезд и можем предсказать время их жизни и общие свойства. Вместе с тем, звезды настолько сложны, что мы никогда не сможем записать уравнения, которые описывали бы каждое их свойство: каждую звездную вспышку, каждое пятно и протуберанцы в короне. Для полного описания звезды понадобится куда больше трех чисел.

Рассмотрим теперь черные дыры будущего. Эти черные дыры могут и будут взаимодействовать с внешней Вселенной, особенно через излучение Хокинга. Испускание излучения любым звездным объектом, включая черную дыру, может ускорить либо замедлить вращение этого объекта. Что именно произойдет — зависит от того, как испускается излучение (какой момент импульса оно уносит). В случае черных дыр испущенное излучение имеет тенденцию скорее к замедлению вращения, нежели к его ускорению. В результате первым исчезает момент импульса черных дыр. Таким образом, черные дыры отдаленного будущего будут иметь только два свойства: массу и электрический заряд. В случае больших черных дыр, образующихся в ходе астрофизических процессов и живущих достаточно долго, чтобы дожить до эпохи черных

дыр, их электрический заряд намного меньше массы. Чаще всего черные дыры характеризует всего одно число — их масса. Электрический заряд играет свою роль лишь в заключительные мгновения процесса испарения черной дыры.

«Гипотеза об отсутствии волос» означает, что из всех свойств внутренней части горизонта событий черной дыры мы можем сообщаться только с массой, электрическим зарядом и моментом импульса. Но ведь внутри должно *что-то* быть! Чтобы говорить о том, что же на самом деле находится внутри черной дыры, мы должны воспользоваться так называемой «чистой теорией». Другими словами, мы используем законы физики (в данном случае, главным образом, общую теорию относительности Эйнштейна), чтобы вычислить, что происходит внутри черной дыры, но мы не располагаем ни одним методом прямой проверки своих умозрительных построений.

Согласно классической общей теории относительности, не учитывая квантово-механические эффекты, самым поразительным свойством внутренней области черной дыры служит расположенная в ее центре *сингулярность* пространства-времени. Роджер Пенроуз, известный физик-теоретик и математик, доказал теорему, согласно которой каждая черная дыра должна содержать сингулярность. Этот результат имеет далеко идущие последствия, причем он справедлив для любой черной дыры, независимо от способа ее образования и всех прочих исторических признаков. Сингулярность — это точка, в которой, грубо говоря, на волю вырываются все демоны ада. В месте нахождения сингулярности в черной дыре плотность вещества становится бесконечной. Под бесконечным мы подразумеваем не просто очень большую величину, а величину, которая действительно больше любого числа, которое вы можете себе представить. Ясно, что в сингулярности должно происходить что-то очень интересное.

Обычно когда физические величины становятся бесконечными в теории, это означает, что что-то пошло сильно не так или что данная теория не является полной. Сингулярность в центре черной дыры возникает потому, что наше понимание физики остается неадекватным при достаточно больших значениях энергии и плотности, или, что эквивалентно, на малых расстояниях. Для огромных значений плотности вблизи предполагаемой сингулярности внутри черной дыры свою роль должны играть квантово-механические эффекты. Однако, несмотря на это, мы не располагаем полным и самосогласованным описанием физических законов, которые одновременно включали бы гравитацию (общую теорию относительности) и квантовую механику. Таким образом, хотя квантовая гравитация явно определяет истинную природу сингулярности, находя-

щейся внутри черной дыры, окончательного описания в настоящее время у нас нет.

Тем не менее в сингулярности может иметь место множество интересных эффектов. Некоторые физики полагают, что эта сингулярность — путь из нашей Вселенной в другие вселенные или, быть может, в какое-то другое место нашей Вселенной. Мы должны с большой осторожностью относиться к тому, что мы подразумеваем под нашей Вселенной и другими вселенными. В данном контексте наша Вселенная — это вся причинно связанная область пространства-времени. Другими словами, будь у вас космический корабль, способный передвигаться со скоростью света, и располагай вы временем для путешествия, равным всему возрасту Вселенной, наша Вселенная содержала бы все места, которые вы в таком случае могли бы посетить. Если бы вы попали внутрь горизонта событий черной дыры, то вы никогда не смогли бы вернуться в нашу Вселенную. Таким образом, горизонт событий являет собой фактическую границу Вселенной. Тем не менее, в принципе, что-то способно отправиться в сингулярность, расположенную в центре черной дыры, и появиться в другой вселенной — вселенной, пространство-время которой связано с нашей Вселенной разве что только в точке сингулярности черной дыры. Таким образом, сингулярности, имеющиеся в черных дырах, могут стать «воротами» в другие вселенные.

Само существование черных дыр в нашей Вселенной непременно означает, что геометрия пространства-времени нашей Вселенной далеко не проста. Помимо кривизны пространства-времени, образуемой в связи с сильной гравитацией черных дыр, горизонты событий служат фактическими границами нашей Вселенной.

## Сложность в эпоху черных дыр

С позиций крайнего редукционизма, человеческое существо есть не что иное, как большая совокупность протонов, нейтронов и электронов. Именно из этих трех основных компонентов состоят атомы, которые связываются в молекулы, фантастически сложным образом организованные в клетки, триллионы которых во взаимном сотрудничестве образуют человека. Приблизительно  $10^{29}$  простых частиц непостижимым образом взаимодействуют друг с другом, создавая систему, которая, судя по всему, является чем-то большим нежели, простой суммой составляющих ее частей.

Наш мир отличается сложностью, потому что гигантские количества протонов, нейтронов и электронов располагали огромным временем

для взаимодействия и развития в интересные структуры. Планеты образовались, отложения осели в океанах, а жизнь возникла и развилась потому, что наша Вселенная существует гораздо дольше временных промежутков длиной в наносекунду, необходимых для протекания химических реакций. Если бы мы отправились в далекое прошлое, в эпоху нуклеосинтеза, когда Вселенной было всего несколько минут от рода, нам было бы крайне трудно представить, каким образом практически однородное море, состоящее из ядер водорода и гелия, могло получить возможность образовать что-либо столь же сложное, как простой компьютер, не говоря уже о планетарном обществе, состоящем из пяти миллиардов человек, взаимодействующих в рамках поразительно богатой и разнообразной экосистемы.

Ясно, что многочисленные частицы, которые ведут себя в соответствии с простыми и четко определенными законами, при условии согласованного действия могут образовать очень сложные структуры. Мы хотим вызвать у читателя интерес к идее о том, что в эпоху черных дыр множество черных дыр может принять на себя ту роль, которую в современном нам мире играют протоны, нейтроны и электроны. Возможно ли, при условии наличия достаточного времени, достаточного пространства и достаточного количества черных дыр, развитие действительно сложных структур? Может ли мир, созданный из взаимодействующих черных дыр, существовать в том же смысле, в каком существует наш мир, образованный протонами, нейтронами и электронами? Ответ нам не известен, но, судя по всему, такая возможность не исключена. В частности, мы можем подробно описать, каким образом из взаимодействующих черных дыр можно построить простые аналоговые и цифровые схемы. А имея на руках схемы, можно говорить и о создании компьютеров. А если возможны компьютеры, то, быть может, не заставят себя долго ждать также жизнь и разум.

## **Компьютеры на основе черных дыр**

Как бы фантастично это ни звучало, некоторая совокупность черных дыр, самогравитирующая система, может действовать подобно своеобразному компьютеру. Пускаясь в такие рассуждения, мы обходим стороной один очевидный вопрос: как такой компьютер можно было бы создать на практике. То есть мы не будем размышлять о том, каким образом черные дыры помещаются на требуемые орбиты или как нужно расположить большие массы, чтобы получить необходимые фоновые силы гравитации, сохраняющие конструкцию нашего гипотетического компьютера. Мы покажем в точности следующее: как только соответ-

ствующие совокупности черных дыр оказываются в нужной конфигурации, жизнеспособный компьютер на основе черных дыр вполне способен к функционированию. Составляющие нашего предполагаемого и чисто теоретического компьютера, основанного на черных дырах, безусловно, не являются ни самыми эффективными, ни самыми практичными устройствами. И все же если бы из этих составляющих был собран компьютер, он бы заработал.

На самом базовом уровне цифровые компьютеры состоят из трех фундаментальных логических элементов, которые обычно называют вентилями НЕ, И и ИЛИ. Объединяя большие количества этих простых вентиляей, выполняющих основные логические операции, можно создать практически неограниченно сложный компьютер.

Логические элементы совершают действия над числами, или, точнее, их представлениями. Любое число можно записать или представить в двоичной форме — в виде последовательности единиц и нулей:

$$10101010100001101010\dots$$

Число сто, к примеру, можно записать как

$$1100100.$$

Первой проблемой при создании компьютера на основе черных дыр является необходимость представления двоичных чисел с помощью этих самых черных дыр. Быть может, самый простой способ достичь этой цели — использовать последовательность черных дыр, движущихся в космическом пространстве, в качестве строки знаков. Представьте линию, состоящую из пробелов, разделенных постоянными интервалами. Каждый пробел в этой линии может заполнить или не заполнить черная дыра. Если в каком-то конкретном сегменте присутствует черная дыра, то создаваемое нами число имеет в данной позиции единицу (1). С другой стороны, если этот пробел пуст, значит, в данной позиции наше число имеет нуль (0). Чтобы представить число сто, нам понадобится строка из семи пробелов с черными дырами в третьей, шестой и седьмой позициях (считая от первого знака справа). Для представления больших чисел необходимы более длинные строки черных дыр и пробелов.

Теперь, когда мы разобрались с представлениями чисел, мы можем создать логические вентили, которые совершают над этими числами различные операции. В качестве первого примера построим вентиль ИЛИ, который берет в качестве входных данных два числа и создает единый выходной поток. Два входящих числа представлены в двоичной форме и могут быть расположены так, чтобы первые знаки каждого числа

оказались рядом. Если хоть одна из входящих цифровых строк имеет в данном месте 1, то выходящий поток тоже имеет в этой позиции 1. Например, допустим, что входящими потоками являются

$$101000101110$$

и

$$010101010101.$$

После прохождения этих чисел через логический вентиль ИЛИ выходящий поток — новое число — имеет вид

$$; \quad 111101111111.$$

Чтобы осуществить эту операцию с помощью строк черных дыр, представляющих числа, мы должны создать гравитационную потенциальную яму (или силовое поле), направляющую два потока черных дыр рядом. По мере сближения двух строк черных дыр между ними возникает гравитационное притяжение. Как только расстояние между двумя потоками становится намного меньше расстояния между двумя последовательными пробелами в каждом из потоков, черные дыры (если таковые в данном сегменте присутствуют) сливаются друг с другом, образуя новые черные дыры. Таким образом, мы создали логический вентиль ИЛИ. Если хотя бы у одного из входящих потоков в данной позиции имеется черная дыра, выходящий поток тоже имеет в этой позиции черную дыру (см. рис. 20).

Построим теперь логический вентиль НЕ. В этом логическом элементе используется только один входящий поток знаков. Логический элемент НЕ изменяет все знаки входящего потока. Все единицы превращаются в нули, а все нули — в единицы. Например, под действием логического элемента НЕ входящий поток

$$11010001$$

превращается в выходящий поток

$$00101110.$$

Чтобы создать логический вентиль НЕ для строк черных дыр, мы выполняем довольно дорогостоящую процедуру. Вентиль НЕ сам по себе является непрерывным потоком черных дыр — контрольной строкой, в каждом пробеле которой имеется черная дыра. Этот контрольный поток направляется перпендикулярно входящему потоку, входящему

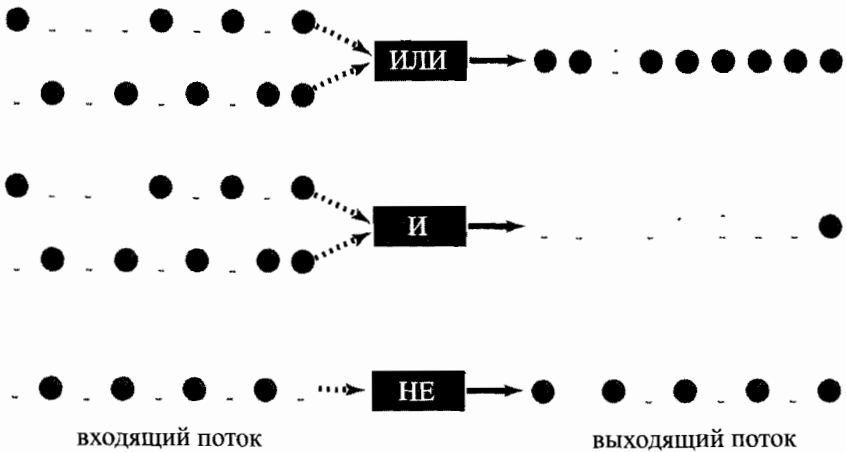


Рис 20 На данной диаграмме приводится принцип работы компьютера на основе черных дыр. В верхней части диаграммы изображен гравитационный вентиль ИЛИ. Два потока черных дыр (два «числа») входят в логический элемент, и только один поток выходит из него (одно выходное «число»). Данная позиция выходного потока содержит черную дыру в том случае, если соответствующая позиция была занята хотя бы в одном из входящих потоков. В средней части диаграммы показан гравитационный вентиль И. Выходное число, вновь представленное строкой черных дыр, имеет в данной позиции черную дыру тогда и только тогда, когда черную дыру в этой позиции имеют оба входящих потока знаков. В нижней части диаграммы изображен гравитационный вентиль НЕ. Всего одно число, строка черных дыр, входит в этот логический вентиль, который преобразует черные дыры в пробелы, а пробелы — в черные дыры.

числу. Выходящий поток является частью контрольного потока (но не входящего), остающейся после пересечения двух потоков. Если в данной позиции входящего потока присутствует черная дыра, происходит столкновение. Полный импульс продукта этого столкновения удаляет его из потока, и в выходящем потоке образуется пробел (нуль). Таким образом, если в логический вентиль НЕ входит черная дыра, то из него выходит пробел. Если в данной позиции входящего потока черной дыры нет, то черная дыра из контрольного потока переходит в выходной поток без изменений. Таким образом, если в логический вентиль НЕ входит пробел,

то из него выходит черная дыра. Как и требовалось, наш логический вентиль НЕ превращает черные дыры в пробелы, а пробелы — в черные дыры (см. рисунок 20).

Третий и последний логический элемент, называемый вентилем И, преобразует два входящих числа в одно выходящее. Выходящая строка знаков содержит в некоторой позиции единицу тогда и только тогда, когда обе входящие строки имеют в данной позиции единицы. В противном случае, если в данной позиции одного из входящих потоков содержится нуль, выходящий поток в этой позиции имеет нуль. Взяв те же две входящие строки, что и ранее,

:            101000101110

и

010101010101,

логический вентиль И создает выходящий поток (число)

000000000100.

Чтобы сделать логический вентиль И с помощью черных дыр, мы начинаем с концепции логического вентиля НЕ, сконструированного ранее. Первый входящий поток черных дыр пропускается через логический вентиль НЕ так, что выходящим потоком этого взаимодействия является «противоположность» исходного входящего потока. Затем этот обработанный поток помещается на траекторию столкновения со вторым входящим потоком. Оставшаяся часть обработанного потока, после столкновения со вторым входящим потоком, становится выходящим потоком всего логического вентиля И (см. рисунок 20).

Посмотрим, как работает этот логический элемент. Рассмотрим некоторую позицию в потоке. Если входящий поток номер один имеет в этой позиции черную дыру, то его обработанная противоположность имеет в данной позиции пробел. Затем этот пробел взаимодействует со вторым входным потоком. Если второй входной поток тоже содержит черную дыру, черная дыра появится и в выходном потоке. Таким образом, чтобы выходящий поток имел черную дыру, оба входящих потока должны иметь черную дыру в данной позиции.

Несмотря на всю простоту этих операций, имея достаточное количество логических вентилях, можно построить вычислительную машину огромной сложности. В принципе. На практике же компьютер, построенный из этих логических элементов, будет отягощен тремя важными



факторами: неустойчивостью, рассеянием и испарением самих его составляющих. Неустойчивость приводит к разрушению всей системы из-за внутренних взаимодействий ее составляющих. Рассеяние приводит к потере энергии и искривлению орбит черных дыр. Наконец, сами черные дыры имеют хотя и долгое, но конечное, время жизни. Ясно, что, когда они испарятся, компьютер прекратит вычислять.

Как и наш компьютер, построенный на черных дырах, системы, созданные из объектов, взаимодействующих посредством гравитации, часто бывают неустойчивы. Рассмотрим, например, научно-фантастический сценарий, согласно которому в нашей Солнечной системе, с обратной стороны Солнца, обитает зловещая планета. Эта зловещая планета намерена занять орбиту Земли, но смещена ровно на полгода. Эти две планеты никогда не видят друг друга, так как их разделяет Солнце. Однако такая конфигурация нестабильна, а этот сценарий несостоятелен. Представьте, что Солнце немного сдвинулось из центра такой системы (см. рис. 21): ведь обе планеты совместными усилиями попытаются оттащить Солнце как можно дальше от центра. Солнце попросту невозможно удержать в состоянии равновесия между двумя противодействующими силами гравитации. В отсутствие тщательно продуманной схемы наш компьютер на основе черных дыр тоже подвержен действию неустойчивости такого рода. Если один из наших «знаков», представленных черными дырами, немного сдвинуть с нужного места, остальные дыры, расположенные ниже по линии, могут оттащить его еще дальше от надлежащего места, что может привести к ошибке в вычислениях или, что еще хуже, к уничтожению целого числа. Чтобы отсрочить то время, которое потребуется, чтобы такого рода неустойчивость причинила вред нашей вычислительной машине, мы можем сделать компьютер большего размера, чтобы черные дыры дальше отстояли друг от друга. Быть может, существует также возможность создания более умных и сложных логических элементов, в меньшей степени подверженных гравитационной неустойчивости.

Помимо неустойчивости, которая портит логические составляющие, наш компьютер на основе черных дыр, как и любая другая физическая система, подвержен различного рода рассеянию. В обычных системах распространенным источником рассеяния становится трение. Оно приводит к замедлению движения, остановке или износу механизмов. В компьютере, основанном на черных дырах, одним очевидным источником рассеяния является потеря энергии из-за гравитационного излучения. Движущиеся массивные тела, например черные дыры, составляющие наш компьютер, при движении через космическое пространство излучают энергию. Когда энергия теряется, орбиты этих тел должны

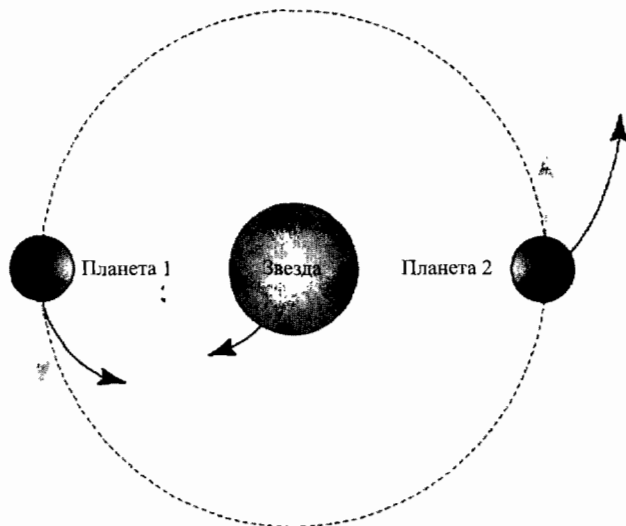


Рис. 21. Если бы в природе существовали две планеты, расположенные на одной орбите, такая система была бы нестабильной. Совместное гравитационное действие обеих планет сместило бы центральную звезду из центра этой системы, а сами планеты отбросило бы на сложные неустойчивые орбиты

соответственно изменяться. Вся система может сохранять свою целостность лишь до тех пор, пока это излучение не изменит орбиты слишком сильно. К счастью, когда мы, стремясь отсрочить неустойчивость, увеличиваем расстояние между черными дырами, возрастает и время, которое пройдет прежде, чем гравитационное излучение повлияет на нашу систему. Безусловно, в силу этого увеличивается и время, которое требуется нашему компьютеру для выполнения операций: потоки черных дыр вынуждены проходить более длинное расстояние. Однако для данного увеличения расстояния эффекты гравитационного излучения уменьшаются быстрее, чем удлиняется операционное время.

Наконец, последним препятствием в создании компьютера на основе черных дыр является конечное время жизни самих черных дыр. По истечении достаточного времени черные дыры испаряются. И хотя это достаточно долгий промежуток времени, излучение Хокинга ограничивает объем вычислительной мощности, доступный в будущем.

## Схемотехника на основе черных дыр

Другим способом представления сложных структур в эпоху черных дыр служит рассмотрение самогравитирующих схем, которые также можно назвать самогравитирующими устройствами. Подобные схемы напрямую связаны с компьютерами: они могут выполнять аналоговые вычисления сами и, кроме того, необходимы для комплектации большинства цифровых компьютеров.

Простая схема, известная под названием LRC-схема, содержит три основные составляющие. Первая, индуктор, обеспечивает систему инерцией и, таким образом, ведет себя подобно массе. Вторая составляющая, резистор, рассеивает энергию и тем самым создает эффект типа трения. Третья составляющая, называемая конденсатором, обеспечивает накопление заряда, а значит, и энергии. Из этих простых составляющих можно легко создать генератор — устройство, вырабатывающее электрический ток, который совершенно определенным образом изменяется во времени. Из таких генераторов вкупе с другими составляющими можно построить более сложные устройства.

Простой генератор можно соорудить из гравитирующих составляющих, существующих в эпоху черных дыр. В качестве аналога конденсатора (устройства для накопления энергии) мы используем самогравитирующее гало вращающихся по орбите тел, во многом напоминающее гало современной нам Галактики. В будущем это гало должно состоять, в основном, из черных дыр. Для того чтобы сделать схему накопления энергии на основе гало точным аналогом простого конденсатора, гало должно иметь форму, отличную от формы гало нашей Галактики. Однако колебания того или иного типа разрешает огромное множество различных гало. Остатки скоплений и сверхскоплений галактик составляют большие гравитационно связанные совокупности черных дыр — именно такие структуры необходимы для этого гало. Затем нам нужна большая масса — либо большая черная дыра, либо совокупность черных дыр, связанных в астрономическую систему, — для фактического совершения колебаний. Масса этого объекта играет в нашей схеме роль индуктора. Наконец, необходим резистор — устройство, обеспечивающее рассеяние. Если массы тел, составляющих гало, малы по сравнению с массой генератора, то гравитационные взаимодействия имеют тенденцию замедлять более крупное осциллирующее тело по мере его движения в море более мелких тел. Этот эффект называется динамическим трением и обеспечивает сопротивление нашей схемы. Таким образом, у нас есть все составляющие, необходимые для построения в будущем

простой аналоговой схемы. Более того, все наши составляющие сделаны из самогравитирующих тел, имеющихся в эпоху черных дыр.

## Жизнь в эпоху черных дыр

Таким образом, если в очень отдаленном будущем эпохи черных дыр могут существовать сложные машины, как насчет жизни? Могут ли в столь чужеродной среде обитать хоть какие-то живые существа? Для того чтобы размышлять о жизни в этом далеком окружении, мы должны встать на позиции оптимизма и принять тот факт, что фундаментально необходима лишь базовая структура жизни, а совсем не та реальная материя, из которой состоят знакомые нам земные формы жизни. В частности, жизнь, в основе которой лежит углерод, попросту невозможна в эту будущую эпоху, которая настанет после того, как все протоны, а значит, и все ядра углерода распадутся на более мелкие частицы. Жизнь должна будет принять другие, менее привычные, формы.

Допуская возможность существования абстрактных форм жизни, мы можем сделать несколько общих высказываний о природе такой жизни. Согласно гипотезе соответствия масштабов, выдвинутой Фрименом Дайсоном и описанной во введении, скорость метаболических процессов абстрактного существа пропорциональна температуре, при которой это существо живет. Для сознающего существа скорость его осознания, скорость, с которой это существо ощущает события своей жизни, определяется аналогичным образом: путем умножения на соответствующий коэффициент.

Максимальная температура, легко достижимая в эту будущую эпоху, будет фактической температурой поверхности звездных черных дыр. Из-за эффекта Хокинга эти объекты излучают с температурой около одной десятиллионной градуса Кельвина, что приблизительно в три миллиарда раз меньше рабочей температуры человеческого организма (335 градусов Кельвина). Таким образом, максимально возможная рабочая температура для существа эпохи черных дыр в несколько миллиардов раз меньше температуры земных форм жизни. Если принять во внимание это температурное ограничение, максимально возможная скорость осознания ниже сегодняшней в несколько миллиардов раз.

Замедление скорости процессов обмена веществ и мышления более чем компенсируется громадным увеличением количества доступного времени. С начала эпохи черных дыр будущие формы жизни имеют в  $10^{30}$  раз больше времени, чем те, что обитают в современной Вселенной. Для осознанного мышления, даже если оно будет протекать гораздо

медленнее, времени будет предостаточно. Например, чтобы выговорить это предложение, может потребоваться несколько тысячелетий, а может, и много больше.

Несмотря на то, что более низкие скорости осознания легко согласуются с большим количеством доступного времени, дополнительные ограничения на возможные в будущем формы жизни накладывают соображения, связанные с энергией и энтропией. Опять-таки следуя Дайсону, мы можем определить фактическую сложность живого существа как скорость создания им энтропии в единицу субъективного времени. Энтропия служит мерой количества информации, содержащейся в какой-либо физической системе или процессе. Субъективное же время — это просто реальное физическое время, умноженное на некоторый коэффициент, определяемый температурой: эта величина учитывает замедление скоростей обмена веществ и мышления для существ, живущих при низких температурах. Таким образом, эта мера сложности представляет скорость, с которой живое существо может обрабатывать информацию.

Согласно данной схеме измерения величина фактической сложности человеческого существа составляет  $10^{23}$ . Чтобы получить это значение, мы используем производимую мощность приблизительно в двести ватт на человека, работающего при температуре около трехсот градусов Кельвина, и допускаем, что одно мгновение осознания соответствует одной секунде реального времени. Ради сравнения предположим, что мы считаем живым существом звездную черную дыру. Ее значение фактической сложности составило бы всего  $10^{13}$ . В этом смысле человеческие существа куда сложнее черных дыр: в десять миллиардов раз. Этот результат имеет важные следствия: даже если бы какая-то предполагаемая форма жизни могла использовать всю мощность звездной черной дыры, ее общая сложность была бы крайне ограниченной по сравнению с современными формами жизни.

## Последние мгновения

Последние секунды черной дыры весьма впечатляющи. Когда масса и размер черной дыры уменьшаются, ее температура и скорость испарения постепенно увеличиваются. Когда масса черной дыры уменьшается до массы большого астероида, ее температура Хокинга аналогична комнатной температуре, и она излучает слабый свет в инфракрасном диапазоне. Излучив еще девяносто пять процентов своей массы, поверхность черной дыры становится такой же горячей, как Солнце. Черная дыра с температурой Солнца — интересный объект, особенно в эту тус-

кую предпоследнюю эпоху. Гравитация такой черной дыры, имеющей массу в  $10^{22}$  граммов, не показалась бы вам особенно сильной, если бы вы не рискнули подойти достаточно близко. Если бы вы парили в десяти километрах над горизонтом событий, сила гравитации находящейся под вами черной дыры была бы чуть меньше силы гравитации, действующей на поверхности Земли. С этого расстояния в десять километров черная дыра с температурой Солнца напоминала бы тусклую звезду в ночном небе. Эту звезду невозможно было бы увидеть невооруженным глазом, но с помощью большого телескопа она была бы видна как бледная белая точка, покачивающаяся в темноте.

Даже относительно горячая черная дыра живет долго. Черная дыра с температурой Солнца проживет  $10^{32}$  лет. На протяжении большей части этого времени испаряющаяся черная дыра испускает, главным образом, безмассовые частицы типа нейтрино и фотонов. Из черной дыры также появляется небольшая примесь гравитонов — безмассовых частиц, переносчиков гравитационной силы. По мере того как масса черной дыры постепенно утекает в пространство, увеличивается как ее температура, так и скорость ее испарения. С приближением конца черная дыра становится ослепительно яркой, а окончательное исчезновение этого объекта происходит во вспышке. В последнюю секунду своей жизни черная дыра преобразует в лучистую энергию почти миллион килограммов вещества. Угасая, черная дыра производит не только безмассовые частицы. Из горизонта событий появляются и более тяжелые частицы, включая электроны, позитроны, протоны и антипротоны. В самые последние мгновения образуется также множество экзотических частиц, включая, возможно, слабо взаимодействующие массивные частицы, населяющие современные гало галактик.

Взрывной выброс, который черная дыра дает в последнюю секунду своего существования, в миллиард раз мощнее бомбы, которая была сброшена на Хиросиму. Результирующий взрыв создает такое количество энергии, главным образом, в виде гамма-лучей, которое можно наблюдать с расстояния во много световых лет. Астрономы «обшарили» все небо в поисках подобных всплесков гамма-излучения и пока что не обнаружили никаких свидетельств взрывов черных дыр. Таким образом, в настоящее время мы питаем относительную уверенность в том, что сегодня существует очень мало маленьких черных дыр (если и существует вообще). Вселенной придется терпеливо прождать шестьдесят семь космологических декад, прежде чем звездные черные дыры начнут тратить свою массу и, в конечном итоге, породят первые взрывы черных дыр.

Большинство чрезвычайно тяжелых частиц, которые рождаются во время гибели черной дыры, также имеют чрезвычайно короткое время

жизни: им отпущено гораздо меньше секунды. Эти массивные частицы исчезают почти сразу после своего рождения. Электроны и позитроны, образующиеся во взрыве, живут гораздо дольше. Более того, образование во время гибели черной дыры протонов и антипротонов приведет к локализованному возрождению физических процессов, связанных с обычным барионным веществом. Поскольку протоны и антипротоны образуются почти в равных количествах, кончина черной дыры отмечена послесвечением гамма-лучей, образующихся в результате аннигиляции вещества и антивещества. Через некоторое время, когда стихнет «треск» гамма-лучей и рассеются прочие «отходы», странные случайные совокупности протонов и электронов, быть может, приведут к простым химическим реакциям, в результате которых, возможно, образуются редкие крупинки молекулярного водородного льда. Этим крошечным реликтам высокоэнергетических дней эпохи распада суждено распасться посредством тех же механизмов, из-за которых во Вселенной чуть раньше возник дефицит протонов. В шестьдесят седьмую космологическую декаду время жизни протона — несущественное мгновение вселенских логарифмических часов. Эти периодические моменты возрождения протонной физики — всего лишь мимолетные и проходящие события, которые вечно увеличивающиеся временные эпохи лишают всякого значения.

Если за время своей жизни черная дыра приобретает суммарный электрический заряд, она может избежать столь оскорбительного полного испарения. Закон о сохранении заряда запрещает превращение всей массы электрически заряженной черной дыры в излучение. Когда черная дыра становится настолько мала, что ее массу-энергию можно сравнить с электростатической энергией, получаемой от ее заряда, испарение Хокинга прекращается раньше положенного времени. *Экстремальные* черные дыры, которые образуются в результате этого, явно не имеют способа избавиться от оставшейся у них массы. Эти странные карлики вполне могут жить вечно.

Теперь представьте себе, что вы появились в случайной точке Вселенной в шестьдесят седьмую космологическую декаду, когда звездные черные дыры постепенно приближаются к своей гибели. Если пространство имеет плоскую геометрию, типичное расстояние между отдельными черными дырами невероятно велико — около  $10^{43}$  световых лет, что в  $10^{33}$  раза больше размера Вселенной в наше время. Несмотря на то, что энергия, образующаяся в процессе испарения черных дыр, обычно невелика по земным меркам, это излучение служит главной движущей силой в нищую эпоху черных дыр. Темные, тусклые и практически невыразительные пустоты перемежаются редкими вспышками, относящими-

ся к диапазону в миллиарды килотонн. Эти мимолетные, но мощные всплески разделены почти непостижимо огромными промежутками пространства, времени и безмолвия.

## Вечны ли черные дыры?

Когда испаряются все черные дыры, Вселенная лишается одного из наиболее интересных сценариев развития. Гибель во вспышке последней черной дыры становится действительно переломным событием. На несколько часов крошечный уголок космоса заливает яркий свет. Если бы там присутствовали глаза вроде наших, тогда они в последний раз действительно могли бы *видеть*. Когда со скоростью света уносятся последние высокоэнергетические частицы, образовавшиеся во взрыве, над Вселенной смыкается воистину вечная тьма.

После исчезновения всех черных дыр остается очень мало «ископаемых», напоминающих о наполненном энергией начале времен. По завершении эпохи черных дыр уже никогда больше не будет возврата в прежние эпохи высоких энергий. Во Вселенной не остается ничего, что сыграло бы роль сверхновых, освещающих эпоху звезд и возвращающих Вселенную в условия высоких энергий, господствовавших в предшествующую ей первичную эпоху. Во Вселенной не будет ничего похожего на столкновения коричневых карликов, которые оживляют эпоху распада, на краткое мгновение воскрешая великолепие эпохи звезд. Во Вселенной более не будет излияний протонов из умирающих черных дыр, на короткий миг возрождающих в эпоху черных дыр условия предыдущих эпох.

Но все ли черные дыры действительно испарятся? Самые крупные черные дыры, существующие сегодня, содержат несколько миллиардов солнечных масс. Если ничто их не потревожит, эти черные дыры исчезнут к сотой космологической декаде, таким образом, на нашей мировой линии времени сотой космологической декадой отмечен конец эпохи черных дыр. Однако остается возможность того, что черные дыры просуществуют много дольше сотой космологической декады. Если черные дыры продолжат сливаться и набирать вес быстрее, чем они будут испаряться, испуская излучение Хокинга, эпоха черных дыр может растянуться до бесконечности.

Чтобы узнать, придет ли конец эпохе черных дыр, важно найти ответ на вопрос, является ли Вселенная открытой или плоской. В плоской Вселенной черные дыры могут оказаться вечными. Несмотря на то, что плоская Вселенная обречена на вечное расширение, с течением времени



это расширение продолжает замедляться. В отсутствие быстрого расширения содержимое обширных областей Вселенной вступает в гравитационную связь и взаимодействует. В отдаленном будущем плоской Вселенной сверхскопления мертвых галактик притягивают другие сверхскопления, образуя еще большие конгломераты черных дыр. В пределах этих гигантских гравитационно связанных скоплений отдельные силы, действующие между триллионами черных дыр, составляющих всю совокупность, заставляют тяжелые черные дыры падать к центру и сливаться друг с другом. Более мелкие дыры выбрасываются из скопления с огромной скоростью. Эти процессы структурообразования (образования еще более крупных конгломератов черных дыр) и релаксации (тенденции тяжелых тел падать к центру конгломерата) вполне могут продолжаться бесконечно долго. В итоге черные дыры могут сливаться друг с другом и увеличиваться быстрее, чем они разрушаются в процессе испарения Хокинга.

С другой стороны, в открытой Вселенной для роста черных дыр существуют куда более серьезные препятствия. В данном случае Вселенной также суждено расширяться вечно, но теперь это расширение происходит гораздо быстрее. В такой быстро расширяющейся Вселенной, где составляющие скопление черные дыры с большими скоростями разлетаются в стороны, им куда сложнее слиться и стать крупнее. И хотя большие черные дыры, расположенные в центрах галактик, могут увеличить свою массу в сотни и даже тысячи раз, их дальнейшему росту препятствует быстрое расширение Вселенной. В случае открытой Вселенной эпоха черных дыр должна, в конечном итоге, завершиться, и наши современные научные знания свидетельствуют о том, что переход в новую эпоху произойдет где-то около сотой космологической декады, когда испарятся черные дыры с галактическими или сверхгалактическими массами. После этого те крохи, что остались от Вселенной, перейдут в следующую эпоху.

## ГЛАВА 5

# Эпоха вечной тьмы

$$\eta > 101$$

**Практически умирающая Вселенная борется с космологической тепловой смертью и сталкивается с возможностью фазовых переходов, способных преобразовать ее до неузнаваемости.**

*Сто восемьдесят пятая космологическая декада:*

Это пришло молча, без каких бы то ни было предупреждений. Каждая космическая структура, которой оно коснулось, утрачивала свою форму и теряла вид. Это разрушение пугало как своей жуткой стремительностью, так и полным опустошением, которое несло.

Ударная волна зарождалась в какой-то определенной, но достаточно незаметной точке пространства-времени и распространялась с невероятной скоростью, быстро приближающейся к скорости света. Затем расширяющийся пузырь охватывал все увеличивающуюся часть Вселенной. Из-за своей феноменальной скорости эта ударная волна вторгалась в области пространства без предупреждения. Ни световые сигналы, ни радиоволны, ни какое-либо причинное сообщение не могли опередить надвигающийся фронт и предупредить о грядущей кончине. Готовиться было как невозможно, так и бесполезно.

Внутри этого пузыря законы физики, а следовательно, и сам характер Вселенной изменялись до неузнаваемости. Значения физических постоянных, величины фундаментальных сил и массы элементарных частиц были совсем другими. В этом мире «Алисы в стране чудес» правили новые физические законы. Старая Вселенная с ее старой версией физических законов попросту прекратила свое существование.

Эту гибель и разрушение старой Вселенной можно было бы оплакивать. Но, с другой стороны, этот естественный ход событий можно было бы считать недурным поводом для празднования. Ведь внутри этого

пузыря, с его новыми физическими законами и, соответственно, новыми возможностями для развития сложности и структуры, Вселенная обрела новое начало.

После того как через излучение Хокинга испарились черные дыры, Вселенная вновь изменяет свой «имидж». Когда, начиная, вероятно, с сотой космологической декады или около того, на Вселенную опускается вечная всеобъемлющая ночь, она выглядит совсем не так, как в любую из предыдущих эпох. В эту холодную эпоху Вселенная состоит только из самых мелких разновидностей элементарных частиц и излучения с крайне низкой энергией и большой длиной волны. Давным-давно распались протоны, а с их уходом исчезло и обычное барионное вещество.

Эта маломощная Вселенная несет в себе некоторое сходство с очень ранней Вселенной, с первой секундой истории космоса, когда единственными его составляющими были элементарные частицы и излучение. Однако в случае очень ранней Вселенной фоновые энергии были слишком высокими, чтобы позволить существование каких-либо сложных структур типа звезд или даже тяжелых ядер. В отдаленном будущем Вселенная не содержит сложных структур по совсем другой причине: она настолько стара, что все традиционные сложные объекты уже давно распались.

На протяжении большей части космической истории Вселенную питал непрерывный ряд звездных объектов. Сначала энергию поставляли обычные звезды, существовавшие за счет ядерных реакций, протекавших в их недрах. В следующую эпоху всем распоряжались вырожденные звездные объекты, которые захватывали частицы темной материи для аннигиляции, служившей источником энергии. В конце концов, вырожденные остатки использовали в качестве топлива даже составляющие их протоны и нейтроны. Наконец, оставшиеся черные дыры пожертвовали своей массой-энергией и испарились. После окончательной гибели этого величественного звездного механизма Вселенная вынуждена довольствоваться лишь жалкими разреженными парами.

На фоне этого пустынного космологического ландшафта Вселенная сталкивается с возможностью тепловой смерти, т. е. достижения статического состояния с однородной температурой, в котором более невозможны интересные события. Однако, несмотря на кажущуюся простоту этой поздней эпохи, в этот космический конец игры может произойти множество захватывающих событий. Космологический фазовый переход, описанный в начале этой главы, — лишь одна из возможных катастроф, ожидающих того часа, когда наша умирающая Вселенная вступит в эпоху вечной тьмы.

## Тени эпохи вечной тьмы

Рассмотрение содержимого Вселенной в начале эпохи вечной тьмы, скажем в сотую космологическую декаду, — предприятие неопределенное. Общее правило гласит, что, чем в более отдаленное будущее мы экстраполируем физический закон, тем менее точные предсказания мы получаем. И все же мы в состоянии дать разумную оценку типов и относительных количеств частиц и излучения, имеющих в эту будущую эпоху. Несмотря на то, что нам хотелось бы знать больше, замечательно уже то, что современная наука хоть что-то может сказать об этом будущем периоде времени, столь отдаленном от настоящего момента.

⋮

### Элементарные частицы

Главными составляющими эпохи вечной тьмы являются электроны и позитроны. Откуда возьмутся эти частицы? Чтобы ответить на этот вопрос, нам придется рассмотреть прошлую историю Вселенной вплоть до этого времени. Заселить эту будущую эпоху могут несколько различных астрономических источников позитронов, электронов и других частиц.

Одно важное ограничение на список частиц будущего состоит в том, что природа, судя по всему, строго следует закону сохранения заряда. Другими словами, во Вселенной содержатся равные количества положительно и отрицательно заряженных частиц. Из-за этой фундаментальной симметрии между положительным и отрицательным каждый сохранившийся позитрон (имеющий положительный электрический заряд) должен иметь парный электрон где-то во Вселенной.

В настоящее время наиболее привычный нам тип вещества, барионное вещество, состоит, главным образом, из водорода. Когда внутри водородного атома распадается протон, он часто оставляет после себя позитрон. Электрон водородного атома изначально остается нетронутым, поэтому в конечном итоге образуется электрон-позитронная пара. Однако большая часть вещества, относящегося к этому барионному типу, перерабатывается в звездах и, в конце концов, оседает в вырожденных недрах белых карликов и прочих звездных остатков. Когда эти объекты медленно испаряются в ходе протонного распада, оставшиеся позитроны оказываются в плотной среде. Продукты распада окружает густое электронное облако, в силу чего позитроны получают более чем достаточную возможность для аннигиляции. Таким образом, почти вся масса-энергия обычного барионного вещества превращается в излучение, состоящее, главным образом, из фотонов и нейтрино.

И только неизрасходованные протоны — те, что не заканчивают свою жизнь в звездах, — могут дать позитроны, способные дожить до отдаленного будущего Вселенной. Поскольку звезды образуются не со стопроцентной эффективностью, какая-то доля водорода и других элементов остается в виде размытого сгустка газообразных отходов. Однако то, что в одну эпоху считается никуда не годными отходами, в будущую эпоху может стать самым ценным товаром. Когда распадутся протоны в этой рассеянной среде, произведенные ими позитроны будут иметь гораздо более высокие шансы избежать аннигиляции и дожить до эпохи вечной тьмы. Даже несмотря на то, что большая часть барионного вещества оказывается запертой в вырожденных звездных остатках, большинство позитронов будущего появляются из газообразного «мусора», оставшегося после образования звезд.

Свой вклад в реестр частиц будущего вносит и небарионная темная материя современной Вселенной. Это слабо взаимодействующее вещество в настоящее время находится в галактических гало, скоплениях галактик и других крупных астрофизических структурах. Немалую часть этой темной материи, как мы уже описывали в третьей главе, захватят вырожденные звездные остатки. Захваченные частицы аннигилируют, а продукты их аннигиляции термализуются в плотных недрах звезд. Итогом этого процесса становится превращение значительной части массы темной материи в излучение, которое опять-таки состоит, в основном, из фотонов и нейтрино.

Однако захват частиц темной материи происходит не со стопроцентной эффективностью. Некоторой доле счастливиц удастся его избежать и дожить до далекого будущего. В долгосрочной перспективе судьба этих выживших частиц темной материи не определена. Поскольку точная природа темной материи нам не известна, не знаем мы и время жизни этих «находящихся в самовольной отлучке» частиц. Разрешенное время жизни таких частиц может быть длиннее или короче времени, оставшегося до начала эпохи вечной тьмы, в силу чего сами частицы темной материи могут до нее дожить, а могут и не дожить. Однако даже если частицы темной материи распадаются, продукты их распада могут внести интересный вклад в будущую Вселенную.

Черные дыры также делают свой вклад в содержимое Вселенной в эпоху вечной тьмы, извергая в космическое пространство частицы в процессе испарения Хокинга, описанного в четвертой главе. Этот механизм разрушения превращает большую часть массы черной дыры в излучение: главным образом, нейтрино и фотоны, с небольшой примесью гравитонов. В самом конце жизни черной дыры ее температура становится достаточно высокой, чтобы по мере ускорения испарения начали

образовываться более тяжелые частицы. В частности, черная дыра производит немалые количества электрон-позитронных пар. И все же из рассеянного водорода — газа, не переработанного в звездах в конце эпохи звезд, — электронов и позитронов образуется намного больше, чем при испарении черных дыр.

В последние мгновения жизни черной дыры, непосредственно перед ее финальным взрывом, температура ее поверхности настолько высока, что образуются частицы практически любого вида, хотя и в относительно небольших количествах. Таким образом, черные дыры производят смесь элементарных частиц, которые могут дожить до эпохи вечной тьмы. Ассортимент вновь созданных массивных частиц содержит протоны — строительные кирпичики, составляющие современное обычное вещество. Однако этим протонам суждено распасться в ходе того же процесса, который бесчисленное число лет назад обозначил конец эпохи распада. В результате эти протоны оказывают относительно малое влияние на эпоху вечной тьмы.

Этот беглый взгляд в будущее предлагает крайнюю перемену перспективы. Время жизни протона, измеряемое часами человеческой жизни, или даже настоящим возрастом Вселенной, равным десяти миллиардам лет, настолько велико, что мы обычно считаем, что протоны живут вечно. Однако когда протоны образуются в процессе испарения черных дыр, время их жизни так мало, по сравнению с возрастом будущей Вселенной, что они вполне могли бы распасться мгновенно.

Плотность Вселенной в эту будущую эпоху невероятно мала, настолько мала, что это сложно представить даже в общих чертах, не говоря уже о том, чтобы полностью понять. Ради ясности, остановимся на плотности позитронов. Плотность электронов должна быть точно такой же, так как физический закон требует сохранения заряда. Других частиц ожидается еще меньше, поэтому их плотность будет еще ниже.

В настоящее время плотность протонов во Вселенной составляет приблизительно одну частицу на кубический метр. Это очень средняя цифра, которая учитывает все протоны в чрезвычайно больших масштабах, превышающих галактики. Теперь предположим, что эффективность образования звезд составляет девяносто девять процентов, и лишь один процент этих протонов остается в виде рассеянных газообразных отходов. Если бы Вселенная не расширялась, она осталась бы примерно с одним позитроном на каждые сто кубических метров: низкая плотность — ничего не скажешь, но такую плотность мы хотя бы можем себе представить.

Но Вселенная расширяется, и к началу эпохи вечной тьмы она расширится довольно значительно. В случае плоской Вселенной, которая

расширяется вечно, хотя это расширение со временем замедляется, Вселенная увеличивается в  $10^{60}$  раз от настоящего момента до начала эпохи вечной тьмы. При таком большом коэффициенте расширения будущая плотность позитронов составляет примерно одну частицу на каждые  $10^{182}$  кубических метров. Чтобы получить хоть какое-то ощущение невероятного размера этого объема, вспомним, что вся видимая сегодня Вселенная имеет объем «всего» в  $10^{78}$  кубических метра. Другими словами, плотность позитронов в эпоху вечной тьмы составила бы около одной частицы на объем, в  $10^{104}$  раз превышающий современную Вселенную.

В другом возможном случае — открытой Вселенной, которая расширяется еще быстрее, — плотность будет еще ниже. К началу эпохи вечной тьмы открытая Вселенная увеличивается в  $10^{90}$  раз. При таком громадном коэффициенте расширения, в  $10^{30}$  раз превышающем рассмотренный выше, плотность открытой Вселенной в  $10^{90}$  раз меньше плотности плоской Вселенной. Один-единственный позитрон будет обитать в объеме, в  $10^{194}$  раз превышающем объем современной Вселенной. Подобную необъятность, как ни старайся, крайне сложно представить визуально.

### Фоновые излучения

Другой важной составляющей будущей Вселенной является излучение, причем поля этого излучения генерирует множество разных источников. По мере старения космоса в фоновом излучении Вселенной в различные космологические декады будут по очереди доминировать разные поля излучения. Каждому отдельному классу излучения суждено ослабевать, по мере того как Вселенная расширяется и составляющие его фотоны последовательно смещаются сначала к красному краю спектра, а потом и вовсе выходят за его пределы (см. рис. 22).

По мере расширения Вселенной увеличивается длина волны излучения. Эта существенная особенность определяет будущую эволюцию и влияние космического фонового излучения. Излучение можно понимать как совокупность «частиц излучения», которые мы называем фотонами. Когда Вселенная расширяется, ее объем увеличивается, а численная плотность фотонов падает. Но при этом увеличивается также и длина волны фотонов, а следовательно, уменьшается энергия каждого фотона. Из-за этого дополнительного увеличения длины волны, также именуемого *красным смещением*, фотоны в расширяющейся Вселенной теряют энергию быстрее обычных массивных частиц.

В настоящее время космическое фоновое излучение, оставшееся от Большого взрыва, — это самое интересное, с точки зрения энергии,

и самое важное для космологии поле излучения. Сейчас фактическая температура этого излучения составляет три градуса Кельвина, а характеристические длины его волн — от одного до двух миллиметров. В будущем, с расширением Вселенной, длина волны этого излучения значительно увеличивается. Плоская Вселенная, например, между настоящим моментом и началом эпохи вечной тьмы вырастает в  $10^{60}$  раз. Это расширение вытягивает космическое фоновое излучение до колоссальных длин волн, равных  $10^{41}$  световых лет — много больше размера видимой сегодня Вселенной.

По мере старения Вселенной большую важность приобретают другие источники фонового излучения. В наше время звезды непрерывно выдают энергию в виде своего света, тогда как космическое фоновое излучение остается «в тени» из-за эффекта красного смещения. Фоновое море звездного излучения, в конечном итоге, воспреобладает над излучением, оставшимся после Большого взрыва; это произойдет в двенадцатую космологическую декаду. В относительно близком будущем это излучение будут производить преимущественно красные карлики — самые маленькие, многочисленные и долго живущие звезды. Эти относительно прохладные звезды испускают излучение с характеристической длиной волны около одного микрона — одной миллионной метра. С расширением Вселенной растягивается и это излучение, так что к началу эпохи вечной тьмы длина его волны увеличивается почти до  $10^{37}$  световых лет.

Захват и аннигиляция частиц темной материи в белых карликах служит еще одним важным источником излучения в будущей Вселенной. В результате этого процесса значительная доля массы-энергии галактических гало превращается в излучение, которое становится доминирующим фоном в семнадцатую космологическую декаду. Когда в эпоху распада это излучение испускают поверхности белых карликов, длина его волны равна порядка пятидесяти микрон, или одной двадцатой миллиметра. По мере дальнейшего увеличения Вселенной длина волн этих фотонов тоже увеличивается:

Конец эпохи распада отмечен распадом протонов и превращением обычного барионного вещества в излучение. Учитывая предполагаемое время жизни протона, этот источник лучистой энергии начинает доминировать в универсальном фоне в тридцать первую космологическую декаду. Характеристическая длина волны этого излучения начинается примерно с одного дюйма и в процессе беспрестанного расширения Вселенной со временем увеличивается.

Наконец, где-то в районе шестидесятой космологической декады испаряются черные дыры; и их масса покоя, в конце концов, преобразуется



в фотоны и нейтрино, которые на кое-то время преобладают в общем фоне излучения. Черные дыры с массами звезд испускают излучения с характеристической длиной волны в несколько километров, что сравнимо с их радиальным размером. Черные дыры с более высокой массой имеют, соответственно, более низкие температуры и излучение с более длинными волнами. «Чудовища», которые весят как миллиард Солнц, — черные дыры, в настоящее время обитающие в центрах активных галактик, — имеют характеристические длины волн в миллиарды километров, что приблизительно равно размеру нашей Солнечной системы. Все это излучение, ясное дело, вытягивается в процессе непрерывного расширения фонового пространства-времени Вселенной.

## Тепловая смерть

Процессы, происходящие в нашей Вселенной, постепенно замедляются по мере того, как она приближается к эпохе вечной тьмы. Но остановятся ли они когда-нибудь полностью или просто замедлятся настолько, что Вселенная перестанет быть интересным местом? Можем ли мы достигнуть какого-то времени в будущем, когда не происходит совсем ничего интересного? Из-за своей тесной связи с термодинамикой идея о замедлении Вселенной до полной остановки называется *тепловой смертью*. Возможность тепловой смерти Вселенной волновала многих философов и ученых, начиная с середины девятнадцатого века, когда был впервые установлен второй закон термодинамики. Споры, касающиеся тепловой смерти, могут принимать различные формы. Мы используем термин *классическая тепловая смерть* для обозначения Вселенной, достигающей абсолютного термодинамического равновесия. В этом состоянии каждая точка пространства Вселенной имеет постоянную температуру. В отсутствие разницы температур не может функционировать ни один тепловой двигатель и не может выполняться работа. Не имея способности выполнить физическую работу, Вселенная «останавливается» и становится довольно безжизненным и инертным местом.

Как же происходит эта тепловая смерть? Второй закон термодинамики гласит, что общая энтропия физической системы никогда не уменьшается (в этом случае системой является вся Вселенная). Однако энтропия может оставаться постоянной и не меняться со временем. Проблема в том, что физические процессы, которые не создают энтропию, обычно не особенно интересны. Таким образом, в общем случае нам хотелось бы, чтобы Вселенная изобиловала процессами, образующими энтропию. Все физические системы имеют тенденцию достигать состояния термо-

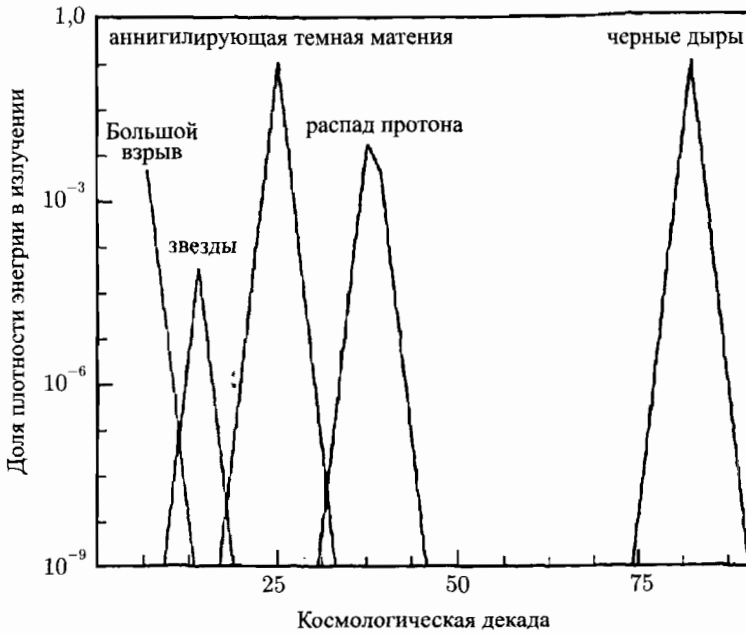


Рис. 22. На данном рисунке вклад, который различные процессы вносят в фоновое излучение Вселенной, изображен как функция времени для космологических декад от пятой до девяностой. Вертикальная ось представляет относительную энергию в излучении от нескольких источников: излучения, оставшегося от первичной Вселенной, света звезд, аннигиляции темной материи, распада протона и испарения черных дыр

динамического равновесия, соответствующего состоянию максимальной энтропии. В состоянии термодинамического равновесия все части физической системы имеют одинаковую температуру и энтропия остается строго постоянной. Таким образом, если будет достигнуто термодинамическое равновесие, во Вселенной прекратятся интересные процессы.

Современная Вселенная достаточно далека от состояния термодинамического равновесия. Фоновая температура Вселенной невысока: всего три градуса Кельвина, примерно на 270 градусов ниже точки заморзания воды (по шкале Цельсия). Этот холодный фон служит резким контрастом по сравнению с пылающими поверхностями звезд, имеющими широкий диапазон температур от четырех до сорока тысяч градусов

Кельвина. Такая неравновесная природа Вселенной разрешает интересные процессы. Тепло переходит от горячих поверхностей звезд в космическое пространство, согревая планеты, управляя погодой в их атмосферах и даже позволяя зарождение и развитие жизни. Вселенная работает как гигантский тепловой двигатель. И разница температур жизненно необходима. Если бы Вселенная достигла состояния теплового равновесия и приобрела постоянную температуру в каждой точке пространства, то она утратила бы возможность выполнять работу, что исключило бы интересные процессы вроде биологической эволюции.

При обсуждении термодинамики часто возникает широко распространенное ошибочное представление — мнимый парадокс, связанный с тем, как вообще могут образоваться хоть какие-то сложные структуры, когда закон требует, чтобы энтропия возрастала всегда. Ведь энтропия — это все-таки мера беспорядка системы. Если же сложные системы являются высоко упорядоченными, как они вообще могут возникнуть, не нарушая закона об увеличении энтропии? Этот мнимый парадокс решается легко: увеличиваться должна общая энтропия системы, а энтропия одной ее части может уменьшаться, вследствие чего одна ее часть может стать высоко упорядоченной. Но если одна часть системы становится высоко упорядоченной и теряет энтропию, система в целом должна заплатить за это, в целях компенсации увеличив свою энтропию в какой-то другой части.

В контексте современной космологии температура Вселенной постоянно изменяется, в силу чего существенно варьируется и ответ на вопрос о тепловой смерти. Непрерывно расширяющаяся Вселенная никогда не достигает истинного термодинамического равновесия, т. к. она никогда не приобретает постоянной температуры. Из-за расширения фоновая температура Вселенной продолжает падать. Таким образом, Вселенная явно избегает классической тепловой смерти. Однако расширяющаяся Вселенная, в принципе, может стать чисто адиабатической, а это означает, что энтропия данной области Вселенной остается постоянной. В этом случае Вселенная все равно имеет все шансы стать скучным и мертвым местом, лишенным всяческой способности к выполнению физической работы. Последнюю возможность мы называем *космологической тепловой смертью*: это фактическая тепловая смерть Вселенной, даже несмотря на то, что ее температура не постоянна. Как мы отмечаем на протяжении всей этой книги, интересные космологические процессы продолжают вырабатывать энергию и энтропию в нашей Вселенной, по крайней мере, до сотой космологической декады. Так что космологическая тепловая смерть откладывается до того времени, когда Вселенная вступает в эпоху вечной тьмы.

Механизмы образования энергии и энтропии, доступные Вселенной, зависят от вида долгосрочной эволюции. В случае замкнутой Вселенной она, в конечном итоге, пережила бы повторный коллапс и закончила свой жизненный путь в Большом сжатии, поэтому вопрос о долгосрочном образовании энтропии даже бы не возник. Интересные физические процессы продолжались бы во Вселенной до самого последнего мгновения Большого сжатия. Некоторая доля иронии присутствует в терминологии этого повествования: замкнутая Вселенная может избежать оскорбительной тепловой смерти даже тогда, когда ее сложные структуры испаряются под действием сильного лучистого тепла, образующегося в результате катастрофического коллапса.

В случае плоской Вселенной, которая замедляется, продолжая расширяться, на космологическом горизонте появляются и становятся связанными действием гравитации космические структуры постоянно увеличивающегося размера и массы. Поскольку расширение Вселенной замедляется, гравитация, по мере старения Вселенной, получает шанс стягивать материал все с больших и больших расстояний. В плоской Вселенной космические структуры гигантских размеров могут образовываться даже в эпоху вечной тьмы. Конечно же, эпоха вечной тьмы не обязательно абсолютно темна. Некоторые из этих огромных космических структур, в принципе, могут коллапсировать, образуя черные дыры, а следовательно, предыдущая эпоха черных дыр в действительности может вообще не закончиться. Может случиться и так, хотя гарантировать этого мы не можем, что черные дыры будут образовываться быстрее, чем испаряться. В этом случае Вселенная могла бы продолжить поддерживать различные процессы, используя энергию, образующуюся в результате испарения Хокинга этих чудовищных черных дыр. Таким образом, Вселенная, по крайней мере в принципе, может избежать космологической тепловой смерти, пока остается почти плоской. В этом случае война между гравитацией и термодинамикой переходит в патовую ситуацию. Гравитация непрерывно создает все более крупные гравитационно связанные структуры — черные дыры — и одерживает временную победу. Однако каждой отдельной структуре суждено испариться, что приведет к окончательной победе термодинамики и производству энтропии.

С другой стороны, если Вселенная открыта, скорость ее расширения достигает постоянного значения, и гравитация явно проигрывает свое сражение с этим расширением: она уже не может конкурировать с ним. Образование космических структур прекращается на каком-то определенном масштабе, а для продолжения образования черных дыр или любых космических структур возникают серьезные препятствия. Для этого случая вопросы долгосрочного производства энтропии и кос-

мологической тепловой смерти Вселенной по-прежнему открыты. И хотя эти перспективы могут показаться довольно унылыми, во Вселенной по-прежнему остается много захватывающих новых возможностей.

## Жизнь и смерть позитрония

Вероятно, самым оживленным действием в эпоху вечной тьмы будут процессы с участием атомов позитрония. В отсутствие протонов и нейтронов обычные атомы невозможны. С другой стороны, в относительно больших количествах будут существовать позитроны — положительно заряженные антиматериальные партнеры электронов. Электроны и позитроны могут объединиться в атомные структуры, аналогичные традиционным атомам водорода, состоящим из одного протона и одного электрона. Атом, образованный позитроном и электроном, называется позитронием.

Атомные свойства позитрония заметно отличаются от свойств традиционных атомов в двух отношениях. Поскольку масса позитрона в две тысячи раз меньше массы протона, изменяются орбиты электронов. Таким образом, химия позитрония весьма отличается от химии водорода. Однако гораздо важнее то, что позитрон и электрон могут аннигилировать друг с другом, на что не способны протон и электрон в обычном водородном атоме. Так что судьба атомов позитрония решается в момент их образования. При наличии достаточного времени электрон и позитрон должны аннигилировать друг с другом, образуя крошечный выброс излучения.

Синтез атомов позитрония в земных лабораториях — дело довольно обычное. Обычно эти атомы создаются в низкоэнергетических состояниях и имеют микроскопические размеры, примерно сравнимые с размером обычных атомов. Эти микроскопические атомы позитрония живут лишь крошечную долю секунды, по истечении которой исчезают из Вселенной в результате аннигиляции. Это короткое время жизни, крайне неудовлетворительное для нас, обусловлено крошечным размером, с которым рождаются эти атомы.

К счастью, в очень поздней Вселенной фоновая плотность сильно размыта и образующиеся атомы позитрония имеют орбиты невероятно больших радиусов. Типичный размер позитрония, образованного в эпоху вечной тьмы, составляет триллионы световых лет — больше, чем вся видимая сегодня Вселенная. Предполагается, что образование позитрония этого типа начнется где-то около семьдесят первой космологической декады. Эти огромные атомы рождаются в состояниях относительно вы-

соких энергий по сравнению с микроскопическими атомами позитрония, которые так быстро распадаются. Электрон и позитрон медленно вращаются вокруг друг друга и постепенно отдают чрезвычайно маленькие количества излучения при постоянном уменьшении их орбит. Эти частицы кружатся в экзотическом танце, который в конечном итоге приводит к полному разрушению его участников и абсолютному краху накопленной ими энергии. Атомы позитрония с такими огромными начальными размерами распадаются по истечении довольно долгого промежутка времени — около ста сорока пяти космологических декад. Таким образом, будущая Вселенная содержит окно времени, в течение которого позитроний может образоваться и существовать, до того как произойдет его неизбежное саморазрушение. Середина этого окна приходится примерно на сотую космологическую декаду — время, когда, напоследок вспыхнув, Вселенную покидают черные дыры с галактическими массами.

Здесь возникает важный вопрос: способны ли эти атомы позитрония, или, быть может, еще более необычные атомные структуры будущего, объединиться, образуя хоть какие-то сложные объекты. Возможны ли в этом темном будущем процессы, хотя бы отдаленно напоминающие химические реакции, которые мы видим на Земле сегодня? Достаточно ли ста сорока пяти космологических декад, чтобы произошла какая-либо «биологическая» эволюция? Как выглядели бы формы жизни, существующие в эту эпоху? Эти вопросы остаются без ответа, но именно в них содержится ключ к возможным жизненным процессам в эпоху вечной тьмы.

Образование и окончательное разрушение позитрония представляет собой еще один этап непрерывной борьбы гравитации и термодинамики — противостояние, которое существует и в эпоху вечной тьмы. В эту позднюю эпоху образование позитрония, в сущности, обусловлено электрическим притяжением частиц, хотя силы гравитации могут объединять даже большие группы частиц. Несмотря на то, что, по меркам современной Вселенной, эти атомы позитрония — истинные долгожители, они представляют собой преходящие структуры и все равно распадутся, превратясь в излучение. Таким образом, неизбежная гибель позитрония — это еще одна победа термодинамики и производства энтропии. И вновь, в конечном итоге, торжествует беспорядок.

## **Бесконечная аннигиляция**

Иллюстрацией к тому, как Вселенная продолжает действовать, хотя и замедляется, служит простой процесс аннигиляции частиц. В резуль-

тате аннигиляции масса-энергия превращается в излучение и тем самым обеспечивает источник энергии для Вселенной. Аналогичным образом, в наши дни Солнце является источником энергии для Земли, а звезды — для Вселенной, хотя и в очень разных масштабах.

Вселенная будущего, например, содержит и электроны, и их анти-материальные двойники — позитроны. Когда эти частицы подходят друг к другу достаточно близко, происходит аннигиляция и вся их масса-энергия высвобождается во всплеске излучения. Во время этой вспышки образуется энтропия. В случае с позитронами и электронами, как описано выше, эти частицы перед окончательной аннигиляцией нередко образуют атомы позитрония. Однако если рассматривать этот процесс в масштабе времени, значительно превышающем время жизни позитрония, равное ста сорока пяти космологическим декадам, нет нужды переживать из-за этого мимолетного промежуточного этапа. Другие частицы, или пары частиц, тоже могут дожить до эпохи вечной тьмы и аннигилировать аналогичным образом. До этого времени вполне могут дожить и принять участие в будущей аннигиляции, например, слабо взаимодействующие частицы темной материи.

Закончится ли когда-нибудь во Вселенной запас частиц, которые могут аннигилировать? Ответ на этот вопрос объясняет многое и служит хорошей иллюстрацией к почти бесконечной природе этой космической конечной игры. Полная доля плотности энергии Вселенной, которая аннигилирует в эпоху вечной тьмы, есть малая и известная величина. Аннигиляция частиц дает лишь конечное количество энергии (в пределах данной области Вселенной) за все время эпохи вечной тьмы. Скорость аннигиляции заметно уменьшается по мере того, как Вселенная расширяется и становится более разреженной, однако аннигиляция частиц продолжается, пока существует Вселенная. Нет такого момента в будущем, когда Вселенная достигает состояния, в котором частицы перестают аннигилировать. Какой бы старой ни стала Вселенная, в ней всегда остается место сопровождающимся вспышками аннигиляционным событиям, которым еще только предстоит произойти и, пусть незначительно и ненадолго, осветить темное небо.

Таким образом, мы имеем несколько запутанную ситуацию: аннигиляция частиц продолжается вечно, но образует в данной области Вселенной постоянное количество энергии. Этот мнимый парадокс легко разрешается, если принять во внимание снижение скорости аннигиляции. За бесконечный промежуток времени Вселенная выдает постоянное количество энергии. Подобная практика сохранения лишь усиливает энергетический кризис будущего и точно *определяет* смысл следующего выражения: становясь старше, Вселенная «замедляется».

Итак, Вселенная сильно замедляется, но никогда не утрачивает всей своей энергии. Можно ли считать Вселенную, которой свойственна подобная бесконечность, обладающей вечной жизнью? Наверное, да, но это будет довольно оптимистичная точка зрения. Пол Дэвис, известный физик и писатель, назвал эту позднюю фазу эволюции Вселенной «вечной смертью». Эта вечно умирающая Вселенная продолжает развиваться и замедляться, но так и не достигает финального момента замыкания, подобного смерти.

Продолжающаяся аннигиляция частиц и другие связанные с ней процессы служат еще одним примером временного принципа Коперника, о котором мы рассказали во введении. Какой бы старой ни стала Вселенная, в ней продолжают происходить интересные физические процессы. На самом деле, Вселенная в эпоху вечной тьмы вовсе не обязана быть таким уж темным и скучным местом. При наличии достаточного времени эволюцию могут вызвать значительные события воистину вселенского масштаба. Однако время — это единственный товар, которым богата умирающая Вселенная будущего.

## **Процессы туннелирования и будущие фазовые переходы**

В начале этой главы описывается космологический фазовый переход — потенциальная космическая катастрофа грандиозных размеров. Принимая во внимание широту этого гипотетического, но все же возможного, будущего события, нам стоит исследовать этот процесс чуть более подробно. Вселенная, в принципе, может содержать значительное количество энергии вакуума. Другими словами, пустое, на первый взгляд, пространство на деле может оказаться не таким уж пустым. Вспомним, что энергетический вклад именно этого типа может привести к инфляционному расширению Вселенной, которое происходит через несколько мгновений после Большого взрыва в еще совсем юной Вселенной. Эта же энергия вакуума, хотя и с гораздо меньшей плотностью, может присутствовать и в современной Вселенной. Как только мы поймем, что состояние вакуума может обладать какой-то энергией, несложно представить, что этот вакуум может иметь и много разных состояний энергии, отличающихся друг от друга. Вселенная с многочисленными состояниями энергии вакуума может иметь чрезвычайно интересный долгосрочный эффект: в будущем этот вакуум может стать нестабильным и Вселенная может подвергнуться преобразованию и пе-



рейти в совершенно новое состояние — состояние с более низкой энергией вакуума.

К сожалению, нам до сих пор неизвестно, какой вклад вакуум вносит в общую плотность энергии Вселенной. На самом деле, «натуральное значение» плотности энергии вакуума, судя по всему, превышает разрешенное космологией во многие порядки раз. Другими словами, самые простые расчеты свидетельствуют о том, что плотность энергии вакуума должна быть примерно в  $10^{122}$  раз больше наблюдаемой общей плотности энергии Вселенной. Это невероятное расхождение обычно называют *проблемой космологической постоянной*, и в настоящее время принятого разрешения этой проблемы не существует. Энергия вакуума Вселенной может равняться как нулю, так и общей плотности энергии, соответствующей обычному барионному веществу, экзотической темной материи и всему чему угодно. И мы не знаем, как урезать этот диапазон возможностей. Успешное решение этой довольно затруднительной задачи, в конечном итоге, приведет к тому, что будет сделан важный шаг вперед в нашем понимании Вселенной: прошлой, настоящей и будущей.

Ради продолжения повествования рассмотрим возможность того, что Вселенная действительно обладает плотностью энергии вакуума и в настоящее время находится в состоянии «фальшивого» вакуума. Другими словами, сейчас Вселенная заключена в конфигурацию с «большой» энергией вакуума, но при этом существует и состояние вакуума с более низкой энергией. Согласно этому сценарию Вселенная может совершить переход в состояние с более низкой энергией посредством квантово-механического туннелирования. В процессе туннелирования Вселенная переживает фазовый переход, приблизительно аналогичный переходу, происходящему, когда жидкая вода превращается в твердый лед.

Процесс квантово-механического туннелирования требует наличия двух важных свойств. Во-первых, физическая система должна иметь более одного состояния энергии, чтобы появилась возможность перехода между этими состояниями. Кроме того, эта система должна обладать энергетическим барьером, осложняющим такие переходы из одного состояния в другое. Последнее особенно важно, так как все физические системы имеют тенденцию к поиску состояния с наименьшей энергией, часто называемого основным состоянием: вода, например, всегда течет с горы, а не в гору. В отсутствие такого энергетического барьера физические системы быстро переходят в состояние с наименьшей энергией, где и остаются навсегда. Интересный случай возникает, когда физическая система оказывается заключенной в состояние с более высокой энергией и, в принципе, в какой-то момент будущего может совершить переход

в состоянии с минимальной энергией. Этой физической системой может быть атом, ядро или конфигурация вакуума самой Вселенной.

Фундаментальную концепцию энергетического барьера можно продемонстрировать с помощью классической аналогии. Рассмотрим шарик, который катается во впадине между двумя возвышенностями, как показано на рис. 23. В отсутствие трения шарик катается взад-вперед по впадине, но никогда не переходит на другую сторону, потому что не имеет достаточно энергии, чтобы подняться по возвышенности, разделяющей две впадины. Таким образом, возвышенность служит энергетическим барьером, который препятствует переходу шарика из одной впадины в другую. Шарик заключен в левой впадине, даже несмотря на то, что правая глубже и соответствует состоянию системы, имеющему более низкую энергию.

В классическом примере шарика с постоянной энергией и двух впадин переходы невозможны. Ни в коем случае. Шарик суждено оставаться в своей впадине вечно, если только он не подвергнется воздействию какого-то внешнего механизма. Однако в случае квантово-механической системы дела обстоят совершенно иначе. Из-за волнового аспекта, который реальность приобретает на малых расстояниях, природа никогда не бывает совершенно неподвижной. Физические системы непрерывно испытывают флуктуации, обусловленные принципом неопределенности, с которым мы уже встречались. И эти квантовые флуктуации разрешают, на первый взгляд, запрещенные события.

Если шарик на верхнем рисунке заменить, например, электроном, а возвышенности — какими-нибудь электрическими барьерами, то мы получаем совершенно аналогичную систему, хотя и в гораздо меньшем масштабе, в котором свою роль должны сыграть и квантово-механические эффекты. Из-за квантовых флуктуаций всегда существует некоторая вероятность того, что электрон окажется в правой впадине, даже если он должен быть в левой. Вероятность того, что электрон окажется «не на той» стороне потенциального барьера, обычно достаточно мала, *но не равна нулю*. На практике эта неопределенность означает, что при наличии достаточного времени электрон совершит переход из левой впадины в состояние с более низкой энергией, которое представляет правая впадина. Завершив переход, электрон обычно отдает энергию и остается во впадине с более низкой энергией.

Когда электрон совершает этот переход из одной впадины в другую, он фактически проходит под энергетическим барьером, пройти над которым он не может, поскольку не обладает достаточной энергией. В этом смысле электрон *туннелирует* через барьер, и этот процесс называется квантово-механическим туннелированием. Это, на первый взгляд, за-

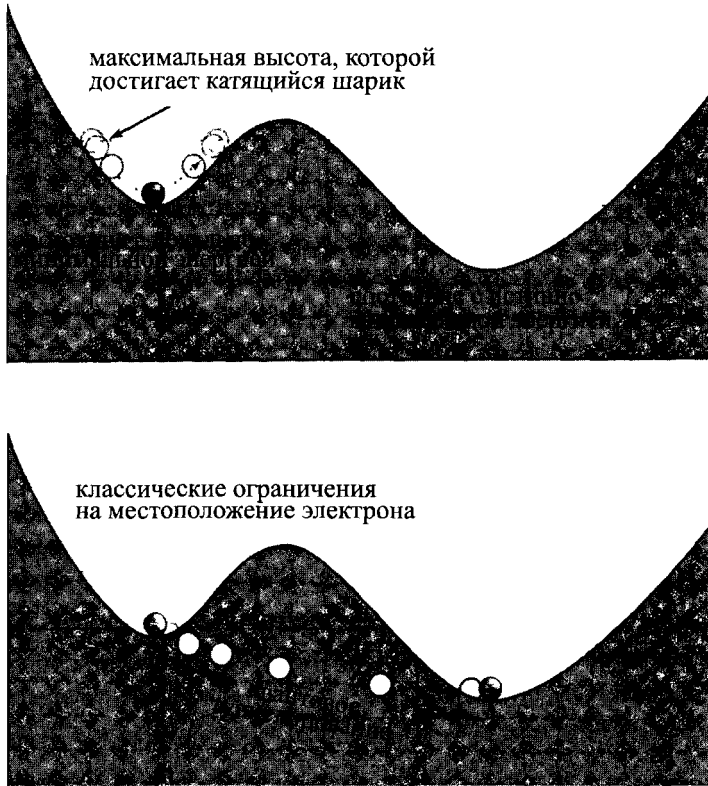


Рис 23. На верхней панели представлена природа потенциальной энергии в классической системе. В такой системе мяч катится взад-вперед в левой впадине. Правая впадина глубже и поэтому представляет состояние более низкой энергии, но мяч не обладает достаточной энергией, чтобы подняться по возвышенности и спуститься в следующую впадину. На нижнем рисунке представлена природа потенциальной энергии в квантовой системе и туннелирование электрона из левого потенциального колодца в правый. Эти потенциальные колодцы аналогичны впадинам, изображенным на верхнем рисунке. Электрон не обладает достаточной энергией, чтобы перейти через барьер, а следовательно, такое поведение, с точки зрения классической физики, запрещено. Однако в квантовой механике электрон может совершить такой переход

гадочное поведение является прямым следствием проявления волновых свойств электрона. И хотя это квантовое поведение электронов может показаться странным, такое туннелирование электрона служит фундаментальной основой для создания транзисторов и прочих полупроводниковых приборов. В отсутствие квантово-механического туннелирования электронов обанкротились бы все предприятия, производящие полупроводниковые приборы.

К туннелированию способны любые волны: как классические, так и квантовые. Туннелированию могут подвергаться, например, спиральные волны плотности — волноподобные возмущения, образующие величественные спиральные узоры, наблюдаемые в галактиках. А эти волны значительно больше нашей Солнечной системы: они действительно слишком велики, чтобы в их случае могли сыграть свою роль квантовые эффекты. Странность квантовой механики, в сущности, заключена в том, что частицы имеют свойства волны и демонстрируют поведение, характерное для волн. Любые волны совершенно естественным способом туннелируют через барьеры, создают дифракционные картины и подчиняются принципу неопределенности. Как только мы принимаем, что частицы и другие физические системы на достаточно малых расстояниях имеют волновые характеристики, многие алогичные квантовые эффекты становятся абсолютно понятными.

Как и электрон в нашем примере, вселенский вакуум может находиться в состоянии высокой энергии, при этом может существовать и состояние более низкой энергии вакуума. Как только Вселенная оказывается заключенной в состояние большой энергии вакуума, она должна оставаться в этом состоянии на протяжении продолжительного периода времени, потому что энергетический барьер препятствует ее немедленному переходу в состояние более низкой энергии. Такая долгоживущая конфигурация называется *метастабильным состоянием*, потому что на протяжении коротких периодов времени она фактически стабильна, но в конечном счете все же нестабильна и рано или поздно распадется. Переходы в состояние с более низкой энергией не только возможны, но и должны произойти при условии наличия достаточного времени.

Как, когда и где произойдет подобный фазовый переход? Нам хотелось бы знать, какова вероятность того, что Вселенная испытает переход из состояния фальшивого вакуума в состояние истинного вакуума, из состояния высокой энергии вакуума в конфигурацию с более низкой энергией. В качестве частной теоретической модели состояния вакуума мы можем вычислить скорость этого перехода достаточно простым способом. Однако полученный результат крайне чувствителен к входным параметрам, которые мы знаем не слишком хорошо. Чтобы сделать это

предсказание точным, нам необходима полная теория состояния вакуума Вселенной. И хотя такое теоретическое понимание должно в конечном итоге стать следствием решения проблемы космологической постоянной, в настоящее время его у нас нет. Пока что мы можем лишь наложить ограничения на возможные варианты этого пугающего, но захватывающего будущего события.

Ясно, что время, предшествующее туннелированию, должно быть настолько долгим, чтобы Вселенная не распалась к настоящей эпохе. Мы можем быть в достаточной степени уверены, что в текущую эпоху образования ядер в видимой части Вселенной не происходило. Время, которое потребуется для этого фазового перехода, вполне может превышать возраст нашей Вселенной, равный десяти миллиардам лет. Однако в будущем Вселенная может пережить фазовый переход и протуннелировать в состояние вакуума с более низкой энергией почти в любое время: может, завтра, а может, и через десять тысяч космологических декад.

Что же в действительности случается, когда и если происходит это самое туннелирование? В данной точке пространства микроскопическая область самопроизвольно переходит в новое состояние вакуума с более низкой энергией. Когда начинается фазовый переход, в фоновом море фальшивого вакуума образуются и начинают разрастаться микроскопические пузырьки состояния истинного вакуума. Этот процесс во многом напоминает рост кристаллов льда в воде, охлажденной ниже точки замерзания. Кристаллы льда начинают расти в какой-то определенной, но обычно произвольной точке и только потом увеличиваются. Ледяная область расширяется по мере того, как наступающий фронт по ходу своего движения превращает жидкую воду в твердый лед. Пузырек нового состояния вакуума разрастается аналогичным образом и переводит фоновую Вселенную из старого состояния вакуума в новую фазу с новым состоянием вакуума.

Космологический фазовый переход происходит быстро, потому что стенки пузыря имеют чрезвычайно большое ускорение. При взгляде с больших расстояний кажется, что пузыри расширяются почти со скоростью света, практически сразу после своего образования. Когда расширяется внешняя стенка пузыря, она сметает области старой Вселенной и оставляет после себя области новой Вселенной. Пузыри растут до тех пор, пока не встретятся друг с другом, после чего они сталкиваются, завершая фазовый переход. Таким образом, старая Вселенная превращается в новую Вселенную с новым состоянием вакуума (см. рис. 24).

Внутри пузыря, в области с новым состоянием вакуума, характер Вселенной изменяется практически полностью. По завершении фазово-

го перехода изменяются физические законы Вселенной, в том числе и значения физических постоянных. В новом состоянии вакуума фундаментальные частицы имеют совсем другие массы, а константы взаимодействия, определяющие силы природы, — совсем другие значения. Вселенная в том виде, в каком знаем ее мы, просто прекращает свое существование.

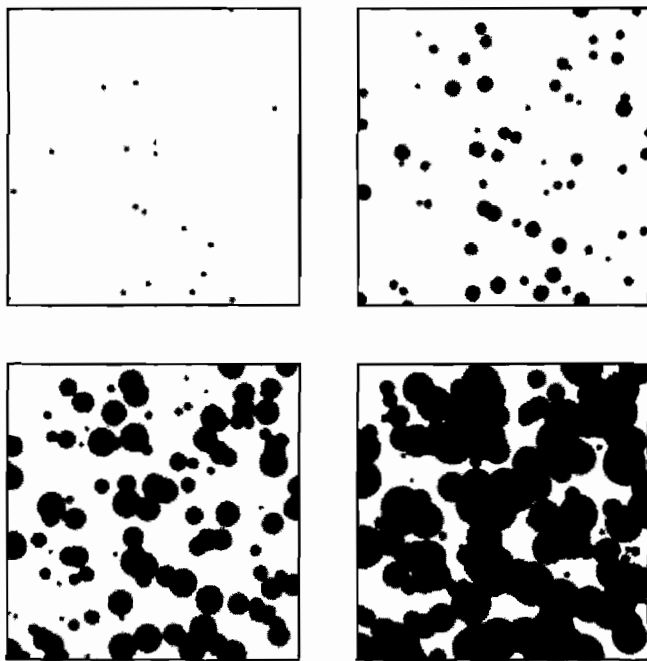


Рис. 24. Здесь изображен космологический фазовый переход в действии. В фоновом море старого состояния вакуума образовались пузырьки нового состояния вакуума (затемненные области). Эти пузырьки со временем растут, пока не встретятся друг с другом, завершая фазовый переход

Любые живые существа, захваченные фазовым переходом, погибли бы мгновенно. Они тут же утратили бы способность к выполнению своих обычных биологических функций или даже к простой химической активности. Из-за быстрого расширения пузырей, происходящего почти со скоростью света, любые наблюдатели, присутствующие при этом мо-

нументальном событии, не получили бы абсолютно никакого предупреждения о его приближении. Поскольку ни одно транспортное средство не способно передвигаться быстрее скорости света, никакие предварительные сигналы не смогли бы предупредить о грядущем разрушении. Короче говоря, увидеть приближение этого перехода невозможно.

С момента прибытия волнового фронта пузыря время, необходимое для перехода из старого состояния вакуума в новое, равно крошечной доле секунды: где-то от  $10^{-10}$  до  $10^{-30}$  секунды. Этот микроскопический промежуток времени значительно короче времени отклика нейрона в мозге человека. Таким образом, этот переход слишком внезапен, чтобы люди могли его ощутить. Согласно дайсоновской гипотезе соответствия масштабов у гипотетических форм жизни отдаленного будущего скорости мышления должны замедлиться из-за падения температуры. Будущие формы жизни, скорее всего, будут функционировать при более низких температурах, чем люди, поэтому время отклика у них должно быть еще длиннее. Любые существа, наблюдающие этот космический фазовый переход, буквально так и не узнали бы, что это за напасть.

Природа Вселенной и законы физики заметно отличаются до и после этого фазового перехода, или, что эквивалентно, снаружи и внутри растущих пузырей. Точная природа новой Вселенной находится в критической зависимости от нового состояния вакуума. В частности, различен вклад космологической постоянной до и после фазового перехода. Новый вид принимает и теория гравитации.

Наиболее оптимистичный сценарий имеет место, если космологическая постоянная в настоящее время положительна и Вселенная туннелирует в новое состояние, где энергия вакуума равна точно нулю. В этом счастливом случае новая Вселенная с новыми физическими законами имеет шанс развить новые зачатки сложности и, быть может, даже жизни. Перед такой возрожденной Вселенной раскрываются многочисленные и разнообразные, практически ничем не ограниченные, возможности.

С другой стороны, если космологическая постоянная сегодняшней Вселенной уже равна почти точно нулю, а новое состояние вакуума Вселенной имеет отрицательное значение, то происходит куда более серьезный апокалипсис. В этом зловещем случае пространство-время новой фазы — области внутри растущих пузырей — является гравитационно-неустойчивым. Внутренняя область каждого пузыря переживает воистину катастрофический гравитационный коллапс. Плотность и температура внутреннего вещества безгранично возрастают. Таким образом, пузырь переживает миниатюрную версию Большого сжатия — сценария

гибели Вселенной, описанного в следующей главе. Пузыри сжимаются, погибая в пламени, всего за несколько микросекунд или и того меньше — слишком короткий промежуток времени для возникновения биологической эволюции или хотя бы более скромных зачатков сложности. Так что такой вариант фазового перехода интересен с пиротехнической точки зрения, но практически полностью лишает надежды на будущую жизнь.

Процесс квантово-механического туннелирования, обеспечивающий фазовый переход, при наличии достаточного времени произойдет самопроизвольно. Особое беспокойство вызывает один аспект этой потенциальной катастрофы: фазовый переход, а в принципе так и будет, может быть *спровоцирован*. Если строение вакуума имеет необходимую форму, то, при наличии нужной технологии, фазовый переход могут запустить живые существа: люди или кто-либо еще. В таком сознательно направленном случае фазовый переход начинается в четко определенной точке пространства и распространяется вперед, вновь приближаясь к скорости света. Фронт одной-единственной движущейся волны смел бы всю старую Вселенную, оставляя позади себя смерть, разрушение и только что родившееся новое состояние вакуума. Однажды начав движение, наступающий фронт продолжил бы двигаться по пути полной аннигиляции, и ничто не смогло бы остановить его. Подобное событие можно было бы сравнить с террористическим актом вселенского масштаба.

И все же существует еще один промежуточный вариант, вызывающий не меньшую тревогу. Фазовый переход в новое состояние вакуума может быть запущен случайно: живыми существами или природными условиями. Высокоскоростные столкновения космических лучей с чрезвычайно большими энергиями могут высечь ту самую искру, что подожжет запал фазового перехода: Можно представить и другие природные бедствия такого рода.

Будущий фазовый переход, который посредством квантового туннелирования охватит всю Вселенную, — один из наиболее умозрительных вопросов, рассмотренных в этой книге. И все же его присутствие здесь вполне уместно, потому что акт туннелирования из состояния фальшивого вакуума в состояние истинного вакуума изменяет природу Вселенной гораздо сильнее, чем практически любой другой физический процесс. Вселенная вполне могла бы оказаться на грани катастрофической неустойчивости.

Эта идея о космологическом фазовом переходе на самом деле не так уже необычна и неестественна, как это может показаться на первый взгляд. В самые первые мгновения истории космоса, сразу после Большого взрыва, Вселенная прошла через целый ряд фазовых переходов



со смутно похожими характеристиками. Первый из этих фазовых переходов привел к невероятно быстрому расширению эпохи инфляции. Другой фазовый переход нарушил симметрию Вселенной и разбил силу электрослабого взаимодействия на две составляющие, которые мы называем электромагнитной силой и слабым ядерным взаимодействием. Еще один фазовый переход изменил юную Вселенную, когда свободные кварки объединились в составные частицы, называемые адронами (к ним относятся хорошо знакомые нам сегодня протоны и нейтроны). Вся эта деятельность, возымевшая столь значительное влияние на характер нашей Вселенной, произошла, когда космосу не исполнилось еще и секунды. Располагая почти безграничным временем, будущая Вселенная имеет множество возможностей пережить еще один потрясающий фазовый переход.

## **Создание новых вселенных**

В будущей Вселенной есть место и для еще более странного поведения. Такая Вселенная способна даже на то, чтобы посредством квантового туннелирования, приблизительно напоминающего вышеописанное, спонтанно рождала новые «вселенные». В этом случае в пустом пространстве, в состоянии истинного вакуума с низкой энергией, образуется пузырь с фальшивым вакуумом более высокой энергии. Этот процесс ядрообразования, в сущности, противоположен тому, который мы описывали ранее. Если выделившийся пузырь достаточно велик, он будет расширяться с невероятно большой скоростью, как в эпоху инфляции, которая имела место в самом начале истории нашей Вселенной. Когда пузырь расширяется, он, в конечном итоге, становится причинно несвязанным с исходным пространством-временем нашей Вселенной. В этом смысле вновь созданный пузырь становится новой и отдельной Вселенной, которую можно считать «вселенной-ребенком».

Это создание новой вселенной довольно алогично. Каким образом из ничего образуется целая вселенная? Куда или во что она расширяется? Основная идея состоит в том, что недавно созданный пузырь нового пространства-времени никуда не расширяется; вернее говорить о том, что расширяется само пространство-время. Таким образом, новая вселенная создает свое собственное пространство, а не «пользуется» какой-то частью нашей Вселенной.

Чтобы проиллюстрировать эту концепцию, можно использовать диаграмму вложения — способ визуализации, который физики часто используют при изучении общей теории относительности (что уже обсуждалось

в предыдущей главе). Мы представляем двумерный вариант Вселенной в виде листа резины, который при расширении Вселенной растягивается. Отклонение резинового листа от абсолютной плоской геометрии представляет собой кривизну пространства-времени, или, что аналогично, степень отклонения пространства-времени от евклидова или плоского. Таким образом, эта двумерная Вселенная вложена в трехмерное пространство, которое нам понятно. Реальная Вселенная имеет трехмерное пространство с дополнительным временным измерением: поскольку так много измерений нам представить не под силу, мы в качестве модели используем эту простую двумерную Вселенную.

С помощью этого метода мы можем визуально представить рождение новой «вселенной-ребенка» как образование в листе резины лунки или пузыря, что изображено на рис. 25. При расширении вновь созданная вселенная быстро превращается в огромную сферу, которую со старой плоской Вселенной связывает только узкая трубка. Это в высшей степени искривленное соединение со старой Вселенной является примером релятивистского пространственно-временного туннеля — особой разновидности моста, связующего различные части пространства-времени. В данном случае пространственно-временной туннель беспрепятственно соединяет вновь образованную вселенную с плоским пространством-временем материнской Вселенной. Однако при расширении новой вселенной этот туннель сжимается и в конечном итоге вообще испаряется. После исчезновения пространственно-временного туннеля материнская Вселенная полностью утрачивает причинную связь с новой вселенной, которая только тогда становится действительно самостоятельной вселенной.

Эта недавно созданная вселенная воспринимается совершенно по-разному наблюдателями, живущими внутри пузыря, и теми, кто находится снаружи. Наблюдатели, живущие внутри пузыря, видят свою местную вселенную в состоянии экспоненциального расширения, весьма напоминающего фазу инфляции нашей собственной Вселенной в самые первые мгновения ее существования. С другой стороны, наблюдатели, расположенные вне пузыря, оставшиеся в лустом пространстве-времени нашей настоящей Вселенной, видят вновь созданную вселенную как коллапсирующую черную дыру, которая быстро утрачивает причинную связь с нашей Вселенной. В силу отсутствия этой причинной связи новые вселенные не могут повлиять на будущую эволюцию нашей Вселенной.

И все же эти новые вселенные могут получать информацию из нашей Вселенной, по крайней мере в принципе. До того как вновь созданная вселенная утратит причинную связь с нашим собствен-

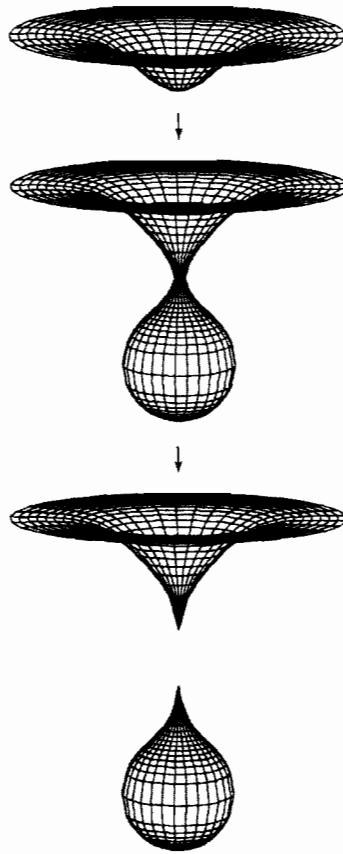


Рис. 25. На этой диаграмме вложения изображено зарождение и последующее развитие новой вселенной. На верхнем рисунке показано образование зародыша, а следовательно, и начало образования новой вселенной. На среднем рисунке вновь созданная вселенная быстро растет, но все еще связана со старой вселенной (плоская область) посредством узкой трубки, представляющей релятивистский пространственно-временной туннель. На нижнем рисунке пространственно-временной туннель испарился, и новая вселенная отделилась от исходного пространства-времени материнской Вселенной, в которой она родилась

ным пространством-временем, две вселенные связывает релятивистский пространственно-временной туннель, который может служить каналом для передачи информации и, быть может, даже для передачи вещества. Такая возможность имеет глубочайшие следствия. Столкнувшись с тем, что в нашей настоящей Вселенной гибели и вымирания не избежать, достаточно развитая цивилизация могла бы в качестве пути для спасения создать другую вселенную. Если бы существовала возможность предопределения свойств и физических законов новой вселенной, эта цивилизация могла бы добиться того, чтобы зарождающийся космос благоприятствовал развитию жизни. Информацию из нашей старой умирающей Вселенной можно было бы передать в новую вселенную через связывающий их пространственно-временной канал до его испарения. Эта информация могла бы включать копии жизни или каких-то еще ценностей, которые сочло бы важными данное общество. Быть может, через этот пространственно-временной туннель получилось бы передать даже вещество. Возможно, достаточно умные существа могли бы создать вселенную и буквально запрыгнуть в нее, пока не закрылся вход.

Данная концепция образования новых вселенных связана с обсуждавшейся в четвертой главе идеей о том, что сингулярности черных дыр служат входом в другие вселенные. В предыдущем случае мы подразумевали долгоживущие большие черные дыры. Сингулярность, которая должна содержаться где-то в пределах горизонта событий черной дыры, служит долгосрочным соединением с другой вселенной, хотя соединение это, в сущности, недоступно. Однако, чтобы произошло образование зародыша, которое приведет к рождению новой вселенной, коллапсирующая черная дыра (видимая наблюдателями в нашей Вселенной) должна иметь достаточно малую массу и относительно короткое время жизни. При рассмотрении снаружи кажется, что эта крошечная черная дыра излучает саму себя и в конечном счете исчезает в процессе испарения Хокинга. В этом случае вход в новую вселенную не только абсолютно недоступен, но и крайне недолговечен.

Образование зародыша новой вселенной может произойти и в сингулярности уже существующей черной дыры. Как и в других случаях, рассмотренных выше, вновь созданная вселенная быстро утрачивает причинную связь с материнской. Поскольку все это происходит в пределах горизонта событий исходной черной дыры, может создаться впечатление, что новая вселенная вообще никак не связана с нашей Вселенной и вряд ли нам интересна. Но, как ни странно, образование новой вселенной все же имеет один характеристический признак, который можно измерить в нашей Вселенной, за пределами горизонта событий черной дыры. Образование зародыша новой вселенной частично подавляет из-

лучение Хокинга, испускаемое черной дырой. Это падение мощности излучения черной дыры можно измерить. Как только новая вселенная утрачивает причинную связь с черной дырой, восстанавливается обычный уровень испарения Хокинга. И вновь: квантовые эффекты позволяют передать через горизонт событий информацию определенного типа, даже несмотря на то, что в классической физике подобная нелегальная передача строго запрещена.

Аналогично тому как фазовые переходы космоса, в принципе, могут быть запущены какими-нибудь внешними воздействиями, образование новой вселенной тоже может быть вызвано извне. Технология, необходимая для подобного запланированного родительства, в настоящее время отсутствует, но физики уже всерьез обсуждают теоретическую возможность создания новой вселенной в лабораторных условиях. В будущем создание новых вселенных, возможно, станет делом обычным и ничем не примечательным. Но как только мы принимаем такую возможность, в голове сразу возникает важный философский вопрос: «А наша Вселенная тоже является результатом спланированного и направленного действия каких-то других существ?».

Концепции намеренного запуска космологического фазового перехода или создания новой вселенной в лабораторных условиях — хорошие примеры того, как мы, или другие сознающие существа, могут оказать прямое влияние на эволюцию Вселенной в целом. Эти трюки, связанные с космической инженерией, все еще лежат далеко за пределами возможностей нашей современной технологии, и все же нельзя сказать, что они вообще выходят за рамки возможного. За последние несколько сотен лет люди на Земле сумели, к счастью или к несчастью, в какой-то степени взять под контроль всю планету. В настоящее время мы можем напрямую влиять на окружающую среду, популяцию и виды представителей растительного и животного мира и даже на климат мира, в котором живем. Всего несколько столетий назад о подобном контроле люди и помыслить не могли, а ведь этот промежуток времени — просто мгновение по сравнению с громадными зонами, которым еще предстоит прийти. В будущем разумная жизнь не только возможно, но, может быть, даже вероятно сыграет важную роль в установлении долгосрочного курса эволюции как нашей собственной, так и других вселенных.

## Заключение

### **Путеводитель в невозможное, невероятное и чудесное.**

*На заброшенном чердаке, неподалеку от Британского музея:*

Корнелий схватил чистый лист бумаги, пропустил его через ролик и начал печатать. Отправной точкой его сказания был сам Большой взрыв, когда космос отправился в свой вечно расширяющийся путь в будущее. После краткой вспышки инфляции Вселенная была низвергнута в ряд фазовых переходов и образовала избыток вещества над антивеществом. На протяжении этой первичной эпохи Вселенная вообще не содержала никаких космических структур.

По истечении миллиона лет и многих стопок бумаги Корнелий достиг эпохи звезд — времени, когда звезды активно рождаются, проживают свои жизненные циклы и вырабатывают энергию посредством ядерных реакций. Эта яркая глава закрывается, когда в галактиках заканчивается водородный газ, прекращается образование звезд и медленно угасают самые долго живущие красные карлики.

Печатая без остановки, Корнелий вводит свою историю в эпоху распада, с ее коричневыми карликами, белыми карликами, нейтронными звездами и черными дырами. Посреди этой замерзшей пустыни темная материя медленно собирается внутри мертвых звезд и аннигилирует в излучение, которое питает космос. Распад протона выходит на сцену в конце этой главы, когда медленно утекает масса-энергия вырожденных остатков звезд, а жизнь, основанная на углероде, полностью вымирает.

Когда усталый автор продолжает свой труд, единственными героями его повествования остаются черные дыры. Но и черные дыры не могут жить вечно. Испуская слабый как никогда свет, эти темные объекты испаряются в ходе медленного квантово-механического процесса. В отсутствие другого источника энергии Вселенная вынуждена довольствоваться этим скудным количеством света. После испарения самых крупных черных дыр переходные сумерки эпохи черных дыр сдаются под натиском еще более глубокой черноты.

В начале заключительной главы у Корнелия заканчивается бумага, но не время. Во Вселенной больше нет звездных объектов, а только бесполезные продукты, оставшиеся от предыдущих космических катастроф.

В эту холодную, темную и очень далекую эпоху вечной тьмы космическая деятельность заметно замедляется. Чрезвычайно низкие уровни энергии согласуются с огромными промежутками времени. После своей огненной юности и полного энергии среднего возраста теперешняя Вселенная медленно вползает в темноту.

По мере старения Вселенной ее характер постоянно меняется. На каждом этапе своей будущей эволюции Вселенная поддерживает удивительное разнообразие сложных физических процессов и другое интересное поведение. Наша биография Вселенной, от ее рождения во взрыве до долгого и постепенного скольжения в вечную тьму, основана на современном понимании законов физики и чудес астрофизики. Благодаря обширности и обстоятельности современной науки, это повествование представляет самое вероятное видение будущего, которое мы можем составить.

## **Безумно большие числа**

Когда мы обсуждаем обширный диапазон экзотического поведения Вселенной, возможного в будущем, читатель может подумать, что произойти может вообще все, что угодно. Но это не так. Несмотря на изобилие физических возможностей, на самом деле произойдет лишь крошечная доля теоретически возможных событий.

Прежде всего, на любое разрешенное поведение строгие ограничения накладывают законы физики. Должен соблюдаться закон сохранения общей энергии. Не должен нарушаться закон сохранения электрического заряда. Основной направляющей концепцией является второй закон термодинамики, который формально гласит, что общая энтропия физической системы должна возрасти. Грубо говоря, этот закон предполагает, что системы должны эволюционировать в состояния увеличения беспорядка. На практике второй закон термодинамики заставляет тепло переходить от горячих объектов к холодным, а не наоборот.

Но даже в рамках процессов, разрешенных законами физики, многие события, которые могли бы произойти в принципе, на деле никогда не происходят. Одна общая причина состоит в том, что они просто требуют слишком долгого времени, и первыми происходят другие процессы, которые их опережают. Хорошим примером этой тенденции служит процесс холодного синтеза. Как мы уже отмечали в связи с ядерными реакциями в недрах звезд, самым стабильным из всех возможных ядер является ядро железа. Множество более мелких ядер типа водорода или гелия отдали бы свою энергию, если бы могли объединиться

в ядро железа. На другом конце периодической таблицы более крупные ядра типа урана тоже отдали бы свою энергию, если бы их можно было разделить на части, а из этих частей составить ядро железа. Железо представляет собой самое низкоэнергетическое состояние, доступное ядрам. Ядра стремятся к пребыванию в форме железа, но энергетические барьеры препятствуют тому, чтобы это преобразование могло легко произойти при большинстве условий. Чтобы преодолеть эти энергетические барьеры, как правило, нужны либо высокие температуры, либо продолжительные промежутки времени.

Рассмотрим большой кусок твердого вещества типа камня или, быть может, планеты. Структура этого твердого тела не изменяется благодаря обычным электромагнитным силам, вроде тех, что участвуют в химической связи. Вместо сохранения своего исходного ядерного состава вещество, в принципе, могло бы перегруппироваться так, чтобы все его атомные ядра превратились в железо. Чтобы произошла подобная реструктуризация вещества, ядра должны преодолеть электрические силы, удерживающие это вещество в том виде, в каком оно существует, и электрические силы отталкивания, с которыми ядра действуют друг на друга. Эти электрические силы создают сильный энергетический барьер, во многом напоминающий барьер, изображенный на рис. 201. Из-за этого барьера ядра должны перегруппировываться посредством квантовомеханического туннелирования (как только ядра проникают через барьер, сильное притяжение инициирует синтез). Таким образом, наш кусок вещества выказал бы ядерную активность. При наличии достаточного времени весь камень или вся планета превратились бы в чистое железо.

Сколько времени заняла бы подобная реструктуризация ядер? Ядерная активность такого типа преобразовала бы ядра камня в железо примерно за пятнадцать сотен космологических декад. Если бы произошел этот ядерный процесс, в космос была бы испущена избыточная энергия, потому что ядра железа соответствуют более низкому энергетическому состоянию. Однако этот процесс холодного ядерного синтеза никогда не будет доведен до конца. Он даже никогда по-настоящему не начнется. Все протоны, составляющие ядра, распадутся на меньшие частицы много раньше, чем ядра преобразуются в железо. Даже самое длинное возможное время жизни протона составляет менее двухсот космологических декад — много короче огромного промежутка времени, необходимого для холодного синтеза. Другими словами, ядра распадутся прежде, чем у них появится шанс превратиться в железо.

Другой физический процесс, требующий слишком долгого времени, чтобы считаться важным для космологии, — это туннелирование выро-



жденных звезд в черные дыры. Поскольку черные дыры — это самые низкоэнергетические состояния, доступные звездам, вырожденный объект типа белого карлика имеет большую энергию, чем черная дыра той же массы. Таким образом, если бы белый карлик мог самопроизвольно преобразоваться в черную дыру, он высвободил бы лишнюю энергию. Однако обычно подобного преобразования не происходит из-за энергетического барьера, создаваемого давлением вырожденного газа, который поддерживает существование белого карлика.

Несмотря на энергетический барьер, белый карлик мог бы преобразоваться в черную дыру посредством квантово-механического туннелирования. Из-за принципа неопределенности все частицы ( $10^{57}$  или около того), составляющие белый карлик, могли бы оказаться в пределах столь малого пространства, что образовали бы черную дыру. Однако это случайное событие требует чрезвычайно длительного времени — порядка  $10^{76}$  космологических декад. Преувеличить воистину огромный размер  $10^{76}$  (это то же самое, что и  $10^{10^{76}}$ ) космологических декад — невозможно. Если этот необъятно большой промежуток времени записать в годах, получится единица с  $10^{76}$  нулями. Мы могли бы даже не начинать записывать это число в книге: оно имело бы порядка одного нуля на каждый протон в видимой современной Вселенной, плюс-минус пару порядков величины. Нет нужды говорить, что протоны распадутся и белые карлики исчезнут задолго до того, как Вселенная достигнет  $10^{76}$ -й космологической декады.

## **Что же на самом деле происходит в процессе долгосрочного расширения?**

Хотя многие события фактически невозможны, остается обширный диапазон теоретических возможностей. Самые обширные категории будущего поведения космоса основаны на том, является ли Вселенная открытой, плоской или замкнутой. Открытая или плоская Вселенная будет расширяться вечно, тогда как замкнутая Вселенная переживет повторное сжатие по истечении некоторого определенного времени, которое зависит от исходного состояния Вселенной. Однако рассматривая более спекулятивные возможности, мы обнаруживаем, что будущая эволюция Вселенной может оказаться гораздо сложнее, чем предполагает эта простая классификационная схема.

Основная проблема состоит в том, что мы можем производить имеющие физический смысл измерения и, следовательно, делать определенные заключения только в отношении местной области Вселенной —

части, ограниченной современным космологическим горизонтом. Мы можем измерить общую плотность Вселенной внутри этой местной области, диаметр которой составляет около двадцати миллиардов световых лет. Но измерения плотности в пределах этого местного объема, увы, не определяют долгосрочную судьбу Вселенной в целом, т. к. наша Вселенная может быть намного больше.

Предположим, к примеру, что нам удалось бы измерить, что космологическая плотность превышает значение, необходимое для замыкания Вселенной. Мы пришли бы к экспериментальному заключению, что в будущем наша Вселенная должна пережить повторное сжатие. Вселенную явно отправили бы через ускоряющуюся последовательность природных катаклизмов, ведущих к Большому сжатию, описанному в следующем разделе. Но это далеко не все. Наша местная область Вселенной — та часть, которая, по нашим наблюдениям, является замкнутой в данном сценарии мнимого армагеддона, — могла бы оказаться вложенной в гораздо большую область с гораздо меньшей плотностью. В этом случае сжатие пережила бы только некоторая часть всей Вселенной. Оставшаяся же часть, охватывающая, быть может, большую часть Вселенной, могла продолжить бесконечно расширяться.

Читатель, возможно, с нами не согласится и скажет, что от подобного усложнения мало толку: нашей собственной части Вселенной все равно суждено пережить повторное сжатие. Наш мир все равно не избежит разрушения и гибели. И все же этот беглый взгляд на большую картину существенно изменяет нашу перспективу. Если большая Вселенная выживет как единое целое, гибель нашей местной области не является такой уж трагедией. Мы не станем отрицать, что разрушение одного города на Земле, скажем из-за землетрясения, — событие страшное, но все же оно далеко не так ужасно, как полное уничтожение всей планеты. Точно так же, утрата одной маленькой части целой Вселенной не так разорительна, как потеря всей Вселенной. Сложные физические, химические и биологические процессы все равно могут развернуться в далеком будущем, где-то во Вселенной. Разрушение нашей местной Вселенной могло бы стать лишь еще одной катастрофой из целого ряда астрофизических бедствий, который, возможно, принесет будущее: гибель нашего Солнца, конец жизни на Земле, испарение и рассеяние нашей Галактики, распад протонов, а следовательно, разрушение всего обычного вещества, испарение черных дыр и т. д.

Выживание большей Вселенной предоставляет возможность для спасения: либо реального путешествия на далекие расстояния, либо заменяющего его избавления посредством передачи информации через световые сигналы. Этот спасительный путь может оказаться сложным

или даже запрещенным: все зависит от того, каким образом замкнутая область нашего местного пространства-времени сочетается с большей областью Вселенной. Однако тот факт, что жизнь может продолжиться где-то еще, позволяет не умереть надежде.

Если произойдет повторное сжатие нашей местной области, времени на то, чтобы в нашей части Вселенной произошли все астрономические события, описанные в этой книге, может не хватить. Однако в конечном итоге эти процессы все равно произойдут в каком-то другом месте Вселенной — далеко от нас. Сколько времени у нас есть до повторного сжатия местной части Вселенной — зависит от плотности местной части. Хотя современные астрономические измерения свидетельствуют о том, что ее плотность мала настолько, что наша местная часть Вселенной не схлопнется вообще, в темноте может скрываться дополнительная невидимая материя. Максимально возможное разрешенное значение местной плотности примерно в два раза превышает значение, необходимое для того, чтобы местная часть Вселенной была замкнутой. Но даже с этой максимальной плотностью Вселенная не может начать сжиматься до истечения, по меньшей мере, двадцати миллиардов лет. Это временное ограничение дало бы нам отсрочку местной версии Большого сжатия, по меньшей мере, еще в пятьдесят миллиардов лет.

Может возникнуть также и противоположный набор обстоятельств. Наша местная часть Вселенной может продемонстрировать относительно низкую плотность и, следовательно, получить право на вечную жизнь. Однако этот местный клочок пространства-времени может быть вложен в гораздо большую область с гораздо более высокой плотностью. В этом случае, когда наш местный космологический горизонт станет достаточно большим, чтобы включить большую область с более высокой плотностью, наша местная вселенная станет частью большей Вселенной, которой суждено пережить повторное сжатие.

Этот сценарий разрушения требует, чтобы наша местная Вселенная имела почти плоскую космологическую геометрию, потому что только в таком случае скорость расширения продолжает постоянно падать. Почти плоская геометрия позволяет все большим и большим областям метамасштабной Вселенной (большой картины Вселенной) воздействовать на местные события. Эта большая окружающая область просто должна быть плотной ровно настолько, чтобы в конечном итоге пережить повторное сжатие. Она должна прожить достаточно долго (то есть не схлопнуться слишком рано), чтобы наш космологический горизонт мог разрастись до требуемого крупного масштаба.

Если эти идеи реализуются в космосе, то наша местная вселенная — это совсем не «то же самое», что и много большая область Вселенной,

которая ее поглощает. Таким образом, на достаточно больших расстояниях явно нарушался бы космологический принцип: Вселенная не была бы одинаковой в каждой точке пространства (однородной) и необязательно одинаковой во всех направлениях (изотропной). Подобная потенциальная возможность вовсе не сводит на нет использование нами космологического принципа для изучения истории прошлого (как в теории Большого взрыва), так как Вселенная явно однородна и изотропна в пределах нашей местной области пространства-времени, радиус которой в настоящее время составляет около десяти миллиардов световых лет. Любые потенциально возможные отклонения от однородности и изотропности относятся к большим размерам, а значит, могут проявиться только в будущем.

Как ни странно, мы можем наложить ограничения на природу той большей области Вселенной, которая в настоящее время находится за пределами нашего космологического горизонта. Согласно измерениям космического фоновое излучение является чрезвычайно однородным. Однако большие отличия в плотности Вселенной, даже если бы они находились за пределами космологического горизонта, непременно вызвали бы пульсации в этом однородном фоновом излучении. Так что отсутствие значительных пульсаций говорит о том, что любые предполагаемые значительные возмущения плотности должны находиться очень далеко от нас. Но если большие возмущения плотности находятся далеко, то наша местная область Вселенной может прожить достаточно долго, прежде чем встретится с ними. Самый ранний возможный момент, когда большие различия в плотности окажут свое влияние на нашу часть Вселенной, наступит приблизительно через семнадцать космологических декад. Но, скорее всего, это изменяющее Вселенную событие произойдет гораздо позднее. Согласно большинству версий теории инфляционной Вселенной наша Вселенная останется однородной и почти плоской на протяжении сотен и даже тысяч космологических декад.

## **Большое сжатие**

Если Вселенная (или ее часть) замкнута, то гравитация одержит победу над расширением и начнется неизбежное сжатие. Такая Вселенная, переживающая повторный коллапс, завершила бы свой жизненный путь в огненной развязке, известной как *Большое сжатие*. Многие превратности, размечающие последовательность времени сжимающейся Вселенной, впервые рассмотрел сэр Мартин Рис, ныне королевский астроном Англии. Когда Вселенная будет ввергнута в этот грандиозный финал, недостатка в катастрофах не будет.

И хотя Вселенная, скорее всего, будет расширяться вечно, мы более или менее уверены в том, что плотность Вселенной не превышает удвоенного значения критической плотности. Зная эту верхнюю границу, мы можем утверждать, что *минимально* возможное время, оставшееся до коллапса Вселенной в Большом сжатии, составляет около пятидесяти миллиардов лет. Судный День по-прежнему очень далек по любым человеческим меркам времени, так что арендную плату, наверное, стóит продолжать вносить регулярно.

Предположим, что через двадцать миллиардов лет, достигнув максимального размера, Вселенная действительно переживает повторное сжатие. В то время Вселенная будет примерно в два раза больше, чем сегодня. Температура фонового излучения составит около 1,4 градуса Кельвина: вполтину меньше сегодняшнего значения. После того как Вселенная остынет до этой минимальной температуры, последующий коллапс нагреет ее при стремительном движении к Большому сжатию. Попутно, в процессе этого сжатия будут разрушены все структуры, созданные Вселенной: скопления, галактики, звезды, планеты и даже сами химические элементы.

Приблизительно через двадцать миллиардов лет после начала повторного сжатия Вселенная вернется к размеру и плотности современной Вселенной. А в промежуточные сорок миллиардов лет Вселенная движется вперед, имея примерно один и тот же вид крупномасштабной структуры. Звезды продолжают рождаться, эволюционировать и умирать. Небольшие звезды, сберегающие топливо, вроде нашего близкого соседа Проксима Центавры, не имеют достаточно времени, чтобы пережить сколько-нибудь значительную эволюцию. Некоторые галактики сталкиваются и сливаются в пределах их родительских скоплений, но большинство из них сохраняется в практически неизменном виде. Отдельной галактике требуется куда больше сорока миллиардов лет, чтобы изменить свою динамическую структуру. Обращая закон расширения по Хабблу, некоторые галактики станут приближаться к нашей галактике, вместо того чтобы удаляться от нее. И только эта любопытная тенденция к смещению в голубую часть спектра позволит астрономам мельком увидеть надвигающуюся катастрофу.

Отдельные скопления галактик, рассеянные в необъятном пространстве и свободно связанные в комья и нити, останутся в целостности и сохранности до тех пор, пока Вселенная не сожмется до размера в пять раз меньше, чем сегодня. В момент этого гипотетического будущего соединения скопления галактик сливаются. В сегодняшней Вселенной скопления галактик занимают всего около одного процента объема. Однако как только Вселенная сжимается до пятой части ее сегодняшнего разме-

ра, скопления заполняют фактически все пространство. Таким образом, Вселенная станет одним гигантским скоплением галактик, но сами галактики в эту эпоху, тем не менее, сохраняют свою индивидуальность.

По мере продолжения сжатия Вселенная очень скоро станет в сто раз меньше, чем сегодня. На этом этапе средняя плотность Вселенной будет равна средней плотности галактики. Галактики перекроют друг друга, и отдельные звезды уже не будут принадлежать какой-либо конкретной галактике. Тогда вся Вселенная превратится в одну гигантскую галактику, наполненную звездами. Фоновая температура Вселенной, создаваемая космическим фоновым излучением, вырастает до 274 градусов Кельвина, приближаясь к точке таяния льда. Из-за увеличивающегося сжатия событий после этой эпохи продолжать рассказ гораздо удобнее с позиций противоположного конца временной шкалы: времени, остающегося до Большого сжатия. Когда температура Вселенной достигает точки таяния льда, у нашей Вселенной остается десять миллионов лет будущей истории.

До этого момента жизнь на планетах земного типа продолжает-ся достаточно независимо от происходящей вокруг эволюции космоса. На самом деле, теплота неба в конечном итоге растопит замороженные объекты типа Плутона, дрейфующие по периферии каждой солнечной системы, и предоставит последний мимолетный шанс на расцвет во Вселенной жизни. Эта относительно короткая последняя весна завершится по мере дальнейшего повышения температуры фонового излучения. С исчезновением жидкой воды по всей Вселенной более или менее одновременно происходит массовое вымирание всего живого. Океаны выкипают, а ночное небо становится ярче, чем дневное небо, видимое нами с Земли сегодня. Когда до финального сжатия остается лишь шесть миллионов лет, любые выжившие формы жизни должны либо оставаться глубоко в недрах планет, либо развить продуманные и эффективные механизмы охлаждения.

После окончательного разрушения сначала скоплений, а потом и самих галактик следующими на линии огня оказываются звезды. Если бы не случилось ничего другого, звезды, рано или поздно, столкнулись бы и разрушили друг друга перед лицом продолжающегося и всеразрушающего сжатия. Однако столь жестокая судьба обойдет их стороной, потому что звезды разрушатся более постепенным образом задолго до того, как Вселенная станет достаточно плотной, чтобы произошли звездные столкновения. Когда температура непрерывно сжимающегося фонового излучения превышает температуру поверхности звезды, равную от четырех до шести тысяч градусов Кельвина, поле излучения может значительно изменить строение звезд. И хотя в недрах звезд продолжают-

ся ядерные реакции, их поверхности испаряются под действием очень сильного внешнего поля излучения. Таким образом, основной причиной разрушения звезд служит фоновое излучение.

Когда начинают испаряться звезды, размер Вселенной примерно в две тысячи раз меньше сегодняшнего. В эту бурную эпоху ночное небо выглядит таким же ярким, как поверхность Солнца. Краткостью оставшегося времени сложно пренебречь: сильнейшее излучение сжигает любые сомнения в том, что до конца остается менее миллиона лет. Любые астрономы, у которых хватит технологической смекалки, чтобы дожить до этой эпохи, возможно, с покорным изумлением вспомнят, что наблюдаемый ими бурлящий котел Вселенной — звезды, застывшие на небосклоне ярком, как Солнце, — есть не что иное, как возвращение парадокса Ольберса о бесконечно старой и статической Вселенной (см. вставку на стр. 54).

Любые ядра звезд, или коричневые карлики, дожившие до этой эпохи испарения, будут самым бесцеремонным образом разорваны на куски. Когда температура фонового излучения достигнет десяти миллионов градусов Кельвина, что сравнимо с современным состоянием центральных областей звезд, любое оставшееся ядерное топливо может воспламениться и привести к сильнейшему и эффектнейшему взрыву. Таким образом, звездные объекты, которые умудряются пережить испарение, внесут свой вклад в общую атмосферу конца света, превратившись в фантастические водородные бомбы.

Планеты в сжимающейся Вселенной разделят участь звезд. Гигантские газовые шары, вроде Юпитера и Сатурна, испаряются гораздо легче звезд и оставляют после себя лишь центральные ядра, неотличимые от планет земного типа. Любая жидкая вода уже давным-давно испарилась с поверхностей планет, а совсем скоро ее примеру последуют также их атмосферы. Остаются только голые и бесплодные пустыри. Каменные поверхности плавятся, и слои жидкого камня постепенно утолщаются, в конечном итоге, захватывая всю планету. Гравитация удерживает гибнущие расплавленные остатки от разлетания, а они создают тяжелые силикатные атмосферы, которые, в свою очередь, утекают в космическое пространство. Испаряющиеся планеты, окунаясь в ослепительное пламя, исчезают без следа.

Когда планеты покидают сцену, атомы межзвездного пространства начинают распадаться на составляющие их ядра и электроны. Фоновое излучение становится настолько сильным, что фотоны (частицы света) получают достаточную энергию, чтобы высвободить электроны. В результате этого в последние несколько сотен тысяч лет атомы прекращают свое существование и вещество распадается на заряженные частицы.

Фоновое излучение сильно взаимодействует с этими заряженными частицами, в силу чего вещество и излучение тесно переплетаются. Космические фоновые фотоны, которые беспрепятственно путешествовали на протяжении почти шестидесяти миллиардов лет с момента рекомбинации, попадают на поверхность их «следующего» рассеивания.

Рубикон перейден, когда Вселенная сжимается до одной десятичной ее настоящего размера. На этом этапе плотность излучения превышает плотность вещества — так было только сразу после Большого взрыва. Во Вселенной снова начинает доминировать излучение. Из-за того что вещество и излучение ведут себя по-другому, поскольку претерпели сжатие, дальнейшее сжатие немного изменяется, когда Вселенная переживает этот переход. Осталось всего десять тысяч лет.

Когда до финального сжатия остается лишь три минуты, начинают распадаться атомные ядра. Этот распад продолжается до последней секунды, к которой разрушатся все свободные ядра. Эта эпоха антинуклеосинтеза весьма существенно отличается от бурного нуклеосинтеза, произошедшего в первые несколько минут первичной эпохи. В первые несколько минут истории космоса образовались только самые легкие элементы, главным образом, водород, гелий и чуть-чуть лития. В последние же несколько минут в космосе присутствуют самые разнообразные тяжелые ядра. Ядра железа удерживают самые прочные связи, поэтому их распад требует самой большой энергии на частицу. Однако сжимающаяся Вселенная создает все более высокие температуры и энергии: рано или поздно в этой безумно разрушительной среде погибнут даже ядра железа. В последнюю секунду жизни Вселенной в ней не остается ни одного химического элемента. Протоны и нейтроны вновь становятся свободными — как и в первую секунду истории космоса.

Если в эту эпоху во Вселенной остается хоть какая-то жизнь, момент разрушения ядер становится той чертой, из-за которой не возвращаются. После этого события во Вселенной не останется ничего, что хотя бы отдаленно напоминало основанную на углероде земную жизнь. Во Вселенной не останется углерода. Любой организм, которому удастся пережить распад ядер, должен принадлежать к воистину экзотическому виду. Быть может, увидеть последнюю секунду жизни Вселенной смогли бы существа, в основе которых лежит сильное взаимодействие.

Последняя секунда во многом напоминает фильм о Большом взрыве, показанный задом наперед. После распада ядер, когда от гибели Вселенную отделяет всего одна микросекунда, распадаются сами протоны и нейтроны, и Вселенная превращается в море свободных кварков. По мере продолжения сжатия Вселенная становится более горячей и плотной, и в ней, судя по всему, изменяются законы физики. Когда



Вселенная достигает температуры примерно в  $10^{15}$  градусов Кельвина, слабое ядерное взаимодействие и электромагнитная сила объединяются в электрослабое взаимодействие. Это событие является своего рода космологическим фазовым переходом, отдаленно напоминающим превращение льда в воду. Когда мы подходим к более высоким энергиям, приближаясь к концу времени, мы удаляемся от прямых экспериментальных подтверждений, в силу чего повествование, хотим мы того или нет, становится более спекулятивным. И все же мы продолжаем. Как никак, у Вселенной осталось еще  $10^{-11}$  секунд истории.

Следующий важный переход происходит, когда сильное взаимодействие объединяется с электрослабым. Это событие, называемое *великим объединением*, объединяет три из четырех фундаментальных сил природы: сильное ядерное взаимодействие, слабое ядерное взаимодействие и электромагнитную силу. Это объединение происходит при невероятно высокой температуре, равной  $10^{28}$  градусам Кельвина, когда Вселенной остается жить всего  $10^{-37}$  секунд.

Последнее важное событие, которое мы можем отметить в нашем календаре, — это объединение гравитации с тремя остальными силами. Это ключевое событие происходит, когда сжимающаяся Вселенная достигает температуры примерно в  $10^{32}$  градусов Кельвина и до Большого сжатия остается всего  $10^{-43}$  секунд. Эту температуру или энергию обычно называют *величиной Планка*. К сожалению, ученые не располагают самосогласованной физической теорией для такого масштаба энергий, где все четыре фундаментальные силы природы объединяются в одно целое. Когда в ходе повторного сжатия происходит это объединение четырех сил, наше современное понимание законов физики утрачивает свою адекватность. Что произойдет дальше — нам не известно.

### **Тонкая настройка нашей Вселенной**

Посмотрев на события невозможные и невероятные, остановимся на самом экстраординарном событии, которое произошло, — рождении жизни. Наша Вселенная — довольно удобное место для жизни, как знаем ее мы. На самом деле, важную роль в ее развитии играют все четыре астрофизических окна. Планеты, самое малое окно астрономии, служат для жизни домом. Они предоставляют «чашки Петри», в которых может возникнуть и эволюционировать жизнь. Важность звезд также очевидна: они являются источником энергии, необходимой для биологической эволюции. Вторая фундаментальная роль звезд состоит в том, что они, подобно алхимикам, образуют элементы, тяжелее гелия: углерод, кисло-

род, кальций и другие ядра, из которых состоят известные нам формы жизни.

Чрезвычайно важны также галактики, хоть это и не столь очевидно. Без связующего влияния галактик тяжелые элементы, производимые звездами, рассеялись бы по всей Вселенной. Эти тяжелые элементы суть неотъемлемые строительные кирпичики, из которых состоят как планеты, так и все формы жизни. Галактики с их большими массами и сильным гравитационным притяжением, удерживают от разлетания химически обогащенный газ, оставшийся после гибели звезд. Впоследствии этот ранее обработанный газ включается в будущие поколения звезд, планет и людей. Таким образом, гравитационное притяжение галактик обеспечивает легкую доступность тяжелых элементов для последующих поколений звезд и для образования каменных планет типа нашей Земли.

Если говорить о самых больших расстояниях, то сама Вселенная должна обладать нужными свойствами, чтобы разрешить возникновение и развитие жизни. И хотя у нас нет ничего хотя бы отдаленно напоминающего полное понимание жизни и ее эволюции, относительно определенным является одно базовое требование: на это уходит много времени. Появление человека заняло около четырех миллиардов лет на нашей планете, и мы готовы поставить на то, что в любом случае для возникновения разумной жизни должен пройти, как минимум, миллиард лет. Таким образом, Вселенная, в целом, должна прожить миллиарды лет, чтобы позволить развитие жизни, по крайней мере, в случае биологии, хотя бы смутно напоминающей нашу.

Свойства нашей Вселенной в целом также позволяют обеспечить химическую среду, благоприятствующую развитию жизни. Хотя более тяжелые элементы вроде углерода и кислорода синтезируются в звездах, водород тоже является жизненно важным компонентом. Он входит в состав двух из трех атомов воды,  $H_2O$ , — важной составляющей жизни на нашей планете. Рассматривая огромный ансамбль возможных вселенных и их возможных свойств, мы замечаем, что в результате первичного нуклеосинтеза весь водород мог быть переработан в гелий и даже более тяжелые элементы. Или Вселенная могла расширяться так быстро, что протоны и электроны так и не встретились бы, чтобы образовать атомы водорода. Как бы там ни было, Вселенная могла бы закончиться, так и не создав атомы водорода, составляющие молекулы воды, без которой не было бы обычной жизни.

Принимая во внимание эти соображения, становится ясно, что наша Вселенная действительно имеет нужные особенности, позволяющие наше существование. При данных законах физики, определенных значени-

ями физических постоянных, величинами фундаментальных сил и массами элементарных частиц, наша Вселенная естественным образом создает галактики, звезды, планеты и жизнь. Если бы физические законы имели немного другой вид, наша Вселенная могла бы быть совершенно непригодна для проживания и крайне бедна астрономически.

Проиллюстрируем требуемую тонкую настройку нашей Вселенной чуть более подробно. Галактики, один из астрофизических объектов, необходимых для жизни, образуются, когда гравитация одерживает верх над расширением Вселенной и провоцирует сжатие местных областей. Если бы сила гравитации была гораздо слабее или скорость космологического расширения гораздо быстрее, то к настоящему моменту в космосе не было бы ни одной галактики. Вселенная продолжала бы рассеиваться, но не содержала бы ни одной гравитационно связанной структуры, по крайней мере, на данный момент истории космоса. С другой стороны, если бы сила гравитации имела гораздо большую величину или скорость расширения космоса была бы гораздо ниже, то вся Вселенная вновь коллапсировала бы в Большом сжатии задолго до начала образования галактик. В любом случае в нашей современной Вселенной жизни бы не было. Значит, интересный случай Вселенной, заполненной галактиками и прочими крупномасштабными структурами, требует достаточно тонкого компромисса между силой гравитации и скоростью расширения. И наша Вселенная реализовала именно такой компромисс.

Что касается звезд, то здесь требуемая тонкая настройка физической теории сопряжена с еще более жесткими условиями. Реакции термоядерного синтеза, протекающие в звездах, выполняют две ключевые роли, необходимые для эволюции жизни: образование энергии и производство тяжелых элементов типа углерода и кислорода. Чтобы звезды сыграли отведенную им роль, они должны жить в протяжении долгого времени, достигнуть достаточно высоких центральных температур и быть достаточно распространенными. Чтобы все эти составляющие головоломки встали на свои места, Вселенная должна быть наделена обширным диапазоном особых свойств.

Наверное, самый понятный пример может предоставить нам ядерная физика. Реакции термоядерного синтеза и ядерная структура зависят от величины сильного взаимодействия. Атомные ядра существуют как связанные структуры, потому что сильное взаимодействие способно удерживать протоны рядом друг с другом, даже несмотря на то, что сила электрического отталкивания положительно заряженных протонов стремится разорвать ядро. Если бы сильное взаимодействие было чуть-чуть слабее, то тяжелых ядер попросту не было бы. Тогда во Вселенной не было бы углерода, а следовательно, и тех форм жизни, в основе

которых лежит углерод. С другой стороны, если бы сильное ядерное взаимодействие было еще сильнее, тогда два протона могли бы объединиться в пары, называемые дипротонами. В этом случае сильное взаимодействие было бы таким сильным, что все протоны во Вселенной объединились бы в дипротоны или даже в еще более крупные ядерные структуры, и обычного водорода просто не осталось бы. В отсутствие водорода во Вселенной не было бы воды, а следовательно, и известных нам форм жизни. К счастью для нас, наша Вселенная имеет как раз нужную величину сильного взаимодействия, чтобы разрешить водород, воду, углерод и прочие необходимые составляющие жизни.

Аналогичным образом, имея слабое ядерное взаимодействие совсем другую силу, это значительно повлияло бы на звездную эволюцию. Если бы слабое взаимодействие было гораздо сильнее, например, по сравнению с сильным взаимодействием, то ядерные реакции в недрах звезд протекали бы с гораздо большими скоростями, в силу чего значительно сократилась бы продолжительность жизни звезд. Также пришлось бы поменять и название слабого взаимодействия. В этом вопросе у Вселенной имеется некоторая отсрочка, обусловленная диапазоном звездных масс — небольшие звезды живут дольше и могут использоваться для управления биологической эволюцией вместо нашего Солнца. Однако давление вырожденного газа (из квантовой механики) не позволяет звездам сжигать водород, как только их масса становится слишком маленькой. Таким образом, серьезно уменьшилась бы даже продолжительность жизни самых долго живущих звезд. Как только максимальное время жизни звезды падает ниже отметки в миллиард лет, развитие жизни тут же попадает под угрозу. Фактическое значение слабого взаимодействия в миллионы раз меньше сильного, благодаря чему Солнце сжигает свой водород медленно и непринужденно, что и требуется для эволюции жизни на Земле.

Далее следует рассмотреть планеты — самые маленькие астрофизические объекты, необходимые для жизни. Образование планет требует от Вселенной производства тяжелых элементов, а следовательно, — тех же ядерных ограничений, что уже описывались выше. Кроме того, существование планет требует, чтобы фоновая температура Вселенной было достаточно мала для конденсации твердых тел. Если бы наша Вселенная была всего в шесть раз меньше, чем сейчас, и, следовательно, в тысячу раз горячее, то испарились бы частицы межзвездной пыли и для образования каменных планет попросту не было бы сырья. В этой горячей гипотетической Вселенной в крайне подавленном состоянии оказалось бы даже формирование гигантских планет. К счастью, наша Вселенная достаточно прохладна, чтобы позволить образование планет.

Другим соображением служит долгосрочная стабильность Солнечной системы непосредственно с момента ее образования. В нашей современной Галактике как взаимодействия, так и сближения звезд одновременно редки и слабы из-за очень низкой плотности звезд. Если бы наша Галактика содержала такое же количество звезд, но была в сто раз меньше, повышенная плотность звезд привела бы к достаточно высокой вероятности вхождения в нашу Солнечную систему какой-то другой звезды, которая разрушила бы орбиты планет. Подобное космическое столкновение могло бы изменить орбиту Земли и сделать нашу планету необитаемой или вообще выбросить Землю из Солнечной системы. В любом случае такой катаклизм означал бы конец жизни. К счастью, в нашей Галактике предполагаемое время, по истечении которого наша Солнечная система переживет столкновение, изменяющее ее курс, намного превышает время, необходимое для развития жизни.

Мы видим, что долго живущая Вселенная, которая содержит галактики, звезды и планеты, требует достаточно специальный набор величин фундаментальных постоянных, определяющих значения основных сил. Таким образом, эта требуемая тонкая настройка поднимает базовый вопрос: *почему же наша Вселенная имеет именно эти конкретные свойства, в конечном итоге порождающие жизнь?* Ведь тот факт, что физические законы именно таковы, чтобы позволить наше существование, — это воистину замечательное совпадение. Создается впечатление, будто Вселенная каким-то образом знала о нашем грядущем появлении. Конечно, если бы условия сложились как-то иначе, нас просто здесь не было бы и некому было бы размышлять над данным вопросом. Однако вопрос «Почему?» от этого никуда не исчезает.

Понимание того, *почему* физические законы именно такие, какие они есть, подводит нас к границе развития современной науки. Предварительные объяснения уже выдвигались, однако вопрос по-прежнему остается открытым. Поскольку наука двадцатого столетия обеспечила хорошее рабочее понимание того, *что* есть наши законы физики, мы можем надеяться, что наука века двадцать первого даст нам понимание того, *почему* физические законы имеют именно такой вид. Некоторые намеки в этом направлении уже начинают появляться, как мы сейчас увидим.

## **Вечная сложность**

Это кажущееся совпадение (что Вселенная имеет как раз те особые свойства, которые позволяют зарождение и эволюцию жизни) кажет-

ся куда менее чудесным, если принять, что наша Вселенная — область пространства-времени, с которой мы связаны, — это всего лишь одна из бесчисленного множества других вселенных. Другими словами, наша Вселенная — это лишь малая часть *мультиверса* — огромного ансамбля вселенных, каждая из которых имеет свои собственные варианты законов физики. В этом случае полная совокупность вселенных реализовала бы все многочисленные возможные варианты законов физики. Жизнь, однако, разовьется только в тех частных вселенных, которые имеют нужный вариант физических законов. Тогда тот факт, что нам случилось жить во Вселенной с нужными для жизни свойствами, становится очевидным.

Проясним разницу между «другими вселенными» и «другими частями» нашей Вселенной. Крупномасштабная геометрия пространства-времени может быть очень сложной. В настоящее время мы живем в однородном кусочке Вселенной, диаметральный размер которого составляет около двадцати миллиардов световых лет. Эта область представляет собой часть пространства, которое может оказывать на нас причинное воздействие в данное время. По мере продвижения Вселенной в будущее область пространства-времени, способная на нас повлиять, будет увеличиваться. В этом смысле по мере старения наша Вселенная будет содержать больше пространства-времени. Однако могут существовать и другие области пространства-времени, которые *никогда* не окажутся в причинной связи с нашей частью Вселенной, сколь бы долго мы ни ждали и какой бы старой ни стала наша Вселенная. Эти другие области растут и эволюционируют совершенно независимо от физических событий, которые происходят в нашей Вселенной. Такие области принадлежат к другим вселенным.

Как только мы допускаем возможность существования других вселенных, тот набор совпадений, который имеется в нашей Вселенной, выглядит куда более приятным. Но действительно ли эта концепция существования других вселенных имеет такой смысл? Возможно ли естественным образом разместить множественные вселенные в рамках теории Большого взрыва, например, или хотя бы ее разумных расширений? Как ни странно, ответом служит решительное «да».

Андрей Линде, выдающийся русский космолог, в настоящее время работающий в Стэнфорде, ввел понятие *вечной инфляции*. Грубо говоря, эта теоретическая идея означает, что во все времена какая-нибудь область пространства-времени, расположенная где-то в мультиверсе, переживает инфляционную фазу расширения. Согласно этому сценарию пространственно-временная пена посредством механизма инфляции непрерывно рождает новые вселенные (как уже обсуждалось

в первой главе). Некоторая часть этих инфляционно расширяющихся областей эволюционируют в интересные вселенные вроде нашего собственного местного клочка пространства-времени. Они имеют физические законы, управляющие образованием галактик, звезд и планет. В некоторых из этих областей может даже развиться разумная жизнь.

Эта идея имеет как физический смысл, так и значительную внутреннюю привлекательность. Даже если нашей Вселенной, нашей собственной местной области пространства-времени, суждено умереть медленной и мучительной смертью, вокруг всегда будут другие вселенные. Всегда будет существовать что-то еще. Если мультиверс рассматривать с большей перспективы, охватывающей весь ансамбль вселенных, то его можно считать воистину вечным.

Эта картина космической эволюции изящно обходит один из самых неприятных вопросов, возникающих в космологии двадцатого века: *если Вселенная зародилась в Большом взрыве, произошедшем всего десять миллиардов лет назад, что было до этого Большого взрыва?* Этот трудный вопрос о том, «что было, когда еще ничего не было», служит границей между наукой и философией, между физикой и метафизикой. Мы можем экстраполировать физический закон назад во времени до того момента, когда Вселенной было всего  $10^{-43}$  секунды, хотя по мере приближения к этому моменту будет расти неопределенность наших знаний, а более ранние эпохи вообще недоступны для современных научных методов. Однако наука не стоит на месте, и в этой области уже начинается появляться кое-какой прогресс. В рамках более широкого контекста, который обеспечивает концепция мультиверса и вечной инфляции, мы действительно можем сформулировать ответ: до Большого взрыва существовала (и по сей день существует!) пеннистая область высокоэнергетического пространства-времени. Из этой космической пены какие-то десять миллиардов лет назад родилась наша собственная Вселенная, которая сегодня продолжает эволюционировать. Подобным образом постоянно продолжают рождаться другие вселенные, и этот процесс может происходить бесконечно. Правда, этот ответ остается немного неясным и, возможно, несколько неудовлетворительным. Тем не менее физика уже дошла до такого состояния, когда мы можем хотя бы начать обращаться к этому давно стоящему вопросу.

При наличии концепции мультиверса мы получаем следующий уровень революции Коперника. Так же, как наша планета не имеет особого места в нашей Солнечной системе, а наша Солнечная система — особого статуса во Вселенной, так и наша Вселенная не имеет особого места в гигантской космической смеси вселенных, составляющих мультиверс.

## Дарвиновский взгляд на вселенные

Пространство-время нашей Вселенной становится все более сложным по мере ее старения. В самом начале, сразу после Большого взрыва, наша Вселенная была очень гладкой и однородной. Такие начальные условия были необходимы, чтобы Вселенная эволюционировала в свою современную форму. Однако по мере эволюции Вселенной в результате галактических и звездных процессов образуются черные дыры, пронизывающие пространство-время своими внутренними сингулярностями. Таким образом, черные дыры создают то, что можно считать дырами в пространстве-времени. В принципе, эти сингулярности также могут обеспечить связь с другими вселенными. Может случиться и так, что в сингулярности черной дыры зародятся новые вселенные — вселенные-дети, о которых мы рассказывали в пятой главе. В этом случае наша Вселенная может породить новую вселенную, связанную с нашей через черную дыру.

Если данную цепочку рассуждений проследить до ее логического конца, возникает чрезвычайно интересный сценарий эволюции вселенных в мультиверсе. Если вселенные могут рождать новые вселенные, то в физической теории могут появиться концепции наследственности, мутаций и даже естественного отбора. Такую концепцию эволюции отстаивал Ли Смолин — физик, специалист по общей теории относительности и квантовой теории поля.

Предположим, что сингулярности внутри черных дыр могут рождать другие вселенные, как это происходит в случае с зарождением новых вселенных, о котором мы говорили в предыдущей главе. По мере развития эти другие вселенные обычно утрачивают причинную связь с нашей собственной Вселенной. Однако эти новые вселенные остаются связанными с нашей через сингулярность, расположенную в центре черной дыры. Теперь допустим, что законы физики в этих новых вселенных похожи на законы физики в нашей Вселенной, но не абсолютно. На практике это утверждение означает, что физические постоянные, величины фундаментальных сил и массы частиц имеют похожие, но не эквивалентные значения. Другими словами, новая вселенная наследует комплект физических законов от материнской вселенной, но эти законы могут немного отличаться, что весьма напоминает мутации генов при воспроизводстве флоры и фауны Земли. В этой космологической обстановке рост и поведение новой вселенной будет напоминать, но не абсолютно точно, эволюцию исходной материнской вселенной. Таким образом, эта картина наследственности вселенных полностью аналогична картине биологических форм жизни.

Обладая наследственностью и мутациями, эта экосистема вселен-



ных приобретает захватывающую возможность эволюционной схемы Дарвина. С комологическо-дарвинистской точки зрения, «успешными» являются вселенные, создающие большие количества черных дыр. Поскольку черные дыры появляются в результате образования и гибели звезд и галактик, эти успешные вселенные должны содержать большие количества звезд и галактик. Кроме того, на образование черных дыр уходит достаточно много времени. Галактики в нашей Вселенной образуются за время порядка миллиарда лет; массивные звезды живут и умирают за более короткое время, исчисляемое миллионами лет. Чтобы позволить образование большого числа звезд и галактик, любая успешная вселенная должна не только иметь нужные значения физических постоянных, но и быть относительно долго живущей. Имея звезды, галактики и длинное время жизни, вселенная вполне может разрешить развитие жизни. Другими словами, успешные вселенные автоматически имеют почти нужные характеристики для появления биологических форм жизни.

Эволюция сложной совокупности вселенных в целом происходит аналогично биологической эволюции на Земле. Успешные вселенные создают большие количества черных дыр и рождают большие количества новых вселенных. Эти астрономические «детишки» наследуют от материнских вселенных различные виды физических законов с небольшими изменениями. Те мутации, которые приводят к образованию еще большего количества черных дыр, приводят и к производству большего количества «детей». По мере развития этой экосистемы вселенных чаще всего встречаются вселенные, образующие невероятные количества черных дыр, звезд и галактик. Эти же вселенные имеют самые высокие шансы на зарождение жизни. Наша Вселенная, по какой бы то ни было причине, имеет как раз такие характеристики, которые позволяют жить долго и образовать много звезд и галактик: согласно этой громадной дарвинистской схеме наша собственная Вселенная является успешной. При рассмотрении с этой укрупненной перспективы наша Вселенная не является ни необычной, ни тонко настроенной; это, скорее, обыкновенная, а следовательно, и ожидаемая вселенная. И хотя данная картина эволюции остается спекулятивной и спорной, она обеспечивает изящное и привлекательное объяснение того, почему наша Вселенная имеет наблюдаемые нами свойства.

## **Раздвигая границы времени**

В биографии космоса, лежащей перед вами, мы проследили развитие Вселенной от ее сверкающего, сингулярного начала, через теплое и знакомое небо современности, через странные замерзшие пустыни,

до возможной финальной гибели в вечной тьме. При попытке взглянуть еще глубже в темную бездну наши предсказательные способности значительно ухудшаются. А следовательно, наши гипотетические путешествия через космическое время должны завершиться, или, по крайней мере, стать ужасно неполными в некоторую будущую эпоху. В данной книге мы построили шкалу времени, охватывающую сотни космологических декад. Некоторым читателям, несомненно, покажется, что мы слишком самоуверенно зашли в своем повествовании так далеко, тогда как другие, возможно, удивятся, как мы могли остановиться в точке, которая, по сравнению с вечностью, настолько близка к самому началу.

В одном мы можем быть уверены. На своем пути в мрак будущего Вселенная проявляет замечательное сочетание скоротечности и неизменности, тесно переплетенных между собой. И хотя сама Вселенная выдержит испытание временем, в будущем не останется практически ничего, что хотя бы отдаленно напоминало настоящее. Самой стойкой характеристикой нашей вечно развивающейся Вселенной является перемена. И этот универсальный процесс непрекращающихся перемен требует расширенной космологической перспективы, другими словами, полного изменения нашего взгляда на самые крупные масштабы. Поскольку Вселенная постоянно изменяется, мы должны стараться понять текущую космологическую эпоху, текущий год и даже сегодняшний день. Каждое мгновение разворачивающейся истории космоса дает уникальную возможность, шанс достигнуть величия, приключение, которое можно пережить. Согласно временному принципу Коперника каждая будущая эпоха изобилует новыми возможностями.

Однако недостаточно сделать пассивное утверждение о неизбежности событий и «не скорбя, позволить случиться тому, что должно случиться». Отрывок, который часто приписывают Хаксли, гласит, что «если шесть обезьян усадить за пишущие машинки и позволить им на протяжении миллионов лет печатать то, что вздумается, то со временем они напишут все книги, которые имеются в Британском музее». Этих воображаемых обезьян уже давно приводят в пример всякий раз, когда речь идет о неясной или несостоятельной мысли, в качестве подтверждения невероятных событий или даже для неявного преуменьшения великих достижений рук человеческих, с намеком на то, что они есть не более чем счастливая случайность среди великого множества неудач. Как-никак если что-то может случиться, то оно непременно случится, не так ли?

Однако даже наше понимание будущего космоса, которое пока что находится в зачаточном состоянии, обнаруживает явную абсурдность этой точки зрения. Простой расчет свидетельствует о том, что произ-

вольно выбранным обезьянам потребуется почти полмиллиона космологических декад (много больше лет, чем число протонов во Вселенной), чтобы случайно создать всего лишь одну книгу.

Вселенной на роду написано полностью изменить свой характер, причем не единожды, до того как эти самые обезьяны хотя бы начнут завершать поставленную перед ними задачу. Менее чем за одну сотню лет эти обезьяны умрут от старости. Через пять миллиардов лет Солнце, превратившееся в красного гиганта, сожжет Землю, а с ним и все пишущие машинки. Через четырнадцать космологических декад во Вселенной сгорят все звезды и обезьяны уже не смогут увидеть клавиши машинок. К двадцатой космологической декаде Галактика утратит свою целостность, а обезьяны получают весьма реальный шанс быть поглощенными черной дырой в центре Галактики. И даже протонам, составляющим обезьян и их работу, суждено распасться еще до истечения сорока космологических декад: вновь задолго до того, как их геркулесов труд даже не зайдет достаточно далеко. Но даже если бы обезьяны смогли пережить эту катастрофу и продолжить свою работу при слабом свечении, испускаемом черными дырами, их усилия все равно оказались бы тщетными в сотую космологическую декаду, когда Вселенную во взрыве покинут последние черные дыры. Но даже если бы обезьяны пережили и эту катастрофу и дожили бы, скажем, до сто пятидесятой космологической декады, они добились бы только возможности лицом к лицу оказаться с предельной опасностью космологического фазового перехода.

И хотя к сто пятидесятой космологической декаде обезьяны, печатные машинки и отпечатанные листы будут уничтожены не единожды, само время, конечно же, не закончится. Пристально глядя в мрак будущего, мы в большей степени ограничены нехваткой воображения и, быть может, неадекватностью физического понимания, чем действительно малочисленным набором подробностей. Более низкие уровни энергии и кажущаяся нехватка активности, которые ожидают Вселенную, более чем компенсируются увеличившимся количеством имеющегося у нее времени. Мы можем с оптимизмом смотреть в неопределенное будущее. И хотя нашему уютному миру суждено исчезнуть, огромное множество интереснейших физических, астрономических, биологических и, возможно, даже интеллектуальных событий еще только ожидают своего часа, по мере того как наша Вселенная продолжает свой путь в вечную тьму.

### ***Пространственно-временная капсула***

Несколько раз на протяжении этой биографии Вселенной мы сталкивались с возможностью отправления сигналов в другие вселенные. Если бы нам удалось, например, создать вселенную в лабораторных усло-

виях, в нее можно было бы передать зашифрованный сигнал, прежде чем она утратит причинную связь с нашей собственной Вселенной. Но если бы вы могли послать такое сообщение, что бы вы написали в нем?

Наверное, вам захотелось бы сохранить самую суть нашей цивилизации: искусство, литературу и науку. У каждого читателя будет какая-нибудь идея насчет того, какие составляющие нашей культуры следует сохранить таким образом. Тогда как у каждого человека было бы на этот счет свое мнение, мы повели бы себя очень недобросовестно, если бы не внесли хоть какого-то предложения по архивации какой-нибудь части нашей культуры. В качестве примера мы предлагаем заключенную в капсулу версию науки, или, точнее, физики и астрономии. Среди самых основных посланий могли бы быть следующие:

- Вещество состоит из атомов, которые, в свою очередь, состоят из более мелких частиц.
- На малых расстояниях частицы проявляют свойства волны.
- Природой управляют четыре фундаментальные силы.
- Вселенная состоит из эволюционирующего пространства-времени.
- Наша Вселенная содержит планеты, звезды и галактики.
- Физические системы эволюционируют в состояния с более низкой энергией и возрастающим беспорядком.

Эти шесть пунктов, универсальная роль которых к данному моменту должна быть ясна, можно считать сокровищами наших достижений в физических науках. Возможно, это самые важные физические концепции, которые наша цивилизация открыла к настоящему моменту. Но если эти концепции — сокровища, то их венцом, несомненно, следует считать научный метод. Если есть научный метод, то при наличии достаточного времени и усилий все эти результаты получаются автоматически. Если бы существовала возможность передать в другую вселенную всего одну концепцию, представляющую интеллектуальные достижения нашей культуры, то самым стоящим посланием был бы научный метод.

# Словарь специальных терминов

**Активное ядро галактики.** Центральная область галактики с сильным источником света, предположительно поддерживаемая сверхмассивной черной дырой.

**Антивещество.** Частица каждого типа имеет связанную с ней античастицу — другую частицу с такой же массой, но зарядом противоположного знака. Эти античастицы могут аннигилировать со своими партнерами. Именно античастицы составляют антивещество.

**Бариогенез.** Образование суммарного избытка барионов над антибарионами. Другими словами, в результате этого процесса наша Вселенная состоит, главным образом, из вещества, а не из антивещества.

**Барион.** Сложная частица, состоящая из трех кварков (любых трех из шести возможных). Большинство барионов в нашей Вселенной — это протоны или нейтроны.

**Барионное вещество (материя).** Обычное вещество, состоящее из протонов, нейтронов и, возможно, других барионов.

**Большой взрыв.** Взрыв, знаменующий начало эволюции Вселенной. Это событие происходит в момент времени  $t = 0$  и представляет собой состояние бесконечной плотности и температуры.

**Большое сжатие.** Последнее событие, завершающее эволюцию (замкнутой) Вселенной, переживающей повторное сжатие. Это событие представляет собой состояние бесконечной плотности и температуры.

**Абсолютно черное тело.** Объект с постоянной температурой, поглощающий все падающее на него излучение; такой объект испускает свет четкого определенного спектра излучения.

**Черная дыра.** Область пространства-времени, в которой гравитационное поле настолько сильно, что даже свет не может ее покинуть.

**Эпоха черных дыр.** Период времени в будущем Вселенной, когда сами-ми важными ее составляющими являются черные дыры; космологические декады с сороковой по сотую.

**Коричневый карлик.** Звездный объект, имеющий слишком малую массу, чтобы осуществлять в своих недрах продолжительный ядерный синтез, и существующий отчасти за счет давления вырожденного газа.

**Кембрийский взрыв.** Сильный всплеск образования новых видов, произошедший на Земле пятьсот сорок миллионов лет назад.

**Масса Чандрасекара.** Максимальная масса белого карлика (или нейтронной звезды), которую давление вырожденного газа способно удержать от гравитационного сжатия.

**Замкнутая Вселенная.** Вселенная, плотность энергии которой достаточно высока, чтобы остановить ее расширение и привести к повторному коллапсу в «Большом сжатии».

**Холодная темная материя.** Любой кандидат в частицы темной материи с относительно большой массой (как правило, превышающей массу протона), из-за которой частицы двигаются медленно. Главным кандидатом на роль холодной темной материи являются слабо взаимодействующие массивные частицы.

**Принцип Коперника.** Идея о том, что Земля не имеет привилегированного положения в космическом пространстве.

**Временной принцип Коперника.** Идея о том, что текущая космологическая эпоха не имеет особого положения во времени.

**Космическое фоновое излучение.** Рассеянное море излучения, оставшегося от Большого взрыва.

**Проблема космологической постоянной.** Проблема того, почему космологическая постоянная, плотность энергии вакуума Вселенной, имеет такое маленькое значение (ее значение на сто двадцать порядков величины меньше, чем предполагаемое на основе простейших аргументов физики частиц).

**Космологическая декада.** Логарифмическая единица времени, которая используется для измерения очень длинных временных промежутков. Если время  $\tau$  записывают в экспоненциальном представлении  $\tau = 10^n$ , то экспонента  $n$  является числом космологических декад.

**Космологическая тепловая смерть.** Разновидность фактической тепловой смерти, в которой расширяющаяся Вселенная становится точно адиабатической, так что отсутствует возможность увеличения энтропии. В такой Вселенной, где образование энтропии отсутствует, нет места интересным физическим процессам, из-за чего Вселенная становится скучной и мертвой.

**Космологический принцип.** Утверждение о том, что Вселенная является однородной и изотропной.

**Космология.** Изучение происхождения и эволюции Вселенной в целом.

**Эпоха вечной тьмы.** Временной период в будущем Вселенной, когда исчезли все звезды и испарились черные дыры: космологические декады после сотой. Остаются только «космические отходы»: электроны, позитроны, нейтрино и излучение.

**Темная материя.** Материя во Вселенной, которая вообще не испускает света (или испускает очень мало света). Большая доля массы Вселенной пребывает именно в этой форме, которая обнаруживается только косвенным путем: посредством ее гравитационного действия. Большое количество темной материи содержится, например, в гало галактик.

**Давление вырожденного газа.** Давление, создаваемое в очень плотном газе из-за квантово-механического принципа неопределенности. Волновая природа частиц препятствует их слишком тесному сближению, что приводит к возникновению давления. В этом состоянии давление зависит только от плотности газа и не зависит от его температуры.

**Эпоха распада.** Временной период в будущем Вселенной, когда ее самыми важными составляющими являются вырожденные звездные объекты, оставшиеся после эволюции звезд: коричневые карлики, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры; космологические декады с пятнадцатой по тридцать девятую.

**Динамическая релаксация.** Процесс, в ходе которого самогравитирующая система, например скопление звезд или галактика, изменяет свою структуру. Гравитационное рассеяние в результате сближений изменяет орбиты участвующих в них звезд (или других тел), и с накоплением этих изменений меняется вся структура данной системы.

**Фауна Эдиакары.** Скопление мягкотелых созданий, впервые появившихся на Земле около восьмисот миллионов лет назад.

**Электромагнитная сила.** Одна из четырех сил природы. Эта сила включает в себя силу, действующую между заряженными частицами, и силу, создаваемую магнитными полями.

**Электромагнитное излучение.** Это излучение включает как обычные видимые световые волны, так и волны с другими длинами: гамма-лучи, рентгеновы лучи, ультрафиолетовые, инфракрасные и радиоволны. Во всех случаях излучение является самораспространяющимся возмущением, связанным с колебаниями электрических и магнитных полей.

**Диаграмма вложения.** Метод визуального представления, который используется для демонстрации кривизны пространства в общей теории относительности. На таких диаграммах пространство считается двумерной поверхностью, причем ее кривизна представляет кривизну пространства-времени.

**Энтропия.** В термодинамике это фундаментальная величина, которая служит мерой количества беспорядка в физической системе. Второй закон термодинамики гласит, что *общее* количество энтропии в любой изолированной физической системе либо увеличивается, либо остается неизменным.

**Вторая космическая скорость.** Скорость, которую нужно развить, чтобы преодолеть гравитационное притяжение астрономического тела и оторваться от его поверхности.

**Вечная инфляция.** Согласно этой версии инфляционной Вселенной во все времена какая-то область пространства-времени, расположенная где-то в мультиверсе, переживает инфляционную фазу расширения.

**Клетки эукариотов.** Клетки, которые характеризуются наличием ядра, митохондрии и/или хлоропластов; обычно эти клетки способны к митотическому делению. К организмам с клетками этого типа относятся большинство известных нам крупных земных форм жизни, включая растения, животных и грибы.

**Горизонт событий.** Граница, отделяющая черную дыру от остальной Вселенной. Эта воображаемая поверхность равна радиусу Шварцшильда, если черная дыра не вращается, и меньше этой величины в случае вращающейся черной дыры.



**Конечная функция масс.** Распределение масс вырожденных звездных остатков после завершения эволюции звезд. К этим объектам относятся нейтронные звезды, белые карлики и коричневые карлики.

**Деление.** Ядерная реакция, в ходе которой большое ядро расщепляется на более мелкие, как правило, с дополнительными нейтронами.

**Плоская Вселенная.** Вселенная с критическим значением плотности энергии (плотность выше, чем в открытой Вселенной, но ниже, чем в замкнутой). Такая Вселенная расширяется вечно, но скорость ее расширения постоянно уменьшается.

**Проблема плоскостности.** Проблема, возникающая во Вселенной, где отсутствует инфляция. Чтобы создать Вселенную столь большую и плоскую, как наша, начальные условия должны быть очень особенными: в частности, плотность ранней Вселенной должна равняться критическому значению с огромной точностью.

**Синтез.** Ядерная реакция, в ходе которой два или более ядер объединяются, образуя более крупное (тяжелое) ядро. Реакции ядерного синтеза являются источником энергии для обычных звезд и нередко называются ядерным горением.

**Общая теория относительности.** Всеобъемлющая теория пространства, времени и массы. Разработанная Альбертом Эйнштейном, общая теория относительности гласит, что гравитация вызвана кривизной пространственно-временного континуума.

**Шаровидное скопление.** Очень плотное скопление звезд; некоторые из этих шаровидных скоплений являются одними из старейших объектов во Вселенной и, как считают ученые, содержат самые старые звезды

**Великое объединение.** При очень больших значениях энергии, около  $10^{16}$  ГэВ, или  $10^{29}$  градусах Кельвина, сильное взаимодействие, слабое взаимодействие и электромагнитная сила объединяются в одно целое. Это три из четырех фундаментальных сил природы.

**Гравитационное излучение.** Волноподобные возмущения в фоновом пространстве-времени; согласно общей теории относительности таким образом излучают энергию ускоряющиеся массы.

**Гравитон.** Безмассовая частица, служащая переносчиком гравитационной силы. В гравитации гравитон играет ту же роль, что и фотон — в электромагнетизме.

**Парниковый эффект.** Механизм, посредством которого введение некоторых газов в атмосферу планеты приводит к увеличению удерживаемого ею тепла и, следовательно, к повышению температуры поверхности планеты.

**Адроны.** Класс частиц, состоящих из кварков и антикварков. Подклассом этих адронных частиц, содержащих три кварка, являются барионы, тогда как подкласс частиц, содержащих один кварк и один антикварк, называется мезонами.

**Излучение Хокинга.** Энергия, испущенная черной дырой из-за квантово-механических эффектов. Этот процесс приводит к тому, что по истечении очень долгого времени черные дыры испаряются.

**Тепловая смерть.** Концепция, которая гласит, что, как только Вселенная оказывается в абсолютном термодинамическом равновесии, любая работа оказывается невозможной. Если происходит тепловая смерть, Вселенная становится скучным и мертвым местом.

**Гелиевая вспышка.** Огромный выброс энергии, происходящий почти в конце жизни звезды. Эта энергия является результатом процессов термоядерного синтеза, в ходе которых гелий превращается в углерод за относительно короткий промежуток времени.

**Диаграмма Герцшпрунга – Рассела.** Граф, который используется для изучения эволюции звезд. По вертикальной оси откладывается светимость звезд, а по горизонтальной — температура их поверхностей. По мере эволюции звезды оставляют на этой диаграмме отчетливые следы.

**Однородный.** Одинаковый в каждой точке пространства. Вселенная считается однородной на больших расстояниях.

**Проблема горизонта.** Проблема, возникающая в такой Вселенной, где отсутствует инфляция. Согласно наблюдениям все части нашей Вселенной имеют почти одинаковую температуру, определяемую космическим фоновым излучением, даже несмотря на то, что не все ее части находились в причинной связи в более ранние эпохи (в отсутствие инфляции).

**Горячая темная материя.** Кандидат в частицы темной материи с относительно малыми массами (обычно около одной миллиардной массы протона), так что эти частицы двигаются с релятивистскими скоростями, когда определены их количества.

**Расширение по закону Хаббла.** Общее расширение Вселенной, предсказываемое теорией Большого взрыва и измеренное астрономами. Из любой данной точки отсчета скорость расширения отдаленных галактик увеличивается с увеличением расстояния; это отношение называется законом Хаббла.

**Инфляционная Вселенная.** Модификация теории Большого взрыва как момента начала Вселенной; в раннюю эпоху эволюции Вселенной расширение быстро ускоряется.

**Начальная функция масс.** Распределение масс звезд в начале их образования.

**Межзвездная среда.** Газ и пыль, заполняющие пространство между звездами в галактике.

**Изотропный.** Одинаковый во всех направлениях. На больших расстояниях Вселенная считается изотропной.

**Крупномасштабная структура Вселенной.** Структуры, образуемые галактиками на огромных расстояниях.

**Лептоны.** Отдельный класс элементарных частиц, включающий электроны, мюоны, тау-частицы и связанные с ними нейтрино. Эти частицы характеризуются полуцелым спином, отсутствием цветового заряда и приблизительно сохраняющимся свойством, называемым лептонным числом.

**Светимость.** Скорость выработки энергии (мощность) астрофизического объекта.

**Главная последовательность.** На диаграмме Герцшпрунга–Рессела звезды, внутреннее строение которых позволяет им синтезировать водород, располагаются вдоль кривой, называемой главной последовательностью. Большую часть своей жизни звезды проводят именно в таком состоянии.

**Метастабильное состояние.** Конфигурация физической системы, в которой относительно долго сохраняется высокоэнергетическое состояние. Существует также состояние с более низкой энергией, но переходам в это состояние препятствуют энергетические барьеры, из-за чего система на протяжении долгого времени сохраняет состояние с более высокой энергией.

**Мультиверс.** Большая область пространства-времени, включающая всю совокупность различных вселенных, каждая из которых имеет свои собственные свойства.

**Нейтрино.** Элементарная частица, не имеющая заряда и массы (или имеющая очень маленькую массу). Нейтрино взаимодействуют только через слабое взаимодействие (и гравитацию).

**Нейтронная звезда.** Небольшой компактный звездный объект, существующий за счет давления вырожденного нейтронного газа. Эти звездные объекты, массы которых находятся в диапазоне от одной до двух солнечных, остались после эволюции и гибели массивных звезд.

**Нуклеосинтез.** Образование химических элементов в ходе ядерных реакций. Образование легких элементов происходит в начале истории Вселенной; более тяжелые элементы образуются в недрах звезд.

**Парадокс Ольберса.** Проблема, возникающая в статической, неизменной и бесконечно старой Вселенной. В такой Вселенной ночное небо было бы столь же ярким, как поверхность звезды.

**Открытая Вселенная.** Вселенная, плотность энергии которой недостаточна, чтобы остановить ее расширение; открытая Вселенная продолжает расширяться вечно.

**Панспермия.** Идея о том, что земная жизнь зародилась где-то в другом месте Галактики и была принесена на Землю астрофизическими телами: метеорами, астероидами или кометами.

**Фазовый переход.** Изменение состояния между двумя разными фазами или конфигурациями вещества. Самым простым примером служит превращение воды в лед или пар.

**Фотон.** Частица, соответствующая электромагнитному излучению или свету. Фотоны распространяются со скоростью света и имеют энергию, зависящую от их длины волны: чем меньше длина волны, тем больше энергия.

**Постоянная Планка.** Фундаментальная постоянная природы, устанавливающая масштаб для квантово-механических процессов; часто записывается как  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \times 10^{-27}$  эрг-сек.

- Масштаб Планка.** Значение энергии, при котором гравитация объединяется с тремя другими фундаментальными силами природы. Эта энергия составляет около  $10^{19}$  ГэВ, или  $10^{32}$  градусов Кельвина.
- Позитрон.** Положительно заряженная античастица, являющаяся партнером электрона; обычно обозначается  $e^+$ .
- Позитроний.** Атомоподобная структура, состоящая из электрона и позитрона, которые вращаются по орбите вокруг друг друга.
- Первичная черная дыра.** Черная дыра, созданная в ранней Вселенной. Считается, что это самые маленькие черные дыры, хотя до сих пор эти объекты остаются гипотетическими.
- Первичная эпоха.** Самая ранняя фаза в истории нашей Вселенной, предшествующая образованию любых астрономических структур. До того как Вселенной исполнился миллион лет, она не содержала ни звезд, ни галактик, ни скоплений.
- Распад протона.** Предполагаемый процесс, в ходе которого протон распадается на более легкие частицы: фотоны, позитроны и нейтрино. Протон живет очень долго, по меньшей мере  $10^{32}$  лет, — гораздо дольше современного возраста Вселенной.
- Протозвезда.** Звезда, которая все еще находится в процессе образования путем наращивания массы из межзвездной среды.
- Квантовая гравитация.** Физический режим, при котором для описания природы необходимы как общая теория относительности, так и квантовая механика. Над самосогласованной теорией квантовой гравитации физики работают до сих пор.
- Квантовая механика.** Физическая теория, которая описывает материю как имеющую волновой характер на очень малых расстояниях (обычно на уровне размера атомов и даже меньшем).
- Кварки.** Фундаментальные частицы, из которых состоят протоны, нейтроны и прочие сложные частицы, называемые адронами.
- Квazar.** Молодая галактика с высокоэнергетическим источником свечения, питаемым сверхмассивной черной дырой.
- Эпоха господства излучения.** Ранняя фаза истории Вселенной, когда плотность энергии излучения превышала плотность обычного вещества. Эта фаза продолжалась первые несколько тысяч лет.

**Рекомбинация.** Эпоха в истории Вселенной, когда электроны впервые объединились с ядрами, образуя обычные атомы; это событие произошло, когда Вселенной было около трехсот тысяч лет.

**Красный карлик.** Другое название звезды с низкой массой: от десяти до сорока процентов массы Солнца. Красные карлики — самые многочисленные и долго живущие из всех возможных звезд.

**Красное смещение.** Если источник света, такой как звезда или галактика, удаляется от нас, его излучение сдвигается в область более низких частот или более длинных волн (в сторону красного края спектра).

**Энергия покоя.** Энергия, которая содержится в массе объекта, когда он не движется. Также называется массой покоя. Если данный объект способен полностью аннигилировать, то высвобождается энергия  $E = mc^2$ .

**Радиус Шварцшильда.** Фактическая внешняя граница черной дыры. Объект данной массы, чтобы стать черной дырой, должен быть сжат до этого радиального размера.

**Сингулярность.** Точка в пространстве-времени, в которой плотность становится бесконечной (так же, как давление и температура). В таких точках физический закон утрачивает свою предсказательную способность. Во Вселенной сингулярности возникают в центрах черных дыр: в самом начале Вселенной, зародившейся в Большом взрыве, и в самое последнее мгновение Вселенной, переживающей повторное сжатие.

**Звездная черная дыра.** Черная дыра, масса которой сравнима с массой звезды и находится чаще всего в диапазоне от трех до тридцати солнечных. Такие черные дыры могут образоваться при вспышке сверхновой, происходящей в результате гибели массивной звезды.

**Звездные остатки.** Относятся ко всей совокупности конечных продуктов эволюции звезд, включая черные дыры, нейтронные звезды, белые карлики и иногда также коричневые карлики.

**Эпоха звезд.** Период времени в эволюции Вселенной, когда звезды служат самым важным источником энергии. В настоящее время мы живем именно в эту эпоху, которая охватывает космологические декады с шестой по четырнадцатую.

**Сильное ядерное взаимодействие.** Одна из четырех сил природы. Сильное взаимодействие удерживает протоны и нейтроны в атомных ядрах и играет важную роль в ядерном синтезе.

**Сверхмассивная черная дыра.** Большие черные дыры, массы которых составляют от миллионов до миллиардов солнечных. Эти гигантские черные дыры живут в центрах большинства галактик. Они служат двигателем для активных ядер галактик и квазаров.

**Сверхновая.** Сильная вспышка эволюционировавшей звезды в конце того этапа ее жизни, на протяжении которого она существует за счет ядерного горения.

**Приливные силы.** Для данного объекта приливная сила есть разность гравитационной силы, которая действует на его ближнюю сторону, и гравитационной силы, действующей на его дальнюю сторону.

**Растяжение времени.** Релятивистский эффект, при котором время движется медленнее. Растяжение времени имеет место для объектов, движущихся со скоростью, близкой к скорости света, и для объектов, находящихся вблизи поверхности черной дыры.

**Принцип неопределенности.** Свойство квантовых систем (и других физических систем, проявляющих волновое поведение). Утверждает, что невозможно с абсолютной точностью одновременно знать и импульс, и положение частицы.

**Плотность энергии вакуума.** Энергия, связанная с пустым пространством. В принципе, эта энергия может быть существенной, а значит, «пустое пространство» на самом деле не такое уж пустое. Энергия этого типа может создавать отталкивающую гравитационную силу и направить Вселенную в фазу инфляционного расширения.

**Виртуальные частицы.** Частицы, возникающие из-за квантово-механического принципа неопределенности. Такие частицы живут на протяжении лишь очень короткого времени.

**Слабое ядерное взаимодействие.** Одна из четырех сил природы. Слабое взаимодействие служит связующим звеном при радиоактивных распадах и некоторых процессах ядерного синтеза.

**Белый карлик.** Объект, относящийся к классу звездных остатков и существующий за счет давления вырожденного электронного газа. В белых карликах в конце своей жизни превращаются звезды, масса которых составляет от одной десятой до восьми масс Солнца.

**Слабо взаимодействующие массивные частицы.** Частицы, которые положительно составляют некоторую долю темной материи во Вселенной. Эти частицы взаимодействуют только посредством гравитации и слабого взаимодействия; их масса, согласно предположениям, примерно в десять раз превышает массу протона.

**Релятивистский пространственно-временной туннель.** В общей теории относительности эта предполагаемая структура осуществляет связь между двумя черными дырами, расположенными либо в отдельных вселенных, либо в отдельных областях нашей Вселенной. Пространственно-временной туннель, в сущности, образует мост между двумя черными дырами, а значит, и между двумя различными областями пространства-времени.



# Примечания

Чтобы не отягощать естественный ход повествования сносками и ссылками, мы предусмотрели беглый научный обзор различных вопросов для каждой главы. В приведенных ниже примечаниях мы представляем краткое описание наиболее важных вопросов и соответствующих ссылок. Список литературы, упоминаемой в ссылках, приведен ниже. В некоторых случаях, ради краткости, мы приводим только типичные ссылки.

## Введение

Большая часть материала этой книги основана на обзорно-аналитической статье, в общих чертах описывающей физику будущей Вселенной (Adams and Laughlin, 1997, далее в этой книге AL<sub>97</sub>; см. также Adams and Laughlin, 1998). Вопрос будущего Вселенной рассматривался и во многих предыдущих работах. Рис (Rees, 1969) размышлял о судьбе замкнутой Вселенной, тогда как Ислам (Islam, 1977, 1979) и Дайсон (Dyson, 1979) рассмотрели случай открытой или плоской Вселенной, которая постоянно расширяется. В ряде других статей рассматриваются специфические вопросы, например последствия распада протона (Feinberg, 1981; Dicus et al., 1982; Turner, 1983) и образование позитрония (Page and McKee, 1981a). Общий обзор данной темы выполнили Ислам (Islam, 1983) и Дэвис (Davies, 1944).

Ключевой вопрос состоит в том, продолжит ли Вселенная расширяться и впредь или, по меньшей мере, проживет ли она достаточно долго, чтобы пройти всю временную линию, представленную в этой книге. Современные астрономические данные свидетельствуют о том, что ее плотность меньше (или, возможно, равна) критической, а значит, в будущем наша Вселенная действительно продолжит расширяться (см. последний обзор Dekel, Burstein and White, 1997, а также приводимые там ссылки).

Основы астрономии и четыре силы природы объясняются во многих вводных учебниках (например, Shu, 1982; см. также Zuckerman and

Malkin, 1996). В Shu (1982) также описывается противостояние гравитации и термодинамики.

В обзорной статье  $AL_{97}$  вводятся концепции космологических деkad, «временной принцип Коперника» и будущие эпохи жизни Вселенной. В стандартной космологии, основанной на теории Большого взрыва, прошлую историю Вселенной обычно разбивают на две эпохи: эпоху господства излучения и эпоху господства вещества. Переход от первой эпохи ко второй происходит, когда Вселенной исполняется около двух тысяч лет (при этом точное число, как и все космологические параметры, представленные в этой книге, не лишено некоторой неопределенности). Эти временные периоды определяются природой космологического расширения. Однако в данном повествовании временные периоды определяются существующими астрономическими объектами. Первичная эпоха, когда не было ни звездных объектов, ни астрономических структур, почти синонимична эпохе излучения, но продолжается и в эпоху господства вещества до момента образования первых звезд.

Гипотеза соответствия масштабов других форм жизни была введена в Dyson (1979).

Часто рассказываемую историю Коперника и Бруно можно найти во многих источниках (см., например, сборник Knickerbocker, 1927). Образование планет вокруг других звезд обсуждалось на протяжении нескольких веков (Kant, 1755; Laplace, 1796), но планеты, вращающиеся по орбите близких к нам звезд, были открыты лишь недавно (Mayor and Queloz, 1995; Marcy and Butler, 1996; современный обзор данной темы см. также в Marcy and Butler, 1998, а общее изложение — в Croswell, 1997).

## 1. Первичная эпоха

В этой главе рассматривается современный вариант теории Большого взрыва, который включает эпоху инфляции. Всесторонний анализ современной космологии см. в работе Kolb and Turner (1990). Классическое популярное изложение теории Большого взрыва см. в книге Weinberg (1977). Критическое обсуждение современных вопросов космологии имеется в собрании трудов конференции, изданном Туроком (Turok, 1997).

Понятие инфляционной Вселенной было введено в работе Guth (1981). Другие важные ранние статьи: Albrecht and Steinhardt (1982); Linde (1982, 1983a); Bardeen, Steinhardt and Turner (1983); Guth and Pi (1982); Steinhardt and Turner (1984). Всестороннее учебное изложение

теории инфляции дается в книгах Linde (1990) и Kolb and Turner (1990). Популярное изложение этой темы имеется в работе Guth (1997).

Во время инфляции, когда «точки пространства разбегаются друг от друга со скоростью, превышающей скорость света», говоря более точно, мы имеем в виду, что масштабный множитель  $R(t)$  увеличивается быстрее, чем линейная функция времени  $t$  (включающая обычный вид  $R(t) \propto e^{Ht}$ ).

Космическое фоновое излучение обнаружили Пензиас и Вильсон (Penzias and Wilson, 1965). Два десятилетия спустя спутник COBE показал, что спектр этого излучения чрезвычайно близок к спектру абсолютно черного тела, а затем обнаружил небольшие колебания температуры  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$  (Wright et al., 1992; Smoot et al., 1992). Благодаря последующим наблюдениям, проводившимся из наземных обсерваторий, были выполнены дополнительные измерения колебаний космического фонового излучения в меньших угловых масштабах (например, Meyer et al., 1991; Gaier et al., 1992; Shuster et al., 1993).

Бариогенезом называется процесс, в ходе которого вещества образуется несколько больше, чем антивещества. Основные составляющие процесса нарушения барионного числа — реакции, протекающие в неравновесном состоянии, и отсутствие обращения времени — впервые описал Сахаров (Sakharov, 1967). Более современный анализ дается в труде Dolgov (1992).

Тему нуклеосинтеза после Большого взрыва впервые подняли Альфер, Бете и Гамов (Alpher, Bethe and Gamow, 1948; см. также Gamow, 1946), продолжил Вагонер (Wagoner, 1973), после чего она быстро превратилась в полностью раскрытый вопрос (например, Walker et al., 1991). Хорошее учебное изложение этого вопроса имеется в книге Kolb and Turner (1990).

Измерение массы в галактических гало и скоплениях галактик вкупе с результатами нуклеосинтеза, последовавшего за Большим взрывом, являются убедительным свидетельством существования небарионной темной материи (см., например, обзор Krauss, 1986). Несмотря на то, что общие свойства такой материи достаточно подробно описаны, сама темная материя пока что не была идентифицирована (см., например, Diehl et al., 1995; Jungman et al., 1996; Spooner, 1997).

## 2. Эпоха звезд

Хотя образование галактик — тема, изучение которой в настоящее время еще не закончилось, основные принципы здесь уже установле-

ны и их можно найти в самых новых книгах (Peebles, 1993; Kolb and Turner, 1990). Исследование вопроса образования звезд тоже является быстро развивающейся областью. Современная парадигма процесса звездообразования была определена около десяти лет назад (например, Shu, Adams, and Lizano, 1987), причем с того времени были достигнуты и другие успехи (см. недавно выпущенный сборник трудов конференции, изданный Боссом и др. [Boss et al., 1999]).

Эта глава затрагивает многие вопросы звездной эволюции — науки, которое получила серьезное развитие во второй половине двадцатого века. Многие рассматриваемые здесь темы описаны в учебниках для выпускников высших учебных заведений (Clayton, 1983; Kippenhahn and Weigert, 1990; Hansen and Kawaler, 1994; см. также Chandrasekhar, 1939).

Долгосрочная судьба Земли в значительной степени зависит от того, какую часть своей массы потеряет Солнце, превратившееся в красного гиганта (см. Sackmann et al., 1993). Долгосрочная судьба самых маленьких звезд, красных карликов, была определена лишь недавно (Laughlin, Bodenheimer, and Adams, 1997).

Расчеты возможности вхождения в нашу Солнечную систему красного карлика и последующего выброса Земли в межзвездное пространство или ее захвата и перемещения на орбиту этой звезды ранее не публиковались. Этот результат относится к расчетам по рассеянию солнечных систем в звездных скоплениях (Laughlin and Adams, 1998); этим типом рассеяния можно объяснить некоторые орбиты, наблюдаемые во внесолнечных планетарных системах (Marcy and Butler, 1998).

Гораздо более подробное изложение истории жизни на нашей планете дается в книге Шопфа (Schopf, 1992). Самым старым недвусмысленным ископаемым — 3,5 миллиарда лет; они были найдены в горных образованиях Свазиленда (Южная Африка) и Пилбара (Западная Австралия). Еще более старые осадочные породы найдены в геологическом разрезе Исуа (Гренландия), хотя эти породы претерпели значительные изменения, а потому не содержат четких отпечатков ранней жизни. Самые ранние известные зукарноты появились в отпечатках ископаемых около 1750 миллионов лет назад, быстро дифференцировались около 1100 миллионов лет назад и достигли пика изобилия и разнообразия около 900 миллионов лет назад (подробности см. в книге Schopf, 1992 и имеющихся там сносках).

В рассуждении, касающемся поиска внеземной жизни и колонизации Галактики, мы находимся на достаточно голословной основе, особенно по сравнению с нашим обсуждением физических явлений. Цитата Конта (Comte, 1835) взята из труда Пайса (Pais, 1986).

Долгосрочные перспективы звездообразования в Галактике оцени-

ваются на основе исследований истории образования звезд в нашей Галактике и других галактиках (см., например, Kennicutt, Tamblyn, and Congdon, 1994; Rana, 1991; AL<sub>97</sub>). Грядущее возрастание содержания в Галактике металлов оценивается у Тиммеса (Timmes, 1996).

### 3. Эпоха распада

Содержимое Вселенной в эпоху распада определяется сочетанием начальной функции масс (IMF<sup>1</sup>) для звезд и преобразования между начальными массами звезд и массами их вырожденных остатков. Начальная функция масс остается предметом текущих исследований, но к данному моменту мы уже понимаем ее в самых общих чертах (Salpeter, 1955; Miller and Scalo, 1979; Scalo, 1986; Rana, 1991; Adams and Fatuzzo, 1996). Преобразование между массами исходной звезды и ее остатка известно достаточно хорошо (см., например, Wood, 1992), но значение массы, которая теряется во время фаз красного гиганта, требует дополнительного уточнения. Звездные объекты с самой низкой массой — коричневые карлики — были обнаружены совсем недавно (сравните Oppenheimer et al., 1995 и Golimowski et al., 1995 с более старыми аналитическими работами Stevenson, 1991 и Tinney, 1995), но, вместе с тем, они уже достаточно хорошо изучены как астрофизические объекты (Burrows et al., 1993; Burrows and Liebert, 1993).

Динамика столкновений галактик обсуждается в работах Binney and Tremaine (1987) и M. Weinberg (1989). Что касается нашего грядущего столкновения с Андромедой, орбиты соседних с нами галактик измеряются в настоящее время (Peebles, 1994; Riess et al., 1995). Динамическая релаксация галактики аналогична динамической релаксации звездных скоплений (см. Binney and Tremaine, 1987; Shu, 1982; Lightman and Shapiro, 1978); последние системы имеют много меньший размер и изменяют свою структуру за более короткие промежутки времени, в силу чего эти вопросы динамики можно изучать более прямым образом.

По прямым столкновениям звезд был проделан относительно малый объем работ, так как в современной Вселенной они крайне редки. Компьютерная модель, приведенная в третьей главе, взята непосредственно из нашей обзорно-аналитической статьи (AL<sub>97</sub>). Рассказ о звездах, сжигающих гелий и углерод, см. в работе Kippenhahn and Weigert (1990).

Хотя точная природа небарионной составляющей темной материи все еще не определена, ее общие свойства уже известны в довольно узких пределах (Diehl et al., 1995; Jungman et al., 1996; Spooner, 1997).

---

<sup>1</sup>От английского *initial mass function*. — Прим. пер.

В частности, чтобы иметь космологически интересное изобилие сегодня, поперечное сечение взаимодействия темной материи должно иметь порядок  $\sigma \sim 10^{-37}$  см<sup>2</sup> (Kolb and Turner, 1990), а следовательно, белые карлики будут захватывать частицы темной материи, текущие через недра звезды (AL<sub>97</sub>). Изучался также захват темной материи в недрах Солнца и Земли (Faulkner and Gilliland, 1985; Press and Spergel, 1985; Krauss, Srednicki, and Wilczek, 1986; Gould, 1987).

Гипотетические рассуждения о жизни в атмосфере белого карлика вытекают непосредственно из гипотезы соответствия масштабов, введенной Дайсоном (Dyson, 1979); рассуждения же о жизни вне белых карликов базируются на простых предположениях.

Хотя теоретики предсказали распад протона, экспериментаторы пока что установили только нижнюю планку времени жизни этой частицы: порядка тридцати двух космологических декад (Particle data Group, 1998; Langacker, 1981; Perkins, 1984). Ради определенности, на протяжении большей части повествования мы принимаем время жизни протона равным тридцати семи космологическим декадам; другие значения времени жизни протона можно без труда согласовать с текстом, т.к. они не внесут в него качественных изменений. Если протон не распадется одним из простейших способов, предсказанных теориями великого объединения (см., например, Langacker, 1981; Капе, 1993), возможны множество других каналов его распада (см., например, Feinberg, Goldhaber and Steigman, 1978; Wilczek and Zee, 1979; Mohaparta and Marshak, 1980; Weinberg, 1980; Goity and Sher, 1995). Кроме того, структура вакуума в теории электрослабых взаимодействий разрешает процессы, протекающие с нарушением барионного числа; туннелирование из одного вакуумного состояния в другое может вызвать изменение барионного числа и распад протонов через временной интервал, предположительно равный ста сорока космологическим декадам (см. Rajaraman, 1987; Kolb and Turner, 1990; 't Hooft, 1976; AL<sub>97</sub>). Наконец, распад протона может быть спровоцирован и действием гравитации, что предположительно произойдет через сорок пять–сто шестьдесят девять космологических декад (см., например, Zel'dovich, 1976; Hawking, Page and Pope, 1979; Page, 1980; Hawking, 1987; см. также Adams et al., 1998).

Влияние протонного распада на строение и эволюцию звезд рассмотрено в следующих работах: Feinberg (1981), Dicus et al. (1982), Turner (1983), AL<sub>97</sub>, Adams et al. (1998). На остатки звезд также влияют другие долгосрочные процессы, как-то: пикноядерные реакции (Shapiro and Teukolsky, 1983; Salpeter and van Horn, 1969) и расщепление (Hubell, Grimm, and Overbo, 1980).

## 4. Эпоха черных дыр

Основные свойства черных дыр описаны во многих учебниках (Weinberg, 1972; Misner, Thorne and Wheeler, 1973; Wald, 1984; Ohanian and Ruffini, 1994). В этих же книгах рассмотрен вопрос гравитационного излучения. Особенно хорошее популярное изложение темы черных дыр и общей теории относительности представлено в книге Thorne (1994).

Свидетельства наблюдательного характера касательно черных дыр можно найти в трех различных типах условий: черной дыре с массой в три миллиона Солнц, расположенной в центре нашей Галактики (Genzel et al., 1996), сверхмассивных черных дырах, существующих в центрах внешних галактик (Kormendy et al., 1997), и звездных черных дырах, имеющих в нашей Галактике (Narayan et al., 1997). Пока что никаких признаков существования первичных черных дыр обнаружено не было (Carr, 1976).

Динамика черной дыры, разрушающей нашу Солнечную систему, была просчитана специально для этой книги и более нигде не цитировалась.

Испускание излучения черными дырами было впервые предсказано более двух десятилетий назад (Hawking, 1974, 1975). И хотя излучение Хокинга до сих пор не обнаружено, а потому остается чисто теоретической концепцией, в общих чертах оно предсказано и описано во многих учебниках (например, Wald, 1984, 1994; Thorne et al., 1986; Biggell and Davies, 1982). Однако из-за отсутствия полной теории квантовой гравитации заключительные мгновения жизни черных дыр до сих пор вызывают споры (например, Russo, Susskind, and Thorlacius, 1992).

Насколько нам известно, теоретическое построение компьютера на основе черных дыр оригинально. Однако базовая идея, связанная с созданием логических элементов из знакомых материалов, использовалась и в других контекстах (например, Poundstone, 1985).

Вопрос о том, способна ли Вселенная создавать черные дыры быстрее, чем они испаряются, остается открытым (см., например, Rees, 1984, 1997; см. также Page and McKee, 1981a, Frautschi, 1982).

## 5. Эпоха вечной тьмы

Содержимое Вселенной в эпоху вечной тьмы следует непосредственно из ее содержимого в предыдущие космологические эпохи (см. также Page and McKee, 1981ab; Barrow and Tipler, 1986). Фоновые излучения будущей Вселенной вычисляются в  $AL_{97}$ ; самые большие неопределен-

ности возникают из-за того, что нам точно не известно время жизни протона и распределение масс черных дыр.

Вопрос тепловой смерти Вселенной обсуждался повсеместно с тех самых пор, как был открыт второй закон термодинамики (Helmholtz, 1854; Clausius, 1865, 1868). В контексте теории Большого взрыва вопрос тепловой смерти превращается в вопрос адиабатичности (см., например, Tolman, 1934; Eddington, 1931; Barrow and Tipler, 1978, 1986; Frautschi, 1982; AL<sub>97</sub>). Важное ограничение на долгосрочное производство энтропии во Вселенной задается границей Бекенштейна (Bekenstein, 1981).

Образование и распад позитрония в будущей Вселенной вычислен в работе Page and McKee (1981ab). Вопрос продолжения аннигиляции частиц рассмотрен во многих источниках (например, Frautschi, 1982; Barrow and Tipler, 1986; AL<sub>97</sub>).

Наверное, самым спекулятивным физическим процессом из рассмотренных в данной книге является возможность будущего фазового перехода, который может быть запущен квантовым туннелированием скалярного поля. Первые подобные расчеты выполнили Voloshin et al. (1975) и Coleman (1977, 1985). Впоследствии эти расчеты были обобщены с целью включения гравитации (Coleman and De Luccia, 1980), влияния конечной температуры (Linde, 1983b) и более общих форм потенциала скалярного поля (Adams, 1993). Обсуждались также космологические следствия фазовых переходов вакуума (Hut and Rees, 1983; Turner and Wilczek, 1982). Когда и если происходит такой фазовый переход, соответственно, могут измениться и законы физики (Cronin and Sher, 1990; Sher, 1989; Sukuki, 1988; Primack and Sher, 1980). Родственным процессом является образование новых вселенных (Sato et al., 1982; Blau, Guendelman and Guth, 1987; Hawking, 1987; Farhi, Guth and Guven, 1990; см. также Guth, 1997). Эти новые вселенные, в принципе, могут получать из нашей, материнской, Вселенной информацию и, возможно, даже материю (различные точки зрения см., например, в Visser, 1995; Linde, 1988, 1989; Tipler, 1992).

## Заключение

Долгосрочное расширение Вселенной зависит от множества факторов, включая вклад, который вносит в общую плотность энергии вакуум (Weinberg, 1989; Carroll, Press and Turner, 1992), массовую плотность Вселенной (недавний обзор см. в работе Turkok, 1997; см. также Loh and Spillar, 1986) и многие другие соображения (например, Ellis and Rothman, 1993; Gott, 1993; Grischuk and Zel'dovich, 1978).



Хотя современные данные астрономических наблюдений свидетельствуют о том, что Вселенная продолжит расширяться (Dekel et al., 1997), мы вкратце рассматриваем сценарий, согласно которому Вселенная, или некоторая ее часть, переживет повторное сжатие. Классическое изложение физических событий, ведущих к Большому сжатию, см. в статье Риса (Rees, 1969).

Тонкая настройка нашей Вселенной обсуждается во многих контекстах и связана с «антропным космологическим принципом» (более подробное изложение см. в трудах Barrow and Tipler, 1986; Carr and Rees, 1979). Идея о том, что наша Вселенная — всего лишь одна из множества возможных, в настоящее время вызывает все более пристальное внимание космологии (например, Rees, 1981); последняя популярная трактовка мультиверса и его следствий представлена в книге Риса (Rees, 1997).

На идее вечной инфляции и вечной сложности часто останавливался А. Линде (см., например, Linde, 1986, 1988, 1989, 1990, 1994; см. также Vilenkin, 1983). Понятие дарвиновской эволюции вселенных ввел и описал в своей последней книге Л. Смолин (Smolin, 1997; см. также Rees, 1997).

## Ссылки и дополнительная литература

- Adams F. C. 1993, General solutions for tunneling of scalar fields with quartic potentials, *Phys. Rev. D* **48**, 2800.
- Adams F. C. and M. Fatuzzo, 1996, A theory of the initial mass function for star formation in molecular clouds, *Astrophys. J.* **464**, 256.
- Adams F. C. and G. Laughlin, 1997, A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects, *Rev. Mod. Phys.* **69**, 337.
- Adams F. C. and G. Laughlin, 1998, The future of the universe, *Sky and Telescope* **96**, 32.
- Adams F. C., G. Laughlin, M. Mbonye, and M. J. Perry, 1998, The gravitational demise of cold degenerate stars, *Phys. Rev. D* **58**, 083003.
- Albrecht A. and P. J. Steinhardt, 1982, Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1220.
- Alpher R. A., H. Bethe and G. Gamow, 1948, The origin of chemical elements. *Phys. Rev.* **73**, 803.
- Bahcall J. N., 1989, *Neutrino Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. press).
- Bardeen J. M., P. J. Steinhardt and M. S. Turner, 1983, Spontaneous creation of almost scale-free density perturbations in an inflationary universe, *Phys. Rev. D* **28**, 679.
- Barrow J. D. and F. J. Tipler, 1978, Eternity is unstable, *Nature* **276**, 453.
- Barrow J. D. and F. J. Tipler, 1986, *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Oxford Univ. Press).
- Bekenstein J. D., 1981, A universal upper bound to the entropy to energy ratio for bounded systems, *Phys. Rev. D* **23**, 287.
- Binney J. and S. Tremaine, 1987, *Galactic Dynamics* (Princeton: Princeton Univ. Press).
- Birrell N. D. and P. C. W. Davies, 1982, *Quantum Fields in Curved Space* (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- Blau S. K., E. I. Guendelman and A. H. Guth, 1987, Dynamics of false-vacuum bubbles, *Phys. Rev. D* **35**, 1747.

- Bond J. R., B. J. Carr and C. J. Hogan, 1991, Cosmic backgrounds from primeval dust, *Astrophys. J.* **367**, 420.
- Boss A. V. Mannings and S. Russell, 1999, editors, *Protostars and Planets IV* (Tucson: Univ. Arizona Press).
- Burrows A., W. B. Hubbard, D. Saumon and J. I. Lunine, 1993, An expanded set of brown dwarf and very low mass star models, *Astrophys. J.* **406**, 158.
- Burrows A. and J. Liebert, 1993, The science of brown dwarfs, *Rev. Mod. Phys.* **65**, 301.
- Carr B. J., 1994, Baryonic dark matter, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **32**, 531.
- Carr B. J., 1976, Some cosmological consequences of primordial black hole evaporation, *Astrophys. J.* **206**, 8.
- Carr B. J. and M. J. Rees, 1979, The anthropic principle and the structure of the physical world, *Nature* **278**, 605.
- Carroll S. M., W. H. Press and E. L. Turner, 1992, The cosmological constant, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **30**, 499.
- Chandrasekhar S., 1939, *Stellar Structure* (New York: Dover).
- Clausius R., 1865, *Ann. Physik* **125**, 353.
- Clausius R., 1868, *Phil. Mag.* **35**, 405.
- Clayton D. D., 1983, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis* (Chicago: Univ. Chicago Press).
- Coleman S., 1977, The fate of the false vacuum: 1. Semiclassical theory, *Phys. Rev. D* **15**, 2929.
- Coleman S., 1985, *Aspects of Symmetry* (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- Coleman S. and F. De Luccia, 1980, Gravitational effects on and of vacuum decay, *Phys. Rev D* **21**, 3305.
- Comte A., 1835, *Cours de la Philosophie Positive*, **2**, 2 (Paris: Bachelier; repr. by Editions Anthropos, Paris 1968).
- Crone M. M. and M. Sher, 1990, The environmental impact of vacuum decay. *Am. J. Phys.* **59**, 25.
- Croswell K., 1997, *Planet Quest* (New York: The Free Press).
- Davies P. C. W., 1982, *The Accidental Universe* (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- Davies P. C. W., 1994, *The Last Three Minutes* (New York: Basic Books).

- Dekel A., D. Burstein and S. D. M. White, 1997, Measuring  $\omega$ , in *Critical Dialogues in Cosmology*, ed. N. Turok (Singapore: World Scientific), p. 175.
- Dicus, D. A., J. R. Letaw, D. C. Teplitz, and V. L. Teplitz, 1982, Effects of proton decay on the cosmological future, *Astrophys. J.* **252**, 1.
- Diehl E., G. L. Kane, C. Kolda and J. D. Wells, 1995, Theory, phenomenology, and prospects for detection of supersymmetric dark matter, *Phys. Rev. D* **52**, 4223.
- Dolgov A. D., 1992, Non-GUT baryogenesis, *Physics Reports* **222**, 309.
- Dyson F. J., 1979, Time without end: Physics and biology in an open universe, *Rev. Mod. Phys.* **51**, 447.
- Dyson F. J., 1988, *Infinite in All Directions* (New York: Harper and Row).
- Eddington A. S., 1931, *Nature* **127**, 447.
- Ellis G. F. R. and T. Rothman, 1993, Lost horizons, *Am. J. Phys.* **61**, 883.
- Ellis G. F. R. and D. H. Coule, 1994, Life at the end of the universe, *Gen. Rel. and Grav.* **26**, 731.
- Farhi E. H., A. H. Guth and J. Guven, 1990, Is it possible to create a universe in the laboratory by quantum tunneling? *Nuclear Phys.* **B339**, 417.
- Faulkner J. and R. L. Gilliland, 1985, Weakly interacting massive particles and the Solar neutrino flux, *Astrophys. J.* **299**, 994.
- Feinberg G., 1981, The coldest neutron star, *Phys. Rev. D* **23**, 3075.
- Feinberg G., M. Goldhaber and G. Steigman, 1978, Multiplicative baryon-number conservation and the oscillation of hydrogen into antihydrogen, *Phys. Rev. D* **18**, 1602.
- Frautschi S., 1982, Entropy in an expanding universe. *Science* **217**, 593.
- Gaier T., et al., 1992, A degree-scale measurement of anisotropy of the cosmic background radiation, *Astrophys. J. Lett.* **398**, L1.
- Gamow G., 1946, Expanding universe and the origin of elements, *Phys. Rev.* **70**, 572.
- Genzel R., et al., 1996, The dark mass concentration in the central parsec of the Milky Way, *Astrophys. J.* **472**, 153.
- Goity J. L. and M. Sher, 1995, Bounds on  $\Delta B = 1$  couplings in the supersymmetric standard model, *Phys. Lett.* **346 B**, 69.
- Golimowski D. A., T. Nakajima, S. R. Kulkarni and B. R. Oppenheimer, 1995, Detection of a very low mass companion to the astrometric binary Gliese 105A, *Astrophys. J. Lett.* **444**, L101.

- Gott J. R., 1993, Implications of the Copernican Principle for our future prospects, *Nature* **363**, 315.
- Gould A., 1987, Resonant enhancements in weakly interacting massive particle capture by the Earth, *Astrophys. J.* **321**, 571.
- Grischuk L. P. and Ya. B. Zel'dovich, 1978, Long wavelength perturbations of a Friedmann universe, and anisotropy of the microwave background, *Sov. Astron.* **22**, 125.
- Guth A., 1981, The inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems, *Phys. Rev. D* **23**, 347.
- Guth A., 1997, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins* (Reading, MA: Addison-Wesley).
- Guth A. H. and S.-Y. Pi, 1982, Fluctuations in the new inflationary universe, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1110.
- Hansen C. J. and S. D. Kawaler, 1994, *Stellar Interiors: Physical Principles, Structure, and Evolution* (New York: Springer).
- Hawking S. W., 1974, Black hole explosions? *Nature* **248**, 30.
- Hawking S. W., 1975, Particle creation by black holes, *Comm. Math. Phys.* **43**, 199.
- Hawking S. W., 1976, Black holes and thermodynamics, *Phys. Rev. D* **13**, 191.
- Hawking S. W., 1982, The development of irregularities in a single bubble inflationary universe, *Phys. Lett.* **115 B**, 295.
- Hawking S. W., 1987, Quantum coherence down the wormhole, *Phys. Lett.* **195 B**, 337.
- Hawking S. W., D. N. Page and C. N. Pope, 1979, The propagation of particles in spacetime foam, *Phys. Lett.* **86 B**, 175.
- Helmholz H. von, 1854, *On the Interaction of Natural Forces*.
- 't Hooft G., 1976, Symmetry breaking through Bell-Jackiw anomalies, *Phys. Rev. Lett.* **37**, 8.
- Hubbell J. H., H. A. Grimm and I. Overbo, 1980, Pair, triplet, and total atomic cross sections for 1 MeV-100 GeV photons in elements  $Z=1$  to 100, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **9**, 1023.
- Hut P. and M. J. Rees, 1983, How stable is our vacuum? *Nature* **302**, 508.
- Islam J. N., 1977, Possible ultimate fate of the universe, *Quart. J. R. Astron. Soc.* **18**, 3.
- Islam J. N., 1979, The ultimate fate of the universe, *Sky and Telescope* **57**, 13.

- Islam J. N., 1983, *The Ultimate Fate of the Universe* (Cambridge: Cambridge Univ Press).
- Jungman G., M. Kamionkowski and K. Griest, 1996, Supersymmetric dark matter, *Physics Reports* **267**, 195.
- Kane G. L., 1993, *Modern Elementary Particle Physics* (Reading, MA: Addison-Wesley).
- Kane G. L., 1995, *The Particle Garden* (Reading, MA: Addison-Wesley).
- Kant I., 1755, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*.
- Kennicutt R. C., P. Tamblyn and C. W. Congdon, 1994, Past and future star formation in disk galaxies, *Astrophys. J.* **435**, 22.
- Kippenhahn R. and A. Weigert, 1990, *Stellar Structure and Evolution* (Berlin: Springer).
- Knickerbocker W. S., 1927, *Classics of Modern Science* (Boston: Beacon Press).
- Kolb E. W. and M. S. Turner, 1990, *The Early Universe* (Redwood City, CA: Addison- Wesley).
- Kormendy, J., et al., 1997, Spectroscopic evidence for a supermassive black hole in NCG 4486B, *Astrophys. J.* **482**, L139.
- Krauss L., 1986, Dark matter in the universe, *Scientific American* **255**, 58.
- Krauss L. M., M. Srednicki and F. Wilczek, 1986, Solar system constraints and signature for dark matter candidates, *Phys. Rev. D* **33**, 2079.
- Langacker P., 1981, Grand unified theories and proton decay, *Physics Reports* **72**, 186.
- Laplace P. S., 1796, *Exposition du systeme du monde* (Paris).
- Laughlin G. and F. C. Adams, 1998, The modification of planetary orbits in dense stellar clusters, *Astrophys. J. Lett.* **508**, L171.
- Laughlin G., P. Bodenheimer and F. C. Adams, 1997, The end of the main sequence, *Astrophys. J.* **482**, 420.
- Lightman A. P. and S. L. Shapiro, 1978, The dynamical evolution of globular clusters, *Rev. Mod. Phys.* **50**, 437.
- Linde A. D., 1982, A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy, and primordial monopole problems, *Phys. Lett.* **108 B**, 389.
- Linde A. D., 1983a, Chaotic inflation, *Phys. Lett.* **129 B**, 177.
- Linde A. D., 1983b, Decay of the false vacuum at finite temperature, *Nucl. Phys.* **B216**, 421.

- Linde A. D., 1986, Eternally existing self-reproducing chaotic inflationary universe, *Phys. Lett.* **175B**, 395.
- Linde A. D., 1988, Life after inflation, *Phys. Lett.* **211 B**, 29.
- Linde A. D., 1989, Life after inflation and the cosmological constant problem, *Phys. Lett.* **227 B**, 352.
- Linde A. D., 1990, *Particle Physics and Inflationary Cosmology* (New York: Harwood Academic).
- Linde A., 1994, *The self-reproducing inflationary universe*, *Scientific American* **271**, 48.
- Loh E. and E. Spillar, 1986, A measurement of the mass density of the universe, *Astrophys. J. Lett.* **307**, L1.
- Manchester R. N. and J. H. Taylor, 1977, *Pulsars* (San Francisco: W. H. Freeman).
- Marcy G. W. and R. P. Butler, 1996, A planetary companion to 70 Virginis, *Astrophys. J. Lett.* **464**, L147.
- Marcy G. W. and R. P. Butler, 1998, Detection of extrasolar giant planets, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 57.
- Mayor M. and D. Queloz, 1995, A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature* **378**, 355.
- Meyer S. S., E. S. Cheng and L. A. Page, 1991, A measurement of the large-scale cosmic microwave background anisotropy at 1.8 millimeter wavelength, *Astrophys. J. Lett.* **410**, L57.
- Mihalas D. and J. Binney, 1981, *Galactic Astronomy: Structure and Kinematics* (New York: W. H. Freeman).
- Miller G. E. and J. M. Scalo, 1979, The initial mass function and stellar birthrate in the solar neighborhood, *Astrophys. J. Suppl.* **41**, 513.
- Misner C. W., K. S. Thorne and J. A. Wheeler, 1973, *Gravitation* (San Francisco: W. H. Freeman).
- Mohapatra R. N. and R. E. Marshak, 1980, Local B-L symmetry of electroweak interactions, Majorana neutrinos, and neutron oscillations, *Phys. Rev. Lett.* **44**, 1316.
- Narayan R., D. Barret and J. E. McClintock, 1997, Advection-dominated accretion model of black hole V404 Cygni in quiescence, *Astrophys. J.* **482**, 448.
- Ohanian H. C. and R. Ruffini, 1994, *Gravitation and Spacetime* (New York: W. W. Norton).

- Oppenheimer B. R., S. R. Kulkarni, K. Matthews and T. Nakajima, 1995, The infrared spectrum of the cool brown dwarf G1229B, *Science* **270**, 1478.
- Page D. N., 1980, Particle transmutations in quantum gravity, *Phys. Lett.* **95 B**, 244.
- Page D. N. and M. R. McKee, 1981a, Matter annihilation in the late universe, *Phys. Rev. D* **24**, 1458.
- Page D. N. and M. R. McKee, 1981b. Eternity matters, *Nature* **291**, 44.
- Pais A., 1986, *Inward Bound* (Oxford: Oxford Univ. Press).
- Particle Data Group, 1998, Particle physics booklet, *European Phys. J.* **C3**, 1.
- Peebles P. J. E., 1993, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton: Princeton Univ. Press).
- Peebles P. J. E., 1994, Orbits of nearby galaxies, *Astrophys. J.* **429**, 43.
- Penzias A. A. and R. W. Wilson, 1965, A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s, *Astrophys. J.* **142**, 419.
- Perkins D., 1984, Proton decay experiments, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **34**, 1.
- Poundstone W., 1985, *The Recursive Universe* (New York: Morrow).
- Press W. H. and D. N. Spergel, 1985, Capture by the Sun of a galactic population of weakly interacting massive particles, *Astrophys. J.* **296**, 679.
- Primack J. R. and M. Sher, 1980, Photon mass at low temperature, *Nature* **288**, 680.
- Rajaraman R., 1987, *Solitons and Instantons* (Amsterdam: North-Holland).
- Rana N. C., 1991, Chemical evolution of the galaxy, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **29**, 129.
- Rees M. J., 1969, The collapse of the universe: An eschatological study, *Observatory* **89**, 193.
- Rees M. J., 1981, Our universe and others, *Quart. J. R. Astron. Soc.* **22**, 109.
- Rees M. J., 1984, Black hole models for active galactic nuclei, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **22**, 471.
- Rees M. J., 1997, *Before the Beginning: Our Universe and Others* (Reading, MA: Addison-Wesley).
- Riess A. G., W. H. Press and R. P. Kirshner, 1995, Determining the motion of the local group using type Ia supernova light curve shapes, *Astrophys. J. Lett.* **438**, L17.



- Russo J. G., L. Susskind and L. Thorlacius, 1992, End point of Hawking radiation, *Phys. Rev. D* **46**, 3444.
- Sackmann I.-J., A. I. Boothroyd and K. E. Kraemer, 1993, Our Sun III: Present and future, *Astrophys. J.* **418**, 457.
- Sakharov A. D., 1967, Violation of CP invariance, C asymmetry and baryon asymmetry of the universe, *JETP Letters* **5**, 24.
- Salpeter E. E., 1955, The luminosity function and stellar evolution, *Astrophys. J.* **121**, 161.
- Salpeter E. E. and H. M. van Horn, 1969, Nuclear reaction rates in high densities, *Astrophys. J.* **155**, 183.
- Sato K., H. Kodama, M. Sasaki and K. Maeda, 1982, Multiproduction of universes by first order phase transition of a vacuum, *Phys. Lett.* **108 B**, 103.
- Scalo J. M., 1986, The stellar initial mass function, *Fund. Cos. Phys.* **11**, 1.
- Schopf J., 1992, editor, *Major Events in the History of Life* (Boston: Jones and Bartlett).
- Schuster J., et al., 1993, Cosmic background radiation anisotropy at degree scales: Further results from the South Pole, *Astrophys. J. Lett.* **412**, L47.
- Shapiro S. L. and S. A. Teukolsky, 1983, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects* (New York: Wiley).
- Sher M., 1989, Electroweak Higgs potentials and vacuum stability, *Physics Reports* **179**, 273.
- Shu F. H., 1982, *The Physical Universe* (Mill Valley, CA: University Science Books).
- Shu F. H., F. C. Adams and S. Lizano, 1987, Star formation in molecular clouds: Observation and theory, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **25**, 23.
- Smolin L., 1997, *Life of the Cosmos* (New York: Oxford Univ. Press).
- Smoot G., et al., 1992, Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps, *Astrophys. J. Lett.* **396**, L1.
- Spooner N. J. C., 1997, editor, *The Identification of Dark Matter* (London: World Scientific).
- Steinhardt P. J. and M. S. Turner, 1984, A prescription for successful new inflation, *Phys. Rev. D* **29**, 2162.
- Stevenson D. J., 1991, The search for brown dwarfs, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **29**, 163.
- Suzuki M., 1988, Slightly massive photon, *Phys. Rev. D* **38**, 1544.

- Thorne K. S., R. H. Price and D. A. MacDonald, 1986, *Black Holes: The Membrane Paradigm* (New Haven: Yale Univ. Press).
- Thorne K. S., 1994, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (New York: Norton).
- Timmes F. X., 1996, unpublished calculations.
- Tinney C. G., 1995, editor, *The Bottom of the Main Sequence and Beyond* (Berlin: Springer).
- Tipler F. J., 1992, The ultimate fate of life in universes which undergo inflation, *Phys. Lett.* **286 B**, 36.
- Tolman R. C., 1934, *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology* (Oxford: Clarendon Press).
- Turner M. S., 1983, The end may be hastened by magnetic monopoles, *Nature* **306**, 161.
- Turner M. S. and F. Wilczek, 1982, Is our vacuum metastable? *Nature* **298**, 633.
- Turok N., 1997, editor, *Critical Dialogues in Cosmology* (Singapore: World Scientific).
- Vilenkin A., 1983, Birth of inflationary universes, *Phys. Rev. D* **27**, 2848.
- Visser M., 1995, *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (Woodbury, NY: AIP Press).
- Voloshin M. B., I. Yu. Kobzarev and L. B. Okun, 1975, Bubbles in metastable vacuum, *Sov. J. Nucl. Phys.* **20**, 644.
- Wagoner R., 1973, Big bang nucleosynthesis revisited, *Astrophys. J.* **179**, 343.
- Wald R. M., 1984, *General Relativity* (Chicago: Univ. Chicago Press).
- Wald R. M., 1994, *Quantum Field Theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics* (Chicago: Univ. Chicago Press).
- Walker T. P., G. Steigman, D. N. Schramm, K. A. Olive and H.-S. Kang, 1991, Primordial nucleosynthesis redux, *Astrophys. J.* **376**, 51.
- Weinberg M. D., 1989, Self-gravitating response of a spherical galaxy to sinking satellites, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **239**, 549.
- Weinberg S., 1972, *Gravitation and Cosmology* (New York: Wiley).
- Weinberg S., 1977, *The First Three Minutes* (New York: Basic).
- Weinberg S., 1978, A new light boson? *Phys. Rev. Lett.* **40**, 223.
- Weinberg S., 1980, Varieties of baryon and lepton nonconservation, *Phys. Rev. D* **22**, 1694.

- Weinberg S., 1989, The cosmological constant problem, *Rev. Mod. Phys.* **61**, 1.
- Weinberg S., 1995, *Quantum Theory of Fields* (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- Wilczek F. and A. Zee, 1979, Conservation or violation of B-L in proton decay, *Phys. Lett.* **88 B**, 311.
- Wood M. A., 1992, Constraints on the age and evolution of the galaxy from the white dwarf luminosity function, *Astrophys. J.* **386**, 539.
- Wright E. L., et al., 1992, Interpretation of the cosmic microwave background radiation anisotropy detected by the COBE differential microwave radiometer, *Astrophys. J. Lett.* **396**, L13.
- Zel'dovich Ya. B., 1976, A new type of radioactive decay: Gravitational annihilation of baryons, *Phys. Lett.* **59 A**, 254.
- Zuckerman B. and M. A. Malkan, 1996, editors, *The Origin and Evolution of the Universe* (Sudbury, MA: Jones and Bartlett).

## Ключевые события в биографии Вселенной

СОБЫТИЕ	ДЕКАДА <sup>2</sup>
<b>Первичная эпоха</b>	
Большой взрыв	$-\infty$
Вселенной правит квантовая гравитация (эпоха Планка)	-50,5
Великое объединение трех фундаментальных сил	-44,5
Кварки связываются в адроны	-12,5
Первое образование элементов (нуклеосинтез)	-6
Энергия вещества доминирует над излучением	4
Электроны и протоны образуют атомы (рекомбинация)	5,5
<b>Эпоха звезд</b>	
Первые звезды	6
Образование Млечного Пути	9
Образование нашей Солнечной системы	9,5
Сегодня	10
Наше Солнце умирает	10,2
Столкновение нашей Галактики с Андромедой	10,2
Гибель самых маленьких звезд	13
Конец образования обычных звезд	14
<b>Эпоха распада</b>	
Планеты отделяются от звезд	15
Коричневые карлики сталкиваются и образуют звезды	16
Звезды испаряются из нашей Галактики	19
Частицы темной материи аннигилируют в гало Галактики	22,5
Звездные орбиты рассеиваются из-за гравитационного излучения	24
Белые карлики истощают запасы темной материи в гало галактик	25
Черные дыры поглощают звезды	30
Протоны распадаются	37
Нейтронные звезды теряют массу и переживают мощное преобразование	38
Планеты и белые карлики разрушаются из-за распада протонов	38–39

<b>Эпоха черных дыр</b>	
Аксионы распадаются на фотоны	42
Молекулы водорода участвуют в реакциях холодного синтеза	60
Испаряются звездные черные дыры	65–67
Испаряются черные дыры с массой миллиона Солнц	83
В плоской Вселенной образуется позитроний	85
Исчезают самые большие сверхмассивные черные дыры	98
<b>Эпоха вечной тьмы</b>	
Испаряются черные дыры с массой современной видимой Вселенной	131
В плоской Вселенной распадается позитроний	141
Происходят процессы протонного распада более высокого порядка	100–200
Космологический фазовый переход преобразует Вселенную	10–1000

# Предметный указатель

- «De Revolutionibus Orbium Coelestium»  
(Коперник) 30  
*Reviews of Modern Physics* 7
- Абсолютно черные тела 49–50  
Австралия 94  
Адроны 55, 207  
Азот жидкий 125, 126  
— конденсация 83  
Аккреционные диски 156–159  
Аксионы 140  
Активные ядра галактик 25  
Альфа Центавра 69–70  
Амебы 94  
Антибарионы 54  
Антивещество 24, 130, 132–133  
— антикварки 35–36, 51–55  
— антипротоны 53, 180  
Антикварки 35–36, 51–55  
Антинейтрино 88, 131  
Антинуклеосинтез 222  
Антипротоны 53, 180  
Астероиды 16  
— внеземная жизнь 96, 98–99  
— столкновения с планетами 16, 118  
Атомы 140, 169, 200, 221–222, *см. также* Квантовая механика  
— в первичную эпоху 35, 50–51  
— малые размеры 17–18  
— образование Галактики и 64  
— разрушение ядра 222
- Бариогенез 54–55  
Барионное вещество 24, 26, 57–59, 119, 122–123, 130, 180, 187, 191, 199  
Барионное число 54, 55, 130, 132–134
- Барионы 54, 58–59  
Белые карлики 13, 26, 73, 91, 122–129, 215  
— в расширяющихся красных гигантах 78–79  
— в эпоху распада 105–107, 109–112, 119, 122–129, 191, 212  
— во взрывах сверхновой 26  
— как звездные остатки 15, 25, 105–107, 109–111, 123–125  
— кривизна и 151  
— описание 109–111  
— распад протона в *см.* Распад протона  
— светимость 124, 134  
— состав 84, 119  
— столкновения 121–122  
— темная материя в *см.* Темная материя  
— формы жизни в атмосферах 125–128  
— формы жизни вне атмосфер 128–129  
Белый шум 49  
Бесконечность со знаком «минус» 23  
Большое сжатие 8, 13, 194, 206, 216–223  
Бруно, Джордано 30–31
- Великое объединение 39, 132, 223  
Венера 11, 63, 69, 100  
Вентили 170–174  
Вентили И 170–174  
Вентили ИЛИ 170–172  
Вентили HE 170–174  
Вечная инфляция 228–229  
Вечная сложность 227–229  
Вечная смерть 198

- Вещество антивещество 24, 35–36, 51–55, 132–133, 180
- барионное 24, 26, 57–59, 119, 122–123, 130, 180, 187, 191, 199
  - обычное 35, 54, 57–59, 122–123
- Вильсон, Роберт 49
- Виртуальные частицы 38, 163–164
- Вирусы 93, 122
- Внеземная жизнь 53, 92–102, 121, 122, 231
- Вода водород и 226
- жидкая 28, 100–101, 121, 126, 220, 221
- Водород 57, 222
- в барионном веществе 187
  - в ядре Солнца 63
  - вода и 226
  - гелий и 25, 72–80, 84, 86, 87, 92, 121, 122, 226
  - горение 25, 72–80, 84, 86, 87, 92, 121–122, 226
  - доступ красных карликов к 90
  - камень из 135
  - лед из 135–138, 180
  - образование Галактики и 64
  - появление нейтрального 24
  - синтез 92, 108–109, 119, 121
  - ядерный синтез и 56, 92, 108–109, 119, 121
- Временной принцип Коперника 29–33, 198, 233
- Вселенная альтернативная 168–169
- видимая 69–71, 74
  - возраст 8, 22–23
  - война энтропии и гравитации и 18–20, 88, 107, 111, 133, 136, 178, 192–193, 197, 213–214
  - временные эпохи в эволюции 23–27, *см. также* названия конкретных эпох
  - дарвиновский взгляд на 229–231
  - другие вселенные 21, 207–211, 228, 230, 231
  - замкнутая 43, 46–48, 165, 194, 215–216
  - инфляционная 36–48, 208, 212, 215–218, 228–229
  - как изотропная 31, 46, 47, 50, 218
  - как однородная 31, 46, 47, 50, 218
  - как термин 21
  - крупномасштабная структура 13, 16–17
  - масса 18, 59–60
  - образование вселенных-детей 207–211, 230, 231
  - общая масса 18, 59–60
  - открытая 43, 46–48, 165, 182–183, 189, 195, 215–216
  - переживающая повторное сжатие 8, 13, 194, 206, 216–223
  - плоская 43–44, 47–48, 148–150, 165, 181, 182, 189, 190, 194–195, 208, 209, 215–217
  - процесс туннелирования и 133–134, 198–207, 214–215
  - пустота 14, 69–70
  - размер 13, 16–17
  - расширение 7, 8, 13, 14, 34–36, 44–48, 182–183, 190, 193–194, 215–218
  - современная видимая 69–71, 74
  - температура 164–165, 220–222, 226
  - теория Большого взрыва в происхождении *см.* Теория Большого взрыва
  - тепловая смерть и 186, 191–195
  - тонкая настройка 223–227
  - фазовые переходы в 184, 198–207, 211, 222–223
- Вселенные-дети 207–211, 230, 231
- Вторая космическая скорость 48, 113, 141–142
- Входящие потоки 172–174
- Выходные потоки 172–174
- Галактика Андромеда 70, 115–116
- Галактики *см. также* Млечный Путь
- Андромеда 70, 115–116
  - вероятность жизни 129

- гало 122–126, 154, 177, 180, 187, 191
- долговечность 118
- конец образования звезд в 102–104
- межзвездная среда 14–15, 86–89, 92, 102–104, 119, 226
- начальное образование 24–25, 64–65, 72, 114, 224, 225, 230–231
- пустота 14, 69–70, 115
- размер 13
- релаксация 116–118, 182
- скопления и 13–14, 60, 114–116, 129, 177, 187, 219
- столкновения 114–116
- тонкая настройка 224, 225
- удаляющиеся 44
- число звездных остатков в 125
- Галактические черные дыры 143, 144
- Гало галактик 122–126, 154, 177, 180, 187, 191
- Гало, галактическое 122–126, 154, 177, 180, 187, 191
- Гамма-лучи 127, 134, 180
- Гейзенберг, Вернер 37–40
- Гелиевая вспышка 79–80
- Гелий 23–25, 36, 55–59, 126, 222, 223
  - образование Галактики и 64
  - образование в Солнце 90, 91
  - превращение в углерод 79
  - превращение водорода в 25, 72–80, 84, 86, 87, 92, 121–122, 226
- Герцшпрунг, Эйнар 73–74
- Гипотеза Дайсона о соответствии масштабов 28–29, 127–128, 177–178, 205
- Главная последовательность 73–74
- Глобальное потепление 77
- Голубое смещение 219
- Голубые карлики 91
- Голубые сверхгиганты 159
- Горизонты событий 129, 143, 153, 166–169, 179, 180, 210
- Горячая темная материя 60
- Гравитационное излучение 129–130, 159–162
  - Гравитационный потенциал 172
  - Гравитация 16–17, 43, 193, 223
    - в образовании Галактики 13, 64–65, 114, 224, 225
    - война с энтропией 18–20, 88, 107, 111, 133, 136, 178, 192–193, 197, 213–214
    - вторая космическая скорость и 48, 113, 141–142
    - гравитационное излучение 129–130, 159–162
    - квантовая 21, 162
    - распад протона и 133
    - растяжение времени и 145–148
    - слабость 17
    - темная материя и 60
    - ускорение и 145–148
    - фазовые переходы и 205–206
    - черные дыры и 88, 141–142, 145–148, 159–162, 166, 179
  - Гравитоны в сверхмассивных черных дырах 162–163, 179
  - Гус, Алан 37
  - Давление вырожденного газа 121, 226
    - на нейтроны 112
    - на электроны 111
    - черные дыры и 113
  - Дайсон, Фримен 7, 28–29, 127–128, 177–178
  - Датирование по радиоактивным изотопам 75
  - Двоичные числа 171–172, 175
  - Двойные звезды 84, 85, 113
  - Двойные пульсары 161–162
  - Девы, созвездие 74
  - Дейтерий 55–58
  - Дейтроны 56
  - Деление 57
  - Денеб 92–93
  - Диаграмма Герцшпрунга–Рессела 73–74
  - Диаграммы вложения 151–152, 160, 207–210
  - Динамическая релаксация 116–118



- Динамическое трение 177  
 Дипротоны 225–226  
 Длина Планка 21  
 Дэвис, Пол 198
- Евклидова геометрия 151  
 Европа 96–97
- Железо 57  
 — коллапс железного ядра 107, 112, 138, 155, 222  
 — нуклеосинтез 64, 86–89  
 — стабильность 214–215
- Законы физики 8–9, 205, 224–225, *см. также* Великое объединение; квантовая механика; термодинамика  
 — материя против антиматерии в 54  
 — общая теория относительности 20, 21, 39–40, 44–46, 48, 90, 111, 142, 146, 151, 161, 162, 166–168, 207–208  
 — пределы 20–21, 223  
 — природа 20  
 — причинность и 20–21, 169, 210–211, 229  
 — сохранение заряда 181, 186–187
- Замкнутая Вселенная 43, 46–48, 165, 194, 215–216
- Затмение, солнечное 62, 63
- Звезда Барнарда 74
- Звездные ветры 102–104
- Звездные остатки 15, 16, 106–114, 125  
 — белые карлики 15, 25, 105–107, 109–111, 123–125  
 — конечная судьба 134–138  
 — коричневые карлики 15, 25, 26, 106–109  
 — нейтронные звезды 15, 25, 26, 88, 106–107  
 — черные дыры 15, 25, 88, 106–107, 143–144, 154–155
- Звездные черные дыры 143–144, 154–156, 165–166, 178, 191
- Звезды *см. также* конкретные типы звезд; статьи, начинающиеся со слова «звездный»  
 — война между энтропией и гравитацией и 18–20, 88, 107, 111, 133, 136, 178, 192–193, 197, 213–214  
 — двойные 84, 85, 113  
 — массивные 72–75, 84–89, 107, 111, 113–114  
 — межзвездное сообщение 97–98, 101–102, 232  
 — межзвездные путешествия 99–102, 217  
 — образование 24, 65–69, 102–104, 115, 119, 121–122  
 — плотность 226–227  
 — прекращения образования 102  
 — пригодные для жизни 95–97  
 — протозвезды 67–68  
 — размер 15  
 — разрушение 220–221  
 — с низкой массой 7, 72–75, 89–92  
 — с планетарными системами 7, 15, 31, 95–96  
 — сжатие в черные дыры 167  
 — сжигающие гелий 121–122  
 — случайные столкновения 80–84, 116, 226–227  
 — темнота ночного неба и 52–53  
 — тонкая настройка 223, 225–226  
 — число в нашей Галактике 22, 70, 95
- Звезды с низкой массой 7, 72, 75, 89, 92
- Земля 15  
 — будущее 11, 27–29, 63–64, 75–80, 118  
 — возникновение жизни на 93–96, 227  
 — возраст 93, 95  
 — история жизни на 93–98, 250  
 — кривизна, создаваемая массой 151–153  
 — парниковый эффект и 77, 80  
 — революция Коперника и 30, 31, 46

- смещение с современной орбиты 80–84
- столкновение черной дыры с 156–159
- темнота ночного неба и 52–53
- Золото 87, 88
- Излучение Хокинга 8, 26–27, 162–167, 176, 178, 181, 182, 188, 210–211
- Излучение, фоновое *см.* Космическое фоновое излучение
- Изотропная Вселенная 31, 46, 47, 50, 218
- Индукторы 176
- Инквизиция 31
- «Инфляционная Вселенная» (Гус) 37
- Инфляционная Вселенная 36–48, 208, 212, 215–218
- вечная 228–229
- плотность энергии вакуума и 37–40, 198–199, 202–203, 205–207
- проблема горизонта и 40–42
- проблема плоскостности и 43–44
- Инфракрасное излучение 67, 125
- Ислам, Джамал 7
- Испарение звезд 118, 129–130, 164–166, 174
- Кальций 223
- Кант, Иммануил 31
- Квazarы 25, 144
- Квантовая гравитация 21, 162
- Квантовая механика 21
- давление вырожденного газа 111–113, 121, 226
- излучение черных дыр и 162, 168
- принцип неопределенности Гейзенберга 37–40, 113, 135, 163, 215
- туннелирование в 133–134, 198–207, 214–215
- Кварки 35–36, 51–55, 133, 207, 222–223
- Кембрийский взрыв 94–95
- Кеплер, Иоганн 52
- Кинетический момент 65
- Кислород 86, 223, 225
- в белых карликах 84, 126
- как основа жизни 15, 36, 56, 121, 126
- нуклеосинтез 64
- сгущение 83
- Классическая система 48, 201
- Классическая тепловая смерть 192–194
- Клетки эукариотов 93–94, 250
- Колонизация Галактики 98–102
- межзвездные путешествия и 99–102, 217
- направленный подход к 99–102
- процесс случайного блуждания в 99, 100
- Кометы 16
- внеземная жизнь и 93, 99
- облако Оорта 156–157
- столкновения с планетами 16, 118, 156–157
- Компьютерная модель черных дыр 170–176
- Конвекция, красными карликами 89–92
- Конденсаторы 176, 177
- Конт, Огюст 101
- Контрольная строка 173
- Коперник, Николай 30, 31, 46
- Коричневые карлики 7, 72–75, 221
- в эпоху распада 106–109, 112, 119–121, 212
- как звездные остатки 15, 25, 26, 106–109
- описание 108–109
- столкновения 119–121, 125
- Космический телескоп Хабблa 44, 46
- Космическое фоновое излучение 35–37, 66, 189–192
- Большой взрыв и 35–37, 40, 41, 48–51, 56–57, 66, 190
- в первичную эпоху 35–37, 40, 41, 48–51, 164–165
- в эпоху вечной тьмы 185, 189–191, 193–194
- рекомбинация и 25, 50–51

- температура 35, 49–51, 56–57, 220–222, 226
- Космологическая тепловая смерть 194–195
- Космологические декады 8, 21–23, 27
- Космологический принцип 31, 46, 50, 218
- Красное смещение 190
- Красные гиганты, Солнце как 11, 78–80, 91, 109–110
- Красные карлики 13, 25, 73, 74, 98
  - Проксима Центавра 69–70, 89–90, 219
  - как белые карлики 109
  - конвекция 89–92
  - светимость 89–92
  - случайные столкновения с 80–84
- Кремний, нуклеосинтез 64, 65
- Кривизна в двумерном пространстве 150–151
  - в трехмерном пространстве 151–153
  - масса Земли и 151–153
  - отрицательная 148–149
  - положительная 148, 149, 151
  - приливные силы и 153–154, 159
  - черные дыры и 148–154, 160, 169
- Крупномасштабная структура Вселенной 13
  - гравитация и 16–17
  - электромагнитная сила и 16–17
- Лаборатории корпорации «Белл» 49
- Лаплас, Пьер Симон 31
- Лебедь  $X_{-1}$  (черная дыра) 144, 159
- Лебедь (созвездие) 92–93
- Линде, Андрей 228–229
- Литий 23–24, 55–58, 222
- Луна, посадки NASA на 51, 141
- Луны 16
  
- Магний 86
- Майор, Мишель 31
- Марс 41, 78, 100
  - метеориты 96–97
  - посадка NASA на 51
- Марси, Джеф 31
- Масса Вселенной 18, 59–60
  - Солнца 72, 91
  - белых карликов 110–111
  - дефицит 90
  - массивных звезд 72–75, 84–89, 107, 111, 113–114
  - низкомассивных звезд 7, 72–75, 89–92
- Масса Чандрасекара 111, 121, 122
- Масштаб Планка 223
- Межзвездная среда 14–15, 226
  - образование звезд и 119
  - сверхновые и 86–89, 102
  - тяжелые элементы в 88, 92
- Межзвездное сообщение 97–98, 101–102, 232
- Межзвездные путешествия 99–102, 217
- Меркурий 11, 69
- Метастабильное состояние 202
- Метеориты внеземная жизнь и 93, 99
  - датирование по радиоактивным изотопам 75
  - марсианские 96–97
- Микроволновое фоновое излучение *см.* Космическое фоновое излучение
- Млечный Путь 13–15, 25–26, 44, 119
  - колонизация 98–102
  - обитаемые планеты в 97
  - предсказанное столкновение с Андромедой 115–116
  - число звезд в 22, 70, 114
- Многочлеточные организмы 94, 95, 97
- Мультиверс 227–229
- Мутации 230, 231
  
- Наследственность 230
- Натрий 86
- Научный метод 232
- Начальная функция масс 74–75
- Нейтрино 140
  - антинейтрино 131
  - в нейтрино-антинейтринных парах 88

- в черных дырах 162–163, 179, 191
- в эпоху вечной тьмы 27, 187
- производство 86
- Нейтрон(ы) 87–88
  - в барионном веществе 122, 123, 130
  - в первичную эпоху 35, 36, 51, 53–57, 59
  - взаимодействие с электронами и протонами 139, 169–170, 180, 222–223
  - давление вырожденного газа на 112
  - распад 17–18, 130–131, 135, 186
  - сильное ядерное взаимодействие и 17
  - создание 207
- Нейтронные звезды в эпоху распада 106–107, 111–113, 212
  - двойные пульсары 161–162
  - как звездные остатки 15, 25, 26, 88, 106–107
  - кривизна и 151, 152
  - планеты земного типа, вращающиеся по орбите 95–97
  - распад протона и 138
- Неон 86
- Нептун 96, 118, 157, 158
- Нуклеосинтез 15, 17–18, 23–24, 55–59, 64, 169–170, 222
- Облако Оорта 156–157
- Образование зародыша (вселенной) 207–211
- Обратимость времени 55
- Обсерватория Южно-Африканской республики 89
- Общая относительность 20, 21, 39–40, 44–46, 48, 90, 111, 142, 146, 151, 161, 162, 166–168, 207–208
  - пространственно-временные туннели и 208–210
  - эволюционная перспектива и 230
- Одноклеточные организмы 93–95, 97, 122, 148
- Однородная Вселенная 31, 46, 47, 50, 218
  - Ольберс, Г. В. М. 52
  - Основное состояние 200
  - Островная Вселенная 14
  - Осцилляторы 176–177
  - Открытая Вселенная 43, 46–48, 165, 182–183, 189, 195, 215–216
  - Относительность *см.* Общая теория относительности
  - Отрицательная кривизна 148–149
  - Отрицательное давление 40
  - Панспермия 96
  - Парадокс Ольберса 52, 53, 221
  - Парниковый эффект 77, 80
  - Пензиас, Арно 49
  - Пенроуз, Роджер 168
  - Первичная эпоха 23–24, 27, 33–61, 181, 212, *см. также* Теория Большого взрыва
    - антивещество и 35–36
    - антикварки и 35–36, 51–56
    - инфляционная Вселенная в 36–48
    - кварки и 35–36, 51–55
    - космическое фоновое излучение и 35–37, 40, 41, 48–51, 164–165
    - нейтроны в 35, 36, 51, 53–57, 59
    - нуклеосинтез в 55–59, 222
    - протоны в 35, 36, 51, 53–57, 59
    - расширение Вселенной и 34–36, 44–48
    - темная материя и 59–61
    - фотоны в 36, 41
  - Первичные черные дыры 144–145
  - Пионы 131, 134
  - Планета(ы) *см. также* названия конкретных планет
    - вращение по орбитам других звезд 7, 15, 31, 95–96
    - долгосрочные перспективы для 118, 136–138
    - земного типа 95–97
    - образование новых 119–121
    - размер 15–16
    - разрушение 221–222
    - распад протона и 136–138

- смещение с орбит 118
- столкновения коричневых карликов с 119–121
- столкновения с 16, 118, 156–157
- тонкая настройка 223, 226–227
- формы жизни на других 53, 92–102, 121, 122, 231
- Планетарные туманности 84
- Планетезимали 93
- Плоская Вселенная 43–44, 47–48, 208, 209, 215–217
  - черные дыры и 148–150, 165, 181, 182
  - эпоха вечной тьмы и 189, 190, 194–195
- Плотность энергии 113
- Плотность энергии вакуума 37–40, 198–199, 202–203, 205–207
- Плутон 69, 81–83, 157, 220
- Позитрон(ы) 27, 88, 130–131, 133, 134, 140, 186–189, 195, 197
- Позитроний 27, 195–197
- Положительная кривизна 148, 149, 151
- Постоянная Планка 38
- Представление, экспоненциальное 7–8, 21–22
- Приливные силы 153–154, 156, 159, 164
- Приливные хвосты 114–115
- Принцип неопределенности 37–40, 113, 135, 163, 215
- Принцип неопределенности Гейзенберга 37–40, 113, 135, 163, 215
- Принцип эквивалентности 146–147
- Причинная связность 40–42
- Причинность 20–21, 169, 210–211, 230
- Проблема горизонта 40–42
- Проблема космологической постоянной 199, 203, 205, 206
- Проблема плоскостности 43–44
- Проксима Центавра 69–70, 89–90, 219
- Пространственно-временные туннели 208–210
- Протозвезды 67–68
- Протон(ы) 87–88
  - в барионном веществе 122–123, 130, 187
  - в первичную эпоху 35, 36, 51, 53–57, 59
  - взаимодействие с электронами и нейтронами 139, 169–170, 180, 222–223
  - время жизни 134, 180
  - дипротоны 225–226
  - образование 188, 207
  - общее число 22
  - распад см. Распад протона
  - растяжение времени и 148
  - сильное ядерное взаимодействие и 17, 225–226
- Процесс свободного блуждания 99, 100
- Процион 94
- Пульсары, двойные 161–162
- Путешествие, межзвездное 99–102, 217
- Равновесие, тепловое 64
- Радиоактивность 17–18
- Радиопередатчики 49, 160
- Радиус Шварцшильда 142–144, 153–156
- Развитие технологии 93, 95, 97–98
- Размер горизонта 20–21
- Размер космологического горизонта 20–21, 217
- Размеры крупномасштабная структура Вселенной 13, 16–17
  - микроскопические 17–18, 195–196
  - обзор 12–16
  - пределы физики и 20–21
- Разумная жизнь 97–102, 224
- Распад протона 7–8, 16–18, 26–28, 155, 165, 177
  - белые карлики и 134–136
  - в эпоху вечной тьмы 185–187, 191
  - в эпоху распада 130–138
  - время, необходимое для 131–132
  - нейтронные звезды и 136–138
  - обнаружение 132
  - планеты и 136–138
  - предсказание 132–133

- Рассеивание 174–175, 177  
 Растяжение времени 145–148  
 Расширение по закону Хаббла 44–46, 53, 219  
 Революция Коперника 30, 31, 46, 229  
 Резисторы 176, 177  
 Рекомбинация 24, 50–51  
 Рессел, Генри Норрис 73–74  
 Рис, Мартин 7, 218
- Самогравитирующие механизмы 176–177  
 Сатурн 15, 96, 157, 158, 221  
 Сверхгиганты 159  
 Сверхмассивные черные дыры 114, 117–118, 129, 143, 144, 154–155, 159, 162–163, 179  
 Сверхновые 13, 25–26, 36, 86–89, 102–104, 115, 143–144, 181  
 — давление вырожденного газа и 111, 112, 121  
 — остатки *см.* Звездные остатки  
 Свет, скорость 41, 111, 113, 205  
 Светимость Солнца 76–78, 127  
 — звезд, сжигающих гелий 121–122  
 — красных карликов 89–92  
 — распад протона в белых карликах 134  
 — темная материя в белых карликах 124–125, 128  
 Свинец 88  
 Сера, нуклеосинтез 86  
 Серебро 87  
 Силы природы 16–17  
 — великое объединение 39, 132, 223  
 — гравитация *см.* гравитация  
 — распад протона и 132–133  
 — сильное ядерное взаимодействие 17, 39, 60, 132, 223, 225–226  
 — слабое ядерное взаимодействие 17–18, 39, 60, 124, 132, 207, 222–223, 226  
 — электромагнитная сила 16–17, 39, 56, 60, 123, 132, 160, 207, 214, 222–223
- Сильное ядерное взаимодействие 17, 39, 60, 132, 223, 225–226  
 Сингулярность 168–169, 210, 229–231  
 Синтез 17–18, 55–56, 75–76, 84, 86, 87, 225  
 — Солнце и 15  
 — в красных карликах 89  
 — водорода 56, 92, 108–109, 119, 121  
 — гелия 121–122  
 — коллапс железного ядра и 107, 112, 138, 155, 222  
 — углерода 79, 122  
 — холодный 135, 214–215  
 Синтез углерода 79, 86, 122  
 Скалярные поля 39  
 Скопления галактик 13–14, 60, 114–116, 129, 177, 187, 219  
 Слабо взаимодействующие массивные частицы 123  
 Слабое ядерное взаимодействие 17–18, 39, 60, 124, 132, 207, 222–223, 226  
 Слифер, Весто 44  
 Сложность в эпоху вечной тьмы 206  
 — в эпоху черных дыр 169–177  
 — вечная 227–229  
 — живых существ 93–95, 97–98, 178–179, 206  
 Случайные столкновения 80–84, 116, 226–227  
 Смолин, Ли 230  
 Созвездие Орла 65, 66  
 Сознание, более медленные скорости 29, 178–179  
 Солнечные системы 16, 118  
 — долгосрочная стабильность 226–227  
 — столкновения черных дыр с 156–159  
 Солнечный ветер 78  
 Солнце биологическая эволюция и 226  
 — будущее 11, 27–28, 63–64, 75–80  
 — война энтропии и гравитации и 18–20  
 — время жизни 63–64  
 — затмение 62, 63

- как красный гигант 11, 78–80, 91, 109–110
- кривизна и 151
- светимость 76–78, 127
- синтез в 15
- солнечная масса 72, 91
- спектр абсолютно черного тела и 49
- темнота ночного неба и 52–53
- Сообщение, межзвездное 97–98, 101–102, 232
- Сохранение заряда 181, 186–187
- Слика 74
- Спиральная волна плотности 202
- Спутник COBE 49–50
- Столкновения звезд 14, 119–122
- Столкновения, случайные 80–84, 116, 226–227
- Схемы LRC 176
  
- Тейлор, Джо 161
- Темная барионная материя 59
- Темная материя 26
  - аннигиляция 122–125, 127, 131, 165, 185–188, 191, 197–199, 212
  - природа 59–60
  - светимость 128
  - холодная 60
  - электромагнитная сила и 60, 123
- Теория Большого взрыва 7–9, 13, 23, 34–36, 207, 218, 222, 229
  - инфляционная Вселенная и 36–48
  - космическое фоновое излучение и 35–37, 40, 41, 48–51, 56–57, 66, 190
- Тепловая смерть 186, 191–195
  - классическая 192–194
  - космологическая 194–195
- Тепловое равновесие 64
- Термодинамика 53, 107, 133, 136, 166, 191–195, 213–214
- Тройные звезды 84
- Туннелирование 133–134, 198–211, 214–215
  
- Углекислый газ 77
- Углерод 135, 223, 225
  - в белых карликах 84, 126
  - горение 86
  - как основа жизни 15, 29, 36, 56, 121, 126, 177, 212, 222
  - превращение гелия в 79
  - Уран (планета) 96, 157, 158
  - Уран (химический элемент) 57, 83, 88, 214
  - Ускорение, гравитация и 145–148
  - Ускорители частиц 39, 132
  
  - Фазовые переходы 184, 198–207, 211, 222–223
  - Фауна Эдиакары 94, 97
  - Физические законы *см.* Законы физики
  - Фоновое излучение *см.* Космическое фоновое излучение
  - Формы жизни Солнце и 226
    - абстрактные 28–29, 125–128, 169–170, 177–179
    - в атмосферах белых карликов 125–128
    - в экосистеме, окружающей гидротермальные источники 83
    - в эпоху черных дыр 177–179
    - вне атмосфер белых карликов 128–129
    - выживание 27–29, 126–128, 224–225
    - глобальное потепление и 77
    - кислород и 15, 36, 56, 121, 126
    - колонизация Галактики и 98–102, 217
    - многоклеточные организмы 94, 95, 97
    - на других планетах 53, 92–102, 121, 122, 231
    - одноклеточные организмы 93–95, 97, 122
    - парниковый эффект и 77, 80
    - появление на Земле 93–96, 227, 250
    - разумные 97–102, 224
    - сложность 93–95, 97–98, 178–179, 206
    - углерод и 15, 29, 36, 56, 121, 126, 177, 212, 222

- фазовые переходы и 205
- Фотодиссоциация 87–88
- Фотоны 221–222
  - аннигиляция темной материи и 127, 131
  - в первичную эпоху 36, 41
  - в полях фонового излучения 189–192
  - в черных дырах 141, 162–163, 179, 191
  - в электрон-позитронных парах 88
  - в эпоху вечной тьмы 27, 187, 190
  - инфракрасные 125
  - образование Галактики и 64
- Хаббл, Эдвин 44, 53
- Халс, Рассел 161
- Хойл, Фред 96
- Хокинг, Стивен 162
- Холодная темная материя 60
- Холодный синтез 135, 214–215
- Центавра 89, 208–210
- Центральные области молекулярных облаков 65–68
- Чандрасекар, Ш. 111
- Частицы излучения 190
- Черные дыры 7, 229, 234
  - будущего 167–169
  - в эпоху распада 106–107, 113–114, 129–130, 140, 155–156, 212
  - внутренние области 166–169
  - горизонты событий 129, 143, 153, 166–169, 179, 180, 210
  - гравитация и 88, 141–142, 145–148, 159–162, 166, 179
  - звездные 143–144, 154–156, 165–166, 178, 191
  - излучение Хокинга и 8, 26–27, 162–167, 176, 178, 181, 182, 188, 210–211
  - испарение 8, 26–27, 162–167, 174, 176, 178–182, 188, 191
  - как звездные остатки 15, 25, 88, 106–107, 143–144, 154–155
  - как составляющие компьютера 170–176
  - кривизна и 148–154, 160, 169
  - массивные звезды и 113–114
  - микроскопические 133
  - нейтрино в 162–163, 179, 191
  - образование галактик и 24–25, 72
  - определение 141–143
  - первичные 144–145
  - плоская Вселенная и 148–150, 165, 181, 184
  - последние мгновения 179–183
  - приливные силы и 153–154, 156, 164
  - радиус Шварцшильда 142–144, 153–156
  - распад 162–166
  - растяжение времени и 145–148
  - рост 129–130, 155–156
  - сверхмассивные 114, 117–118, 129, 143, 144, 154–155, 159, 162–163, 179
  - свойства 166
  - сингулярность и 168–169, 210, 229–231
  - столкновение с Землей 156–159
  - схемотехника 176–177
  - температура поверхности 164–165, 178, 179, 188
  - типы 143–145
  - фотоны в 141, 162–163, 179, 191
- Числа барионные 54, 55, 130, 132–134
  - двоичные 171–172, 175
  - экспоненциальное представление и 7–10, 21–22
- Чистая теория 168
- Шварцшильд, Карл 142
- Эволюция биологическая 226
  - вселенных 229–231
- Эйлер, Леонард 31
- Эйнштейн, Альберт 20, 39–40, 44–46, 53, 56, 90, 111, 113, 142, 146, 148, 153, 168
- Экзотермическая ядерная реакция 86



- Экосистемы, окружающие гидротермальные источники 83
- Экспоненциальное представление 7–8, 21–22
- Электромагнитная сила 16–17, 39, 56, 60, 123, 132, 160, 207, 214, 222–223
- Электромагнитное излучение 49–51
  - гамма-лучи 127, 134, 180
  - инфракрасное 67, 125
  - радио 49, 160
- Электрон(ы) 221–222
  - в первичную эпоху 35, 50–51
  - в радиопередатчиках 160
  - в электрон-позитронных парах 88, 130–131, 140, 186–189
  - в эпоху вечной тьмы 27, 189, 195, 197, 200–202
  - взаимодействие с протонами и нейтронами 139, 169–170, 180, 222–223
  - волновые свойства 21
  - вырожденные 78–79
  - давление вырожденного газа на 111
  - как элементарные частицы 186–189
  - образование Галактики и 64
  - распад нейтронов и 17–18, 130–131, 135, 186
- Элементарные частицы 27, 185–189, 195, 200–202
- Элементы *см. также* Особые элементы
  - нуклеосинтез 15, 17–18, 23–24, 55–59, 64, 86–89
  - тяжелые, в межзвездной среде 88, 92
- Энергетические барьеры 200–202, 214, 215
- Энергия массы покоя 56, 134
- Энтропия война с гравитацией 18–20, 88, 107, 111, 133, 136, 178, 192–193, 197, 213–214
  - тепловая смерть и 192–195
- Эпоха вечной тьмы 27, 183–211
  - аннигиляция темной материи 122–125, 165, 185–188, 191, 197–199, 212
  - космическое фоновое излучение и 185, 189–191, 193–194
  - нейтрино в 27, 187
  - плоская Вселенная и 189, 190, 194–195
  - позитроний в 27, 195–197
  - процессы туннелирования в 198–207
  - распад протона и 185–187, 191
  - создание новых вселенных и 207–211, 230, 231
  - тепловая смерть и 186, 191–195
  - фазовые переходы и 184, 198–207
  - элементарные частицы и 27, 185–190, 195, 200–202
- Эпоха господства излучения 23–24, 248
- Эпоха звезд 24–25, 61–104, 109, 114, 155–156, 181–182, 212
  - будущее Солнца и 11, 17–28, 63–64, 75–80
  - видимая Вселенная и 74
  - взвешиваемая жизнь и 92–102
  - звезды с низкой массой и 7, 72–75, 89–92
  - массивные звезды и 72–75, 84–89
  - образование Галактики и 24, 64–65
  - образование звезд и 24, 65–69, 102–104
  - случайные столкновения и 80–84
- Эпоха распада 25–26, 72, 104–138, 180, 182
  - аннигиляция темной материи в 122–125, 212
  - белые карлики в 105–107, 109–112, 119, 122–129, 191, 212
  - коричневые карлики в 106–109, 112, 119–121, 212
  - нейтронные звезды в 106–107, 111–113, 212
  - распад протона в 130–138
  - релаксация Галактики в 116–118
  - столкновения галактик в 114–116
  - столкновения звезд в 14, 119–122

- черные дыры в 106–107, 113–114, 129–130, 140, 155–156, 212
- Эпоха черных дыр 26–27, 138–183, 194, 212
- апокалипсис в 155–159
- гравитационное излучение в 159–162
- жизнь в 177–179
- конец 179–183
- кривизна и 148–154
- растяжение времени и 145–148
- сложность в 169–177
- число черных дыр в 154–155
- Южная Африка 93
- Юпитер 15, 69, 135, 157, 158, 221
- луны 96–97
- масса 111
- Ядерное взаимодействие сильное 17, 39, 60, 132, 223, 225–226
- слабое 17–18, 39, 60, 124, 132, 207, 222–223, 226
- Ядро *см. также* Элементарные частицы
- в первичную эпоху 35, 50–51
- магния 86
- разрушение 222
- Ядро магния 86

**Фред Адамс, Грег Лафлин**

## ПЯТЬ ВОЗРАСТОВ ВСЕЛЕННОЙ: В ГЛУБИНАХ ФИЗИКИ ВЕЧНОСТИ

*Дизайнер М. В. Ботя  
Технический редактор А. В. Ширококов  
Компьютерная верстка Д. В. Панкратов  
Корректор З. Ю. Соболева*

---

Подписано в печать 17.01.2006. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 16,34.

Гарнитура Computer Modern Roman. Бумага офсетная №1.

Тираж 700 экз. Заказ № 005.

Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика»  
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

<http://rcd.ru> E-mail: [mail@rcd.ru](mailto:mail@rcd.ru) Тел./факс: (+73412) 500–295

---

Отпечатано ГУП УР «Ижевский полиграфический комбинат»  
426039, г. Ижевск, Воткинское шоссе, 180.

ISBN 5-93972-500-7



9 785939 725002