

С. Вайнберг

ПЕРВЫЕ ТРИ МИНУТЫ

*Современный взгляд
на происхождение Вселенной*

R&C
Dynamics

THE FIRST THREE MINUTES

*A Modern View of the
Origin of the Universe*

STEVEN WEINBERG

Basic Books, Inc., Publishers

New York

СТИВЕН ВАЙНБЕРГ

ПЕРВЫЕ ТРИ МИНУТЫ

*Современный взгляд
на происхождение Вселенной*

Перевод с английского к.ф.-м.н. А. В. Беркова

Под редакцией, с предисловием и дополнением
академика Я. Б. Зельдовича

Издание второе

Научно-издательский центр
«Регулярная и хаотическая динамика»

2000

Вайнберг С.

Первые три минуты: современный взгляд на происхождение Вселенной. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000, 272 с.

В книге крупнейшего американского физика-теоретика популярно и увлекательно рассказывается о современном взгляде на происхождение Вселенной. Описаны факты, подтверждающие модель «горячей Вселенной», рассказана история фундаментальных астрофизических открытий последних лет. С большим мастерством и научной точностью излагается эволюция Вселенной на ранних стадиях ее развития после «Большого взрыва».

В новое издание вошла также нобелевская лекция С. Вайнберга, в которой описывается история возникновения единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий.

Для читателей, интересующихся проблемами космологии.

ISBN 5-93972-013-7

[bb=0 0 6.8mm 6.4mm]udgu.pcx

Издание выполнено при содействии
Удмуртского государственного университета

© НИЦ «Регулярная
и хаотическая динамика», 2000

<http://www.rcd.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора русского перевода	6
Предисловие	10
I. Введение: великан и корова	14
II. Расширение Вселенной	20
III. Космический фон микроволнового излучения	53
IV. Рецепт приготовления горячей Вселенной	84
V. Первые три минуты	105
VI. Историческое отступление	123
VII. Первая сотая доля секунды	132
VIII. Эпилог: перспективы	147
Словарь терминов	154
Математическое дополнение	168
Дополнения редактора русского перевода	182
Предложения для дальнейшего чтения	212
Литература, рекомендуемая редактором перевода	218
Приложение. Идейные основы единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий	220
Алфавитно-предметный указатель	251

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА РУССКОГО ПЕРЕВОДА

Вселенная представляет собой уникальный, всеобъемлющий предмет для размышления и изучения. Предлагаемая книга уникальна по своему стилю: сложные вопросы, находящиеся в центре внимания современной науки, излагаются простым языком, без математических формул, доступно для читателя, обладающего общей культурой, и неспециалиста в области физики или астрономии. Наконец, уникален и сам автор книги, известный американский физик-теоретик Стивен Вайнберг — автор первоклассных достижений в теории элементарных частиц^{*}. Но Вайнберг не замыкается в этой тематике. Он прекрасно знает и классическую физику и живо интересуется смежными науками, особенно астрономией.

Соединение трех уникальных качеств (тема книги, способ изложения и личность автора) приводит к замечательному результату. Благодаря ей самые широкие круги читателей приобщаются к современной науке. Немало молодых читателей под влиянием предлагаемой книги выбирают теоретическую физику и астрофизику как будущую свою специальность.

Хочется особо отметить те места книги, где автор высказывается об исследовательской работе и законах развития науки в общем плане. На примере космологии он показывает, каким, по его мнению, должно быть соотношение между теорией и опытом, наблюдениями. Это, прежде всего, высказывание, что нельзя работать совсем без теоретических «предубеждений», но нужно уметь выбрать правильные предубеждения (см. с. 121).

Автор необычайно остро чувствует роль отдельных людей, творцов науки. Вряд ли он мог бы написать об этом с та-

^{*}За эти достижения С. Вайнберг удостоен в 1979 г. Нобелевской премии по физике.

кой силой и убедительностью, если бы сам не был выдающимся ученым и творцом.

Но Вайнберг показывает и подчеркивает и другую сторону дела: объективную закономерность, необходимость и неизбежность тех выводов, к которым приходит наука. Он показывает, как в конечном счете опыт и наблюдения решают судьбу теорий, как опыт становится верховным судьей истины. Поучительный пример, приводимый автором, — судьба печально знаменитой теории стационарной Вселенной с непрерывным рождением вещества, компенсирующим расширение. Симпатизируя философским аспектам этой теории, Вайнберг указывает на то, что наблюдения безусловно отвергли теорию стационарной Вселенной. Он говорит о высшей объективности коллективного разума ученых разных специальностей.

Отдельные личности, талантливые или влиятельные, могут ускорить или замедлить успех правильной точки зрения, но никому не дано навязать природе и человечеству неверную теорию. Правильность или ошибочность той или иной определенной теории является объективным фактом. Другое дело, что для установления этого факта иногда требуется большое время, годы или десятилетия, и в течение этого времени теория находится в неопределенном состоянии. В этот период может быть правильнее называть ее гипотезой.

Заметим, наконец, что когда правильность теории установлена, то одновременно выясняются и границы применимости теории и открываются новые горизонты дальнейших исследований. Весь опыт двадцатого века учит такому соотношению; наилучшим примером является классическая механика, верная в пределе малых скоростей (иначе нужна теория относительности) и больших масс, импульсов, перемещений (иначе нужна квантовая теория).

В изложении Вайнберга теоретические положения ожидают. Он рассказывает не только о судьбе Вселенной, но и об истории ее исследования.

Редактор в примечаниях отметил некоторые этапы, принадлежащие истории космологии и, в частности, истории советских работ, недостаточно отраженные в книге.

В целом, однако, Вайнбергу удалось великолепно показать

ту драму идей, борьбу, сотрудничество и переплетение различных школ мышления, без которых не обходится развитие науки. Поэтому книга Вайнберга оказалась такой увлекательной, получила такую широкую аудиторию и полное признание.

За время, прошедшее после написания книги (она возникла из лекции 1973 года и вышла из печати первым изданием в 1977 году), приводимые в ней сведения не устарели. Нет необходимости что-либо менять в основном тексте. Однако по некоторым вопросам появились новые данные и новые точки зрения.

Наиболее принципиальным является, пожалуй, изменившееся отношение к вопросу о сохранении барионов. В книге Вайнберг объявляет закон сохранения барионного заряда одним из самых фундаментальных законов природы. В последнее время все чаще рассматривается возможность того, что барионы не сохраняются, что устойчивость протона не абсолютна. Подробно история вопроса и современное состояние рассмотрены в дополнении редактора 6.

Другие дополнения касаются новых наблюдательных данных и новых возможностей наблюдения, связанных, главным образом, с использованием микроволнового фонового радиополучения Вселенной. Здесь редактор существенно опирается на работы советского астрофизика Р. А. Сюняева и свои. Рассмотрено также влияние ненулевой массы покоя нейтрино на наши представления о строении и эволюции Вселенной. Вопрос этот возник в связи с работами советских и американских экспериментаторов. Одновременно изменилось и отношение физиков-теоретиков к гипотезе тяжелого нейтрино. Выводы из этой гипотезы, касающиеся космологии, оказываются фундаментальными.

В своих дополнениях редактор старался не выйти за рамки общего стиля книги, не оторваться от того читателя, неспециалиста, на которого книга рассчитана. Ни основной текст книги, ни дополнения к ней не могут и не должны заменить специальные руководства и книги для читателя, желающего специализироваться по астрофизике.

В заключение редактор хочет от души поблагодарить

Стивена Вайнберга за активное сотрудничество в связи с русским переводом книги.

Пользуюсь случаем поблагодарить переводчика книги, кандидата физико-математических наук доцента А. В. Беркова, бережно сохранившего стиль оригинала.

Академик Я. Б. Зельдович

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга возникла из доклада, сделанного мной на церемонии открытия научного центра для студентов младших курсов в Гарварде в ноябре 1973 года. Эрвин Глайкс, президент и издатель фирмы Basic Books, услышал от нашего общего друга Дэниэла Белла об этом докладе и убедил меня превратить его в книгу.

Поначалу эта идея не вызвала у меня восторга. Хотя время от времени я и вносил малую лепту в исследования по космологии, все же моя работа значительно больше была связана с физикой микромира — теорией элементарных частиц. Кроме того, физика элементарных частиц чрезвычайно бурно развивалась в последние несколько лет, и я уже провел слишком много времени в отрыве от нее, занимаясь сочинением популярных статей для разных журналов. Мне очень хотелось отдать, наконец, все свое время моей естественной среде обитания — журналу *Physical Review*.

Однако скоро я обнаружил, что не могу выбросить из головы мысль о книге, посвященной ранней Вселенной. Что может быть интереснее проблемы Генезиса? Кроме того, именно при изучении ранней Вселенной, особенно первой сотой доли секунды ее существования, проблемы теории элементарных частиц пересекаются с проблемами космологии. Наконец, сейчас настало хорошее время для того, чтобы написать книгу о ранней Вселенной. Как раз в последнее десятилетие детальная теория развития событий на ранней стадии существования Вселенной под названием «стандартной модели» стала общепринятой.

Очень примечательно, что есть возможность сказать, на что была похожа Вселенная в конце первой секунды, или первой минуты, или первого года. Каждый физик рад, что он может получать числовые результаты, что он способен сказать, что в такой-то и такой-то моменты времени темпера-

тура, плотность и химический состав Вселенной имели такие-то и такие-то значения. Откровенно говоря, мы не абсолютно уверены во всем этом, но весьма волнует, что сейчас мы способны говорить о подобных вещах хоть с какой-то долей уверенности. Именно это волнение я и хотел донести до читателя.

Пожалуй, надо сказать, на кого рассчитана эта книга. Я писал для читателя, который хочет разобраться в ряде подробно изложенных доводов, но который при этом плохо знаком с математикой или физикой. Хотя мне пришлось объяснить несколько довольно сложных научных идей, в основном тексте книги не используется математика, кроме арифметики, и почти не предполагается знание читателем физики или астрономии. Я пытался быть очень внимательным при определении научных понятий там, где они впервые используются, а в приложении поместил словарь физических и астрономических терминов. Я также писал там, где это возможно, числа вроде «сто миллиардов» полностью словами, вместо того, чтобы использовать более удобную научную запись: 10^{11} .

Однако все это не означает, что я старался написать легкую книгу. Когда юрист пишет для широкой публики, он предполагает, что она незнакома, например, с французским законодательством или с законом против пожизненной ренты, но из-за этого он не думает о публике слишком плохо и, в то же время, не снисходит до ее уровня. Я хочу поступить так же: читатель представляется мне в облике ловкого старого адвоката, который не умеет говорить на *моем* языке, но который, по крайней мере, надеется услышать несколько убедительных аргументов прежде, чем составит собственное мнение.

Для тех читателей, которые хотели бы увидеть некоторые вычисления, лежащие в основе доводов, приведенных в книге, я подготовил «Математическое дополнение», следующее за основным текстом (см. с. 168). Уровень использованной там математики должен сделать эти замечания доступными для каждого, кто обладает знаниями студента-младшекурсника, специализирующегося в любой области физики или математики. К счастью, наиболее важные расчеты в космологии действительно просты; только в отдельных местах начинают иг-

рать роль более тонкие вещи, связанные с общей теорией относительности или ядерной физикой. Читатель, который захочет продолжить изучение предмета на более техническом уровне, найдет ссылки на ряд более сложных руководств (включая мое собственное) в «Предложениях для дальнейшего чтения» (см. с. 212).

Хочу также пояснить, что именно я намереваюсь рассмотреть в этой книге. Она, безусловно, не касается всех аспектов космологии. Существует «классическая» часть предмета, которая имеет дело, главным образом, с крупномасштабной структурой сегодняшней Вселенной, сюда относятся споры вокруг внегалактической природы спиральных туманностей; открытие красных смещений у далеких галактик и зависимость этих смещений от расстояния; связанные с общей теорией относительности космологические модели Эйнштейна, де Ситтера, Леметра и Фридмана и тому подобное. Эта часть космологии уже была очень хорошо описана во многих превосходных книгах, и я не собирался давать еще один полный обзор этой темы. Данная книга посвящена ранней Вселенной и в особенности тому новому пониманию ранней Вселенной, которое возникло после открытия в 1965 году космического фона микроволнового излучения.

Конечно, теория расширения Вселенной является существенной составной частью наших сегодняшних представлений о ранней Вселенной, поэтому я был вынужден дать в главе II краткое введение в более «классические» вопросы космологии. Я надеюсь, что даже для читателей, полностью незнакомых с космологией, эта глава даст соответствующую основу для понимания недавних достижений в теории ранней Вселенной, чему посвящена остальная часть книги. Однако читателю, желающему подробнее изучить более старые разделы космологии, рекомендуется обратиться к книгам, упомянутым в «Предложениях для дальнейшего чтения».

В то же время, мне не удалось найти последовательно-го исторического обзора недавних достижений в космологии. Поэтому я был обязан сам заняться небольшими раскопками, особенно в связи с поразительным вопросом, почему задолго до 1965 года не было поисков космического фона микровол-

нового излучения (этот вопрос обсуждается в главе VI). Я не хочу сказать, что рассматриваю данную книгу как точную историю указанных достижений, — у меня достаточно уважения к тем усилиям и тому вниманию к деталям, которые нужны в истории науки, чтобы питать на этот счет какие-то иллюзии. Все же я был бы счастлив, если бы настоящий историк науки использовал эту книгу в качестве отправной точки и написал адекватную историю последнего тридцатилетия космологических исследований.

Я чрезвычайно признателен Эрвину Глайксу и Фарреллу Филипсу из фирмы Basic Books за их ценные предложения при подготовке рукописи к печати. Мне трудно выразить словами, как мне помогли во время написания этой книги добрые советы моих коллег — физиков и астрономов. За труд по чтению и рецензированию отдельных частей книги я хочу особенно поблагодарить Ральфа Альфера, Бернарда Берка, Роберта Дикке, Джорджа Филда, Гэри Файнберга, Уильяма Фаулера, Роберта Хермана, Фреда Хойла, Джима Пиблза, Арно Пензиаса, Билла Пресса, Эда Перселла и Роберта Вагонера. Я также признателен Айзеку Азимову, Бернарду Коэну, Марте Лиллер и Филиппу Моррисону за информацию по отдельным вопросам. Я особенно благодарен Найгелу Кальдеру, прочитавшему целиком первый вариант рукописи и сделавшему ряд глубоких замечаний. Я не могу надеяться на то, что эта книга полностью свободна от ошибок и неясностей, но я уверен, что она стала намного яснее и точнее, чем могла бы быть без той вдохновляющей помощи, которую мне посчастливилось получить.

Кембридж, Массачусетс,
июль 1976 года

Стивен Вайнберг

I. ВВЕДЕНИЕ: ВЕЛИКАН И КОРОВА

Происхождение Вселенной объясняется в «Младшей Эдде», собрании норвежских мифов, обработанных около 1220 года исландским магнатом Снорри Стурлусоном. Сначала, говорится в «Эдде», не было вообще ничего: «Земли еще не было, и небосвода, бездна зияла, трава не росла». К северу и югу от ничего лежали области холода и огня — Нифльхейм и Мусспельхейм. Тепло из Мусспельхейма растопило часть льда из Нифльхейма, и из капель жидкости вырос великан Имир. Что же Имир ел? Оказалось, что там была и корова, Аудумла. А что же *она* ела? Ну, там нашлось еще немного соли. И так далее.

Мне не хотелось бы оскорбить чьи-либо религиозные чувства, даже религиозные чувства викингов, но думаю, что, по совести говоря, это не очень удовлетворительная картина происхождения Вселенной. Даже оставляя в стороне все возражения, связанные с тем, что свидетельские показания основаны на слухах, надо признать, что эта история рождает столько же вопросов, на сколько она дает ответ, и каждый ответ требует новых усложнений начальных условий.

Но мы не можем просто посмеяться, читая «Эдду», и отвлечься от всех космогонических гипотез — стремление проследить историю Вселенной назад к самому началу непреодолимо. С момента зарождения современной науки в шестнадцатом и семнадцатом веках физики и астрономы вновь и вновь возвращались к проблеме возникновения Вселенной.

Однако подобные исследования всегда пользовались дурной репутацией. Я вспоминаю, что когда я был студентом, а затем в 50-е годы начал свои собственные исследования (по другим проблемам), то повсюду считалось, что изучение ранней Вселенной — это не та задача, которой должен посвящать

свое время уважающий себя ученый. И такое суждение имело свои основания. В течение почти всей истории современной физики и астрономии попросту не существовало адекватного наблюдательного и теоретического базиса, который позволил бы реконструировать историю ранней Вселенной.

Но за последнее десятилетие все это изменилось. Теория ранней Вселенной стала столь общепринятой, что астрономы часто называют ее «стандартной моделью». Это примерно то же самое, что иногда именуется теорией «большого взрыва», но дополненное значительно более точными указаниями относительно того, из чего состояла Вселенная. Теория ранней Вселенной и рассматривается в данной книге.

Чтобы помочь увидеть цель нашего путешествия, может быть, полезно начать с краткого резюме истории ранней Вселенной, как она в настоящий момент представляется в рамках стандартной модели. Это лишь беглый обзор — в последующих главах будут объяснены детали этой истории и наши основания доверять каждой из них.

Вначале был взрыв. Не такой взрыв, который знаком нам на Земле и который начинается из определенного центра и затем распространяется, захватывая все больше и больше пространства, а взрыв, который произошел одновременно везде, заполнив с самого начала все пространство, причем каждая частица материи устремилась прочь от любой другой частицы. В этом контексте «все пространство» может означать либо все пространство бесконечной Вселенной, либо все пространство конечной Вселенной, которое замкнуто на себя, как поверхность сферы. Каждую из этих возможностей нелегко постичь, но это нам не мешает: оказывается, что на историю ранней Вселенной не влияет, является ли пространство конечным или бесконечным.

Примерно через одну сотую долю секунды, самое раннее время, относительно которого мы можем говорить с какой-то определенностью, температура Вселенной была равна примерно ста тысячам миллионов (10^{11}) градусов Цельсия. Это значительно горячее, чем в центре самой горячей звезды, так горячо на самом деле, что ни одни из компонентов обычного вещества — молекулы, атомы или даже ядра атомов — не

могли существовать. Вместо этого вещество, разлетавшееся в разные стороны в таком взрыве, состояло из различных типов так называемых элементарных частиц, являющихся предметом изучения современной физики высоких энергий.

Мы неоднократно будем встречаться на страницах книги с этими частицами, но в данный момент будет достаточно назвать только те из них, которые присутствовали в ранней Вселенной в наибольшем количестве, отложив более детальные разъяснения до глав III и IV. Один тип частиц, присутствовавших в больших количествах, — это электроны, отрицательно заряженные частицы, которые переносятся электрическим током по проводам и образуют внешние части всех атомов и молекул нашей теперешней Вселенной. Другой тип частиц, имевшихся в изобилии на ранней стадии, — это позитроны, положительно заряженные частицы с массой, в точности равной массе электрона. В теперешней Вселенной позитроны обнаруживаются только в лабораториях физики высоких энергий, в некоторых типах радиоактивного распада, а также в бурных астрономических явлениях вроде космического излучения или сверхновых, но в ранней Вселенной число позитронов почти точно равнялось числу электронов. Вдобавок к электронам и позитронам было примерно одинаковое количество нейтрино различных типов — призрачных частиц, не имеющих вообще ни массы*, ни электрического заряда. Наконец, Вселенная была заполнена светом. Его не следует рассматривать отдельно от частиц — квантовая теория говорит нам, что свет состоит из частиц нулевой массы* и нулевого электрического заряда, известных под названием фотонов. (Каждый раз, когда атом в нити накала электрической лампочки переходит из состояния большей энергии в состояние меньшей энергии, испускается один фотон. При этом из электрической лампочки вылетает так много фотонов, что они кажутся слившимися вместе в непрерывный поток света, однако фотоэлемент может сосчитать отдельные фотоны, один за

* В обоих случаях автор имеет в виду, что нулю равна только масса покоя нейтрино и фотона. Масса этих частиц равна их энергии, деленной на квадрат скорости света, а энергия может быть любой, в том числе близкой к нулю. — *Прим. ред.*

другим). Каждый фотон несет определенную порцию энергии и импульса, зависящую от длины волны света. Чтобы описать тот свет, который заполнял раннюю Вселенную, мы можем сказать, что число и средняя энергия фотонов были примерно такими же, как у электронов, позитронов или нейтрино.

Эти частицы — электроны, позитроны, нейтрино, фотоны — непрерывно рождались из чистой энергии и затем весьма быстро вновь аннигилировали. Поэтому число этих частиц не было предопределено заранее, а определялось балансом между процессами рождения и аннигиляции. Из этого баланса можно вывести, что плотность такого космического супа при температуре сотни тысяч миллионов градусов была примерно в четыре тысячи миллионов ($4 \cdot 10^9$) раз больше, чем у воды. Кроме того, имелась небольшая примесь более тяжелых частиц — протонов и нейтронов, которые в сегодняшнем мире являются составными частями атомных ядер. (Протоны положительно заряжены; нейтроны чуть тяжелее и электрически нейтральны.) Пропорции составляли примерно один протон и один нейтрон на каждую тысячу миллионов электронов, или позитронов, или нейтрино, или фотонов. Это число — тысяча миллионов фотонов на одну ядерную частицу — является критической величиной, которая должна браться из наблюдений в целях построения стандартной модели Вселенной*. Открытие космического фона излучения, обсуждаемое в главе III, в действительности представляло собой измерение этого числа.

В процессе развития взрыва температура падала, достигнув через одну десятую секунды тридцати тысяч миллионов ($3 \cdot 10^{10}$) градусов Цельсия, через одну секунду — десяти тысяч миллионов градусов и через четырнадцать секунд — трех тысяч миллионов градусов. Это уже было достаточно прохладно для того, чтобы электроны и позитроны начали аннигилировать быстрее, чем они могли рождаться вновь фотонами или нейтрино. Энергия, выделявшаяся при такой аннигиляции вещества, постепенно замедляла скорость охлаждения Вселенной, но температура продолжала падать, достигнув на-

* О современных попытках найти это число на основании данных лабораторной физики см. дополнение редактора 6 (с. 193). — *Прим. ред.*

конец одной тысячи миллионов градусов в конце первых трех минут. Тут уже стало достаточно прохладно для того, чтобы протоны и нейтроны начали образовывать сложные ядра, начиная с ядра тяжелого водорода (дейтерия), состоящего из одного протона и одного нейтрона. Плотность была все еще достаточно велика (чуть меньше плотности воды), так что эти легкие ядра были способны быстро объединяться в более стабильные легкие ядра, такие, как ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов.

В конце первых трех минут Вселенная содержала главным образом свет, нейтрино и антинейтрино. Кроме того, имелось небольшое количество ядерного материала, состоявшего к этому моменту примерно на 73 процента из ядер водорода и на 27 из ядер гелия, и столь же малое количество электронов, оставшихся от эры электрон-позитронной аннигиляции. Эта материя продолжала расширяться, становясь постепенно холоднее и разреженнее. Значительно позже, через несколько сот тысяч лет, стало уже достаточно холодно для того, чтобы электроны смогли объединиться с ядрами, образовав атомы водорода и гелия. Образовавшийся газ начал под действием гравитации образовывать сгустки, которые в конце концов сконденсировались, образовав галактики и звезды нынешней Вселенной. Однако звезды* начали свою жизнь как раз с теми составными элементами, которые были изготовлены в первые три минуты.

Обрисованная выше стандартная модель — совсем не самая удовлетворительная из всех мыслимых теорий происхождения Вселенной. Как и в «Младшей Эдде», в ней имеется смущающая неопределенность относительно самого начала, первой сотой доли секунды или около того. Помимо этого, необходимо, к сожалению, фиксировать начальные условия, в особенности начальное отношение тысяча миллионов к одному для фотонов и ядерных частиц. Мы предпочли бы теорию, логическая неизбежность которой была бы более очевидной.

* Имеются в виду звезды «первого поколения». В дальнейшем в состав межзвездного газа вошли и другие элементы, но процесс образования звезд продолжался, появились звезды «второго поколения» более сложного состава. — *Прим. ред.*

Существует альтернативная теория, которая кажется значительно более привлекательной с философской точки зрения, так называемая теория стационарного состояния. В этой теории, предложенной в конце 40-х годов Германом Бонди, Томасом Голдом и (в несколько иной формулировке) Фредом Хойлом, считается, что Вселенная всегда была почти такой же, как сейчас. В процессе ее расширения непрерывно рождается новая материя, заполняя промежутки между галактиками. В принципе, на все вопросы о том, почему Вселенная такая, какая она есть, можно ответить в этой теории, показав, что она такая, какая она есть, потому, что это единственный способ, при котором она может оставаться неизменной. Проблемы ранней Вселенной нет, ранней Вселенной просто не было.

Как же мы тогда пришли к стандартной модели? И как же она вытеснила другие теории вроде модели стационарного состояния? Это было данью чрезвычайной объективности современной астрофизики, благодаря которой единодушие стало возможным не из-за сдвигов в философских симпатиях и не под влиянием ученых-мандаринов от астрофизики, а под давлением эмпирических данных.

В следующих двух главах будут описаны две великие путеводные нити, предоставляемые нам астрономическими наблюдениями и приводящие к стандартной модели, — открытие разбегания далеких галактик и обнаружение слабого фона радиоизлучения, заполняющего Вселенную. Это богатейший сюжет для историка науки, полный ошибочных начинаний, упущенных возможностей, теоретических предубеждений и действий отдельных личностей.

Вслед за этим обзором наблюдательной космологии я попытаюсь соединить разрозненные данные, чтобы дать единую картину физических условий в ранней Вселенной. Это заставит нас вернуться к более детальному рассмотрению первых трех минут. Представляется подходящим кинематографический метод: кадр за кадром мы будем следить за тем, как Вселенная расширяется, охлаждается и готовится*. Мы так-

*Здесь и далее в аналогичных случаях автор употребляет английский глагол «cook», означающий «приготовлять пищу». Имеется в виду, конечно, процесс образования химических элементов в ранней Вселенной. —

Прим. пер.

же попробуем заглянуть немного в эру, все еще окутанную тайной, — а именно, в то, что происходило до первой сотой доли секунды.

Можем ли мы действительно быть уверенными в стандартной модели? Не разрушат ли ее новые открытия и не заменят ли сегодняшнюю стандартную модель какой-то другой космогонией, может быть, даже возродив стационарную модель? Возможно. Я не в силах избавиться от ощущения нереальности, когда пишу о первых трех минутах так, как будто мы действительно знаем, о чем говорим.

Однако даже если стандартную когда-нибудь вытеснит другая модель, она все равно будет играть чрезвычайно важную роль в истории космологии. Сейчас стало общепринятым (хотя лишь в последнее десятилетие или около того) проверять теоретические идеи в физике или астрофизике, обсуждая их следствия в рамках стандартной модели. Также обычным стало использование стандартной модели в качестве теоретической основы для определения программ астрономических наблюдений. Таким образом, стандартная модель обеспечивает необходимый общий язык, который позволяет теоретикам и наблюдателям понимать, что каждый из них делает. Если когда-нибудь стандартную модель заменит лучшая теория, то, вероятнее всего, это произойдет в результате наблюдений или вычислений, обоснование необходимости которых будет получено из стандартной модели.

В последней главе я немного поговорю о будущем Вселенной. Возможно, она будет продолжать расширяться всегда, становясь все более холодной, разреженной и мертвой. Но возможно, что она будет вновь сжиматься, вновь разбивая галактики, звезды, атомы и атомные ядра на их составные части. Все те проблемы, с которыми мы сталкиваемся в понимании первых трех минут, возникнут тогда снова при предсказании течения событий в три последние минуты.

II. РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Взгляд на ночное небо создает могучее впечатление неизменности Вселенной. Конечно, облака набегают на Луну, небосвод вращается вокруг Полярной звезды, а если смотреть на

небо через большие промежутки времени, то сама Луна убывает и прибывает, а Луна и планеты движутся на фоне звезд. Но мы знаем, что это всего лишь локальные явления, обусловленные движениями внутри нашей Солнечной системы. Если не считать планет, то звезды кажутся неподвижными.

vfoto01.eps

СОБСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ЗВЕЗДЫ БАРНАРДА.

С интервалом в 22 года показано положение звезды Барнарда (отмеченное белой стрелкой). Ясно видно изменение положения звезды Барнарда на фоне более ярких звезд. За эти 22 года направление на звезду Барнарда изменилось на 3,7 дуговой минуты; таким образом, «собственное движение» составляет 0,17 дуговой минуты за год (фотография Йеркской обсерватории).

Конечно, на самом деле звезды движутся со скоростью, достигающей нескольких сот километров в секунду, так что в течение года быстрая звезда может сместиться примерно на десять тысяч миллионов километров. Это в тысячу раз меньше, чем расстояние даже до ближайших звезд, поэтому их видимое положение на небе меняется очень медленно. (Например, относительно быстрая звезда, известная как звезда Барнарда, находится на расстоянии около 56 миллионов миллионов километров; она смещается поперек луча зрения примерно на 89 километров за секунду или 2,8 тысячи миллионов километров за год, и, вследствие этого, ее видимое положение на небе смещается за год на угол 0,0029 градуса). Астрономы называют сдвиг видимого положения ближайших звезд на небе «собственным движением». Видимые положения на небе более далеких звезд меняются столь медленно, что их собственное движение невозможно заметить даже при самом терпеливом наблюдении.

Мы увидим сейчас, что это впечатление неизменности иллюзорно. Наблюдения, которые мы будем обсуждать в этой главе, показывают, что Вселенная находится в состоянии сильного взрыва, в котором огромные острова звезд, известные как галактики, разлетаются в разные стороны со скоростью, приближающейся к скорости света. Далее мы можем экстраполировать этот взрыв назад по времени и заключить,

что все галактики должны были быть в какой-то момент времени в прошлом значительно ближе друг к другу, на самом деле так близко, что ни сами галактики, ни звезды, ни даже атомы или атомные ядра не могли отдельно существовать. Это и есть та эра, которую мы называем «ранней Вселенной» и которая является предметом обсуждения в данной книге.

Наши знания о расширении Вселенной основаны исключительно на том факте, что астрономы способны измерять движение светящегося тела в направлении прямо *вдоль* луча зрения намного точнее, чем его движение под прямым углом к лучу зрения*. Техника измерений использует хорошо известное свойство любого типа волнового движения, так называемый эффект Доплера. Когда мы наблюдаем звуковую или световую волну от покоящегося источника, то промежуток времени между прибытием гребней волн к нашим измерительным приборам такой же, как и промежуток времени между испусканием волн источником. С другой стороны, если источник удаляется от нас, то промежуток времени между прибытием последовательных гребней волн увеличивается по сравнению с промежутком времени между их испусканием источником, так как каждому гребню нужно пройти чуть большее расстояние на своем пути к нам, чем предыдущему гребню. Интервал времени между гребнями как раз равен длине волны, деленной на скорость волны, так что волна, испущенная удаляющимся от нас источником, будет казаться имеющей *большую* длину, чем если бы источник покоился. (Более точно относительное увеличение длины волны дается отношением скорости источника волны к скорости самой волны, что показано в математическом дополнении 1, с. 168.) Аналогично, если источник приближается к нам, то промежуток времени между прибытием волновых гребней уменьшается, так как каждый последующий гребень должен пройти меньший путь, и сама волна кажется имеющей *меньшую* длину. Это напоминает то, как если бы коммивояжер посылал письма домой регулярно раз в неделю в течение своей поездки: когда

* О возможности определения движения скопления галактик под прямым углом к лучу зрения см. дополнение редактора 5 (с. 190). — *Прим. ред.*

он едет от дома, каждое последующее письмо должно пройти чуть больший путь, чем предыдущее, поэтому его письма будут приходить с интервалом чуть больше недели; на обратном пути домой каждое последующее письмо будет проходить все меньшее расстояние, поэтому они будут приходить чаще, чем раз в неделю.

vfoto10.eps

СПЕКТР СОЛНЦА.

Показан свет Солнца, разложенный с помощью 13-футового спектрогелиографа на различные длины волн. В среднем интенсивность на разных длинах волн примерно такая же, какая излучалась бы любым полностью поглощающим (или «черным») телом при температуре 5800 К. Однако вертикальные темные «фраунгоферовы» линии в спектре указывают на то, что свет по поверхности Солнца поглощается относительно более холодной и частично прозрачной внешней областью, известной под названием обрабатывающего слоя. Каждая темная линия возникает в результате селективного поглощения света на определенной длине волны; чем темнее линия, тем интенсивнее поглощение. Длины волн указаны над спектром в ангстремах (10^{-8} см). Установлено, что многие из этих линий обязаны поглощению света определенными элементами, такими, как кальций (Ca), железо (Fe), водород (H), магний (Mg), натрий (Na). Отчасти, с помощью излучения таких линий поглощения, мы можем установить космическую распространенность различных химических элементов. Соответствующие линии поглощения в спектрах далеких галактик наблюдаются сдвинутыми от их нормального положения в сторону больших длин волн; именно из этого красного смещения мы делаем вывод о расширении Вселенной (фотография Хейльской обсерватории).

В наши дни легко наблюдать эффект Доплера для звуковых волн — достаточно подойти к краю скоростной автомобильной дороги и заметить, что мотор быстро мчащегося автомобиля издает более высокий звук (т. е. звук более короткой длины волны), когда автомобиль приближается, по сравнению с тем, когда он удаляется. По-видимому, эффект был впервые отмечен как для световых, так и для звуковых волн Иоганном Христианом Доплером, профессором математики Реальной школы в Праге в 1842 году. Эффект Доплера для звуковых волн был проверен в 1845 году голландским метеорологом Христофором Генрихом Дитрихом Буа-Балло в очаровательном эксперименте — в качестве движущегося источника зву-

ка он использовал оркестр трубачей, стоявших на открытой платформе железнодорожного вагона, мчавшегося по сельской местности вблизи Утрехта.

Доплер думал, что его эффект может объяснить разный цвет звезд. Свет от звезд, которые удаляются от Земли, был бы сдвинут в сторону больших длин волн, а так как красный свет имеет длину волны больше, чем средняя длина волны видимого света, то такие звезды казались бы несколько краснее. Аналогично свет от тех звезд, которые приближаются к Земле, был бы сдвинут в сторону более коротких длин волн, поэтому звезды казались бы необычно голубыми. Вскоре, однако, Буа-Балло и другие заметили, что эффект Доплера не имеет никакого отношения к цвету звезд. Действительно, голубой свет от удаляющейся звезды сдвигается в красную сторону, но в то же время часть невидимого в нормальных условиях ультрафиолетового света звезды сдвигается в голубую часть видимого спектра, поэтому общий цвет вряд ли меняется*. Звезды имеют разный цвет главным образом потому, что у них разная температура поверхности.

Однако эффект Доплера приобрел огромную важность для астрономии в 1868 году, когда он был применен к изучению отдельных спектральных *линий*. За много лет до этого, в 1814–1815 годах, мюнхенский оптик Иозеф Фраунгофер обнаружил, что когда свет от Солнца пропускается через щель, а затем через стеклянную призму, то получающийся цветовой спектр пересекается сотнями темных линий, каждая из которых является изображением щели. (Некоторые из этих линий были замечены еще раньше, в 1802 году, Уильямом Хайдом Волластоном, но не были в то время детально изучены.) Темные линии всегда соответствовали одним и тем же цветам, причем каждая линия отвечала определенной длине волны света. Такие же темные спектральные линии и на тех же местах были найдены Фраунгофером в спектрах Луны и ярчайших

* Независимость цвета от доплеровского сдвига имеет место только при определенном соотношении между излучениями разной длины волны. В общем случае цвет зависит от скорости движения, но звезды, которые мы наблюдаем в Галактике, движутся слишком медленно. — *Прим. ред.*

СВЯЗЬ МЕЖДУ КРАСНЫМ СМЕЩЕНИЕМ И РАССТОЯНИЕМ.

Здесь показаны яркие галактики из пяти скоплений галактик, а также их спектры. Спектры галактик представляют собой длинные горизонтальные белые полосы, пересеченные несколькими короткими темными вертикальными линиями. Каждое место вдоль этих спектров соответствует свету от галактики с определенной длиной волны; темные вертикальные линии возникают от поглощения света в атмосферах звезд этих галактик. (Яркие вертикальные линии выше и ниже спектра каждой галактики являются просто стандартными спектрами для сравнения, наложенными на спектр галактики для определения длин волн.) Стрелки ниже каждого спектра указывают на сдвиг двух специфических линий поглощения (*H*- и *K*-линии кальция) от их нормального положения к правому (красному) концу спектра. Красное смещение этих линий поглощения, если интерпретировать его как эффект Доплера, указывает, что скорость меняется в интервале от 1200 километров в секунду для галактики в скоплении Девы, до 61 000 км/с для скопления Гидры. С учетом того, что красное смещение пропорционально расстоянию, это означает, что указанные галактики находятся на все более далеких расстояниях. (Приведенные здесь расстояния вычислены с помощью постоянной Хаббла, равной 15,3 км/с на миллион световых лет.) Такая интерпретация подтверждается тем, что с ростом красного смещения галактики кажутся все более маленькими и слабыми (фотография Хейльской обсерватории).

90[]vfoto06.eps

звезд. Вскоре стало ясно, что эти темные линии возникают в результате избирательного поглощения света определенных длин волн в то время, когда свет от горячей поверхности звезды проходит через ее более холодную атмосферу. Каждая линия обязана своим происхождением поглощению света определенным химическим элементом, поэтому удалось установить, что элементы, имеющиеся на Солнце, такие, как натрий, железо, магний, кальций и хром, это те же элементы, что и найденные на Земле. Мы знаем сегодня, что длина волны темных линий соответствует энергии фотонов, которая в точности такова, чтобы перевести атом из состояния наименьшей энергии в одно из его возбужденных состояний.

В 1868 году сэру Уильяму Хаггинсу удалось показать, что темные линии в спектрах некоторых ярчайших звезд слегка сдвинуты в красную или голубую сторону по сравнению с их нормальным положением в спектре Солнца. Он правильно интерпретировал это как эффект Доплера, связанный с движением звезды от Земли или к Земле. Например, длина волны каждой темной линии в спектре звезды Капелла больше, чем длина волны соответствующей темной линии в спектре Солнца на 0,01 процента; такой сдвиг в красную сторону указывает на то, что Капелла удаляется от нас со скоростью, составляющей 0,01 процента скорости света, т. е. 30 км/с. В последующие десятилетия эффект Доплера был использован для определения скорости солнечных протуберанцев, двойных звезд и колец Сатурна.

Методу измерения скорости путем наблюдения доплеровских сдвигов присуща чрезвычайная точность, так как длины волн спектральных линий могут быть измерены с колоссальной точностью; вполне обычно встретить в таблицах длины волн, приведенные с восемью значащими цифрами. Кроме того, этот метод сохраняет свою точность независимо от расстояния до источника света, если только количества света достаточно для того, чтобы отделить спектральные линии от фона излучения ночного неба.

Именно благодаря использованию эффекта Доплера мы знаем типичные скорости звезд, упомянутые в начале этой главы. Эффект Доплера дает нам также ключ к определению

расстояния до ближайших звезд: если мы что-то предположим относительно направления движения звезды, то доплеровский сдвиг даст возможность определить ее скорость как поперек, так и вдоль нашего луча зрения, и тогда изменение кажущегося движения звезды по небосводу позволит узнать, как далеко от нас находится звезда. Но эффект Доплера начал давать результаты, имеющие значение для космологии, лишь тогда, когда астрономы стали изучать спектры объектов, находящихся на значительно большем расстоянии, чем видимые звезды. Я немного расскажу об открытии этих объектов, а затем опять вернусь к эффекту Доплера.

Мы начали эту главу со взгляда на ночное небо. Кроме Луны, планет и звезд на небе есть два других видимых объекта, о которых я должен упомянуть и которые чрезвычайно важны для космологии.

Один из этих объектов так бросается в глаза и так сверкает, что иногда виден даже сквозь дымку ночного неба в городе. Эта полоса огней, протянувшаяся по огромному кругу через всю небесную сферу, с древних пор известна как Млечный путь. В 1750 году английский механик Томас Райт опубликовал примечательную книгу «Теория происхождения или новая гипотеза о Вселенной», в которой он предположил, что все звезды находятся в плоской пластине, «жернове», конечной толщины, но простирающейся на большие расстояния во всех направлениях. Солнечная система лежит внутри пластины, поэтому естественно, что, когда мы смотрим с Земли вдоль плоскости пластины, мы видим значительно больше света, чем когда мы смотрим в любом другом направлении. Именно такую картину мы наблюдаем как Млечный Путь.

vfoto02.eps

Млечный путь в СТРЕЛЬЦЕ.

Млечный Путь в направлении центра нашей Галактики в созвездии Стрельца. Очевидна сплюснутость Галактики. Темные области, бегущие через плоскость Млечного Пути, возникают от облаков пыли, которая поглощает свет, находящихся позади нее звезд (фотография Хейльской обсерватории).

vfoto04.eps

БОЛЬШАЯ ГАЛАКТИКА М 31 в АНДРОМЕДЕ.

Это ближайшая к нам большая галактика. Два ярких пятна сверху справа и ниже центра — более маленькие галактики NGC 205 и 221, удерживаемые на орбите гравитационным полем галактики М 31. Другие яркие пятна на фотографии — более близкие объекты, звезды внутри нашей собственной Галактики, которые оказались лежащими между Землей и М 31. Фотография была сделана с помощью 48-дюймового телескопа на горе Паломар (фотография Хейльской обсерватории).

Прошло много времени, прежде чем теория Райта подтвердилась. Сейчас считается, что Млечный Путь представляет собой плоский диск из звезд диаметром 80 000 световых лет и толщиной 6 000 световых лет. Он также обладает сферическим звездным ореолом, имеющим диаметр почти 100 000 световых лет. Полная масса обычно оценивается примерно в 100 миллиардов солнечных масс, но некоторые астрономы полагают, что масса окружающего ореола может быть значительно больше. Солнечная система находится на расстоянии около 30 000 световых лет от центра диска и расположена слегка к «северу» от его центральной плоскости. Этот диск вращается со скоростью, достигающей 250 км/с, и имеет гигантские спиральные рукава. В целом, великолепное зрелище, если бы мы могли его видеть снаружи! Вся эта система обычно называется Галактикой или, если смотреть на вещи шире, нашей Галактикой.

Другие интересные с точки зрения космологии детали ночного неба видны значительно хуже, чем Млечный Путь. В созвездии Андромеды имеется туманное пятнышко, которое нелегко увидеть, но все же вполне ясно можно различить в хорошую ночь, если только знать, куда надо смотреть. Первое письменное упоминание об этом объекте содержится в списке «Книги неподвижных звезд», составленном в 946 году персидским астрономом Абдурахманом Аль-Суфи. Он описал его как «маленькое облачко». После того как появились телескопы, стали открывать все больше и больше таких удаленных объектов, и астрономы семнадцатого и восемнадцатого веков обнаружили, что они постоянно попадают на глаза при поисках, казавшихся в то время значительно более интересными,

объектов — комет. Чтобы дать удобный список объектов, на которые *не надо* смотреть, охотясь за кометами, Шарль Мессье опубликовал в 1781 году знаменитый каталог «Туманности и звездные скопления». До сих пор астрономы ссылаются на 103 объекта в этом каталоге по присвоенным им Мессье номерам: так, туманность Андромеды есть М 31, Крабовидная туманность — М 1 и т. д.

vfoto05.eps

ДЕТАЛЬ ГАЛАКТИКИ АНДРОМЕДА.

Показана одна часть галактики М 31 Андромеда, соответствующая нижнему правому углу («южная область») на предыдущей фотографии. Сделанная с помощью 100-дюймового телескопа на горе Маунт-Вильсон, эта фотография имеет достаточное разрешение, чтобы выделить отдельные звезды в спиральных рукавах М 31. Именно изучение Хабблом таких звезд в 1923 году окончательно показало, что М 31 есть галактика, более или менее похожая на нашу, а не внешняя часть нашей Галактики (фотография Хейльской обсерватории).

vfoto03.eps

СПИРАЛЬНАЯ ГАЛАКТИКА М 104.

Это — гигантская система из более чем ста миллиардов звезд, очень похожая на нашу собственную Галактику, но удаленная от нас примерно на 60 миллионов световых лет. С нашей точки зрения М 104 видна почти сбоку, и ясно различаются как яркий сферический ореол, так и плоский диск. Диск пересечен темными полосами пыли, очень похожими на пылевые области нашей собственной Галактики, как показано на предыдущей фотографии. Эта фотография сделана с помощью 60-дюймового рефлектора в обсерватории Маунт-Вильсон, Калифорния (фотография Йеркской обсерватории).

Даже во времена Мессье было ясно, что эти удаленные объекты не все одинаковы. Некоторые с очевидностью были скоплениями звезд, вроде Плеяд (М 45). Другие были неправильной формы облаками светящегося газа, часто окрашенными и зачастую связанными с одной или более звездами, вроде Гигантской туманности в созвездии Ориона (М 42). Сегодня мы знаем, что объекты этих двух типов находятся внутри нашей Галактики, и они нас далее занимать не будут. Однако около трети объектов в каталоге Мессье были белыми туман-

ностями довольно правильной эллиптической формы, из которых наиболее заметной была туманность Андромеды (М 31). С развитием телескопов были найдены еще тысячи подобных объектов, а к концу девятнадцатого века у некоторых из них обнаружили рукава, в том числе у М 31 и М 33. Однако лучшие телескопы восемнадцатого и девятнадцатого веков не могли разделить эллиптические или спиральные туманности на отдельные звезды, и поэтому природа их оставалась неизвестной. Кажется, Иммануил Кант был первым, кто предположил, что некоторые из туманностей — это галактики*, похожие на нашу. Развивая теорию Млечного Пути Райта, Кант в 1755 году в своей «Универсальной естественной истории и теории неба» предположил, что туманности «или, скорее, некоторые их разновидности» представляют собой в действительности круглые диски примерно тех же размеров и формы, что и наша собственная Галактика. Они кажутся эллиптическими, потому что большинство из них наблюдается под углом, и, конечно, они еле видны, потому что находятся очень далеко от нас.

Идея о том, что Вселенная заполнена галактиками похожими на нашу, стала к началу девятнадцатого века широко распространенной, хотя, без сомнения, не общепринятой. Однако оставалась открытой возможность, что эти эллиптические и спиральные туманности окажутся просто облаками внутри нашей собственной Галактики, как и другие объекты в каталоге Мессье. Одним большим источником сомнений было наблюдение взрывающихся звезд в некоторых спиральных туманностях. Если эти туманности действительно представляли собой независимые галактики, слишком далекие от нас, чтобы выделить в них отдельные звезды, то тогда подобные взрывы должны были быть чудовищно мощными, чтобы иметь такую яркость на столь громадных расстояниях. В связи с этим, я не могу удержаться от того, чтобы не процитировать один образец научной прозы девятнадцатого века в пору ее зрелости. Английский историк астрономии Агнес Мери Клерк отмечала в 1893 году:

«Хорошо известная туманность в Андромеде и гигантская

*Заметьте, что нашу Галактику принято писать с прописной буквы, а другие галактики — со строчной. — *Прим. ред.*

спираль в Гончих Псах находятся в ряду наиболее примечательных из тех, что дают непрерывный спектр; и, как общее правило, к этому же типу относятся излучения всех подобных туманностей, представляемых как феномен звездных скоплений, смутно виднеющихся на огромных расстояниях. Было бы, однако, чересчур поспешным заключить, что туманности действительно являются скоплениями таких солнцеподобных тел. Невероятность подобного вывода весьма усиливается фактом возникновения с интервалом в четверть века звездных вспышек в двух из них. Ибо практически очевидно, что, как бы ни были далеки туманности, звезды удалены от нас в равной степени; следовательно, если составными частями первых являются солнца, то те чудовищно большие расстояния, на которых почти исчезает их слабый свет, должны быть, как показал м-р Проктор, величинами такого масштаба, которые с ужасом отвергает наше воображение...

Сегодня мы знаем, что эти звездные вспышки и в самом деле представляются «величинами такого масштаба, которые с ужасом отвергает наше воображение». Это — сверхновые, т.е. взрывы, в которых одна звезда достигает светимости целой галактики. Но все это не было известно в 1893 году.

Вопрос о природе спиральных и эллиптических туманностей не может быть разрешен без какого-то надежного способа определения того, насколько они далеки от нас. Такой критерий был наконец найден после завершения строительства студийного телескопа в обсерватории Маунт-Вилсон, вблизи Лос-Анджелеса. В 1923 году Эдвин Хаббл впервые смог выделить отдельные звезды в туманности Андромеды. Он обнаружил, что спиральные рукава этой туманности содержат несколько ярких переменных звезд с тем же типом периодического изменения светимости, который был уже известен для некоторого класса звезд нашей Галактики, называемых цефеидами. Это открытие было столь важным по той причине, что в предыдущее десятилетие в работах Генриетты Сван Ливитт и Харлоу Шепли из обсерватории Гарвардского колледжа была показана тесная связь между наблюдаемыми периодами изменения цефеид и их абсолютными светимостями.

(Абсолютной светимостью называется полная мощность излучения, испускаемого астрономическим объектом во всех направлениях. Видимая светимость есть мощность излучения, принимаемая нами на каждый квадратный сантиметр зеркала телескопа. Именно видимая, а не абсолютная светимость определяет субъективную степень яркости астрономического объекта. Конечно, видимая светимость зависит не только от абсолютной светимости, но и от расстояния; таким образом, зная как абсолютную, так и видимую светимость астрономического тела, мы можем вычислить расстояние до него). Хаббл, наблюдая видимую светимость цефеид в туманности Андромеды и определяя их абсолютную светимость по их периодам, смог немедленно вычислить расстояние до них и, следовательно, расстояние до туманности Андромеды, используя простое правило, что видимая светимость пропорциональна абсолютной светимости и обратно пропорциональна квадрату расстояния. Его вывод заключался в том, что туманность Андромеды находится на расстоянии 900 000 световых лет, то есть более чем в десять раз дальше, чем самые удаленные объекты нашей Галактики. Ряд пересчетов соотношения период–светимость для цефеид, сделанных Вальтером Бааде и другими, привел в настоящее время к увеличению расстояния до туманности Андромеды до величины свыше двух миллионов световых лет, но уже в 1923 году был ясен основной вывод: туманность Андромеды и тысячи подобных ей туманностей представляют собой галактики, похожие на нашу и заполняющие Вселенную во всех направлениях вплоть до огромных расстояний.

Еще до установления внегалактической природы туманностей астрономы смогли сопоставить линии их спектров с известными линиями хорошо знакомых атомных спектров. Однако в период между 1910 и 1920 годами Весто Мелвин Слайфер из обсерватории в Лоуэлле обнаружил, что спектральные линии многих туманностей слегка сдвинуты в красную или голубую сторону. Эти сдвиги немедленно были интерпретированы как обязанные эффекту Доплера, откуда следовало, что туманности движутся либо от Земли, либо к Земле. Например,

было найдено, что туманность Андромеды движется к Земле со скоростью около 300 километров в секунду, в то время как более далекое скопление галактик в созвездии Девы движется от Земли со скоростью около 1000 км/с.

Поначалу думали, что эти скорости могут быть просто относительными скоростями, отражающими движение нашей Солнечной системы в направлении одних галактик и прочь от других. Однако такое объяснение стало неприемлемым после того, как было обнаружено все больше и больше спектральных сдвигов, причем все — в красную сторону спектра. Оказалось, что, за исключением нескольких ближайших к нам галактик, вроде туманности Андромеды, все другие галактики разлетаются от нашей. Конечно, это не означает, что наша Галактика занимает какое-то выделенное, центральное положение. Скорее, это выглядит так, будто Вселенная испытывает состояние какого-то взрыва, при котором каждая галактика летит прочь от любой другой галактики.

Такая интерпретация стала общепринятой после 1929 года, когда Хаббл объявил об открытии того, что красные смещения галактик растут примерно пропорционально их расстоянию до нас. Важность этого наблюдения состоит в том, что именно такое явление мы можем предсказать в соответствии с простейшей возможной картиной разлета материи во взрывающейся Вселенной.

Интуитивно следует ожидать, что в любой данный момент времени Вселенная должна выглядеть одинаково для наблюдателей на всех типичных галактиках, в каком бы направлении они ни смотрели. (Здесь и далее я буду использовать термин «типичная галактика» для обозначения таких галактик, у которых нет никаких больших необычных собственных движений и которые просто несутся в общем космическом потоке галактик.) Такая гипотеза столь естественна (по крайней мере, со времен Коперника), что английским астрофизиком Эдвардом Артуром Милном была названа Космологическим Принципом.

Примененный к самим галактикам Космологический Принцип требует, чтобы наблюдатель на типичной галактике видел все другие галактики движущимися с одним и тем

же распределением скоростей независимо от того, вместе с какой из типичных галактик несется наблюдатель. Прямым математическим следствием этого принципа является то, что относительная скорость любых двух галактик должна быть пропорциональна расстоянию между ними, что и обнаружил Хаббл.

Чтобы увидеть это, рассмотрим три типичные галактики A , B и C , расположенные вдоль прямой линии (рис. 1). Предположим, что расстояние между A и B такое же, как и между B и C . Какова бы ни была скорость B по отношению к A , Космологический Принцип требует, чтобы C имела ту же скорость по отношению к B . Но заметьте при этом, что C , которая вдвое дальше от A , чем B , движется вдвое быстрее по отношению к A , чем по отношению к B . Мы можем еще добавить галактик в нашу цепочку, но результат будет все тот же: скорость удаления любой галактики по отношению к любой другой галактике пропорциональна расстоянию между ними.

[bb=0 0 93.0mm 35.5mm]v01.pcx

Рис. 1. Однородность и закон ХАББЛА.

Показана цепочка равноудаленных галактик Z , A , B , $C \dots$, причем длина и направление сплошных стрелок соответствуют скорости, измеренной по отношению к A , или B , или C . Принцип однородности требует, чтобы скорость C , наблюдаемая из B , равнялась скорости B , наблюдаемой из A ; сложение этих двух скоростей дает скорость C , наблюдаемую из A , которая отмечена вдвое более длинной стрелкой. Продолжая рассуждать подобным образом, мы можем заполнить все поле скоростей, указанное на рисунке. Как видно, скорости подчиняются закону Хаббла: скорость любой галактики, которая видна из любой другой галактики, пропорциональна расстоянию между ними. Это единственное распределение скоростей, совместимое с принципом однородности.

Как часто случается в науке, этот аргумент можно использовать как в ту, так и в другую сторону. Хаббл, наблюдая пропорциональность между расстояниями до галактик и их скоростями удаления от нас, неявно подтвердил справедливость Космологического Принципа. Это весьма удовлетворительно с философской точки зрения: действительно, почему какая-то часть Вселенной или какое-то направление в ней должны отличаться от любых других? Кроме того, укрепля-

ется наша уверенность в том, что астрономы видят на самом деле достаточно заметную часть Вселенной, а не местный маленький водоворот в грандиозном космическом Мальстреме*. В то же время мы можем на априорных основаниях принять справедливость Космологического Принципа и затем вывести соотношение пропорциональности между расстоянием и скоростью, как это сделано в предыдущем абзаце. Действуя таким образом, мы с помощью относительно простого измерения доплеровских сдвигов получаем возможность судить о расстоянии до очень удаленных объектов по их скорости.

[bb=0 0 64.2mm 37.3mm]v02.pcx

Рис. 2. Изотропия и однородность.

Если Вселенная изотропна как по отношению к галактике 1, так и по отношению к галактике 2, тогда она однородна. Чтобы показать, что условия в двух произвольных точках A и B одинаковы, проведем окружность через точку A вокруг галактики 1 и другую окружность через точку B вокруг галактики 2. Изотропия вокруг галактики 1 требует, чтобы условия в точке A и в точке C , где окружности пересекаются, были одинаковы. Аналогично изотропия вокруг галактики 2 требует, чтобы были одинаковыми условия в точках B и C . Следовательно, эти условия одинаковы в точках A и B .

Космологический Принцип подтверждается и наблюдениями другого рода, помимо измерений доплеровских сдвигов. Если сделать надлежащую скидку на те искажения, которые связаны с нашей Галактикой и многочисленными близлежащими скоплениями галактик в созвездии Девы, то Вселенная оказывается существенно изотропной; это значит, что она выглядит одинаково во всех направлениях. (Это еще более убедительно подтверждается микроволновым фоном излучения, речь о котором пойдет в следующей главе). Но уже со времен Коперника мы научились остерегаться предположений о том, что имеется что-то особенное в местоположении человечества во Вселенной. Следовательно, если Вселенная изотропна вокруг нас, она должна быть изотропна и вокруг любой типич-

* Мальстрем — сильное течение с водоворотами, образующееся во время приливов в уости между Лофотенскими островами вблизи берегов Норвегии. — *Прим. пер.*

ной галактики. Однако любая точка во Вселенной может быть перенесена в любую другую точку последовательностью вращений вокруг фиксированных центров (рис. 2), поэтому, если Вселенная изотропна вокруг любой точки, то с необходимостью она и однородна.

Прежде чем двигаться дальше, следует сделать ряд оговорок относительно Космологического Принципа. Во-первых, он, очевидно, не верен на малых расстояниях — мы находимся в Галактике, принадлежащей к маленькой местной группе других галактик (включая М 31 и М 33), которая, в свою очередь, находится вблизи от грандиозного скопления галактик в Деве. На самом деле, из 33 галактик в каталоге Мессье почти половина находится на маленьком участке неба в созвездии Девы. Космологический Принцип, если он вообще справедлив, начинает играть роль лишь тогда, когда мы рассматриваем Вселенную в масштабе, по крайней мере, таком же большом, как расстояние между скоплениями галактик, то есть около 100 миллионов световых лет*.

Есть и другая оговорка. Используя Космологический Принцип для вывода соотношения пропорциональности между галактическими скоростями и расстояниями, мы предполагали, что если скорость C относительно B та же, что и скорость B относительно A , то скорость C относительно A в два раза больше. Это то обычное правило сложения скоростей, которое знакомо всем, и оно, безусловно, хорошо работает для относительно малых скоростей, встречающихся в обыденной жизни. Однако это правило должно нарушаться для скоростей, приближающихся к скорости света (300 000 километров в секунду), так как в противном случае, складывая ряд относительных скоростей, мы могли бы получить полную скорость больше, чем скорость света, что запрещено специальной теорией относительности Эйнштейна. Например, обычное правило сложения скоростей утверждало бы, что если пассажир самолета, летящего со скоростью, равной трем четвертям скорости света, выстрелит в направлении движения пулей, ле-

*Лучше взять 300 миллионов световых лет и более в качестве расстояния, начиная с которого справедлив Космологический Принцип. — *Прим. ред.*

тящей также со скоростью в три четверти скорости света, то скорость пули по отношению к земле будет в полтора раза больше скорости света, что невозможно. Специальная теория относительности разрешает эту проблему изменением закона сложения скоростей: скорость C относительно A оказывается в действительности несколько *меньше*, чем сумма скорости B относительно A и скорости C относительно B , так что независимо от того, сколько раз мы складываем скорости, меньшие скорости света, мы никогда не получим скорость, большую скорости света.

Все это не представляло проблемы для Хаббла в 1929 году; ни одна из тех галактик, которые он тогда изучал, не имела скорости, сколь-нибудь близкой к скорости света. Тем не менее, когда космологи начинают думать о действительно больших расстояниях, характерных для Вселенной в целом, они должны мыслить в рамках специальной и общей теории относительности Эйнштейна. На самом деле, когда мы сталкиваемся со столь большими расстояниями, само понятие расстояния становится неоднозначным и необходимо уточнять, имеем ли мы в виду расстояния, измеренные наблюдением светимостей, или диаметров, или собственных движений, или чего-то еще.

Вернемся к 1929 году. Хаббл определил расстояния до 18 галактик по видимым светимостям их ярчайших звезд и затем сравнил эти расстояния с соответствующими скоростями галактик, определенными спектроскопически по их доплеровским сдвигам. Его заключение состояло в том, что имеется «приблизительно линейное соотношение» (т. е., попросту, пропорциональность) между скоростями и расстоянием. В действительности, взгляд на данные Хаббла оставляет меня в полном недоумении: как ему удалось сделать такое заключение, ведь галактические скорости кажутся совершенно не связанными с их расстояниями, имеется лишь слабый намек на рост скоростей с увеличением расстояния. На самом деле, мы и *не должны ожидать*, что для этих 18 галактик выполняется точное соотношение пропорциональности между скоростью и расстоянием, — все они слишком близки, ни одна не находится дальше, чем скопление в Деве. Трудно избежать заключения,

что, опираясь либо на простые аргументы, изложенные выше, либо на соответствующие теоретические достижения, которые будут обсуждаться ниже, Хаббл просто знал тот ответ, который хотел получить.

Как бы там ни было, но к 1931 году данные заметно улучшились и Хаббл смог проверить пропорциональность между скоростью и расстоянием для галактик, имеющих скорость до 20 000 км/с. Вместе с доступными тогда оценками расстояний это приводило к выводу, что скорость возрастает на 170 км/с на каждый миллион световых лет расстояния; следовательно, скорость 20 000 км/с соответствует расстоянию 120 миллионов световых лет. Это число, равное отношению приращения скорости к приращению расстояния, общеизвестно как «постоянная Хаббла». (Она постоянна в том смысле, что пропорциональность между скоростью и расстоянием одинакова для всех галактик в данный момент времени, но, как мы увидим, постоянная Хаббла изменяется со временем в процессе эволюции Вселенной).

В 1936 году Хаббл, работая вместе со спектроскопистом Милтоном Хьюмасоном, смог измерить расстояние и скорость для скопления галактик Большая Медведица II. Было найдено, что это скопление удаляется со скоростью 42 000 км/с (14 процентов скорости света). Расстояние, оцененное тогда в 260 миллионов световых лет, соответствовало пределу возможностей телескопа Маунт-Вилсон, и работа Хаббла должна была остановиться. С вводом в действие после войны больших телескопов в обсерваториях Паломар и Маунт-Гамильтон другие астрономы возвратились к программе Хаббла (особенно Аллан Сэндейдж в обсерваториях Паломар и Маунт-Вилсон), и эта работа продолжается по сей день.

Общий вывод, сделанный в результате полувековых наблюдений, заключается в том, что галактики удаляются от нас со скоростями, пропорциональными расстоянию (по крайней мере, для скорости, не слишком близкой к скорости света). Конечно, как уже отмечалось, при нашем обсуждении Космологического Принципа это не означает, что мы находимся в каком-то специально выбранном или, напротив, неудачном месте в космосе; *любая* пара галактик разлетается

с относительной скоростью, пропорциональной разделяющему галактики расстоянию. Наиболее важным изменением первоначальных выводов Хаббла явился пересмотр шкалы внегалактических расстояний; отчасти в результате пересчета соотношения период — светимость для цефеид Ливитт-Шепли, сделанного Вальтером Бааде и другими, оценки расстояний до далеких галактик дают в настоящее время цифры, примерно в десять раз большие, чем представлялось во времена Хаббла. Таким образом, сейчас считается, что постоянная Хаббла равна только примерно 15 км/с на миллион световых лет.

Что все это говорит нам о происхождении Вселенной? Если галактики разлетаются друг от друга, то когда-то они должны были быть ближе друг к другу. Точнее, если бы их скорости были постоянными, то время, необходимое для того, чтобы любая пара галактик достигла теперешнего взаимного удаления, как раз равнялось бы теперешнему расстоянию между ними, деленному на их относительную скорость. Но если скорость пропорциональна теперешнему расстоянию между галактиками, то это время одинаково для любой пары галактик — они все должны были быть близко друг к другу в один и тот же момент времени в прошлом! Принимая постоянную Хаббла равной 15 км/с на миллион световых лет, получаем, что время, прошедшее с тех пор, как галактики начали разлетаться, должно равняться миллиону световых лет, деленному на 15 км/с , или 20 миллиардов лет. Мы будем называть «возраст», вычисленный таким способом, «характерным временем расширения»; это есть просто обратная величина постоянной Хаббла. Истинный возраст Вселенной в действительности *меньше* характерного времени расширения, потому что, как мы увидим далее, галактики не двигались с постоянной скоростью, а несколько замедлялись под влиянием взаимного тяготения. Поэтому если постоянная Хаббла равна 15 км/с на миллион световых лет, то возраст Вселенной должен быть меньше, чем 20 миллиардов лет.

Иногда мы все это суммируем, говоря кратко, что размер Вселенной увеличивается. Это не означает, что Вселенная обязательно имеет конечный размер, хотя такое и возможно. Подобное выражение используется потому, что в любой задан-

ный момент времени расстояние между любой парой типичных галактик увеличивается на одну и ту же относительную величину. За любой интервал времени, который достаточно мал для того, чтобы галактические скорости оставались примерно постоянными, увеличение расстояния между любой парой типичных галактик дается произведением их относительной скорости и интервала времени или, если использовать закон Хаббла, произведением постоянной Хаббла на расстояния между галактиками и времени. Но тогда *отношение* увеличения расстояния к самому расстоянию будет равно произведению постоянной Хаббла и пройденного времени, которое одинаково для любой пары галактик. Например, за промежуток времени, равный одному проценту характерного времени расширения (обратной величины постоянной Хаббла), расстояние между каждой парой типичных галактик увеличивается на один процент. Мы можем тогда сказать, выражаясь несколько небрежно, что размер Вселенной увеличился на один процент.

Я не хочу создавать впечатления, что все согласны с такой интерпретацией красного смещения. Ведь на самом деле мы не наблюдаем разбегающихся от нас галактик; все, в чем мы уверены, это то, что линии их спектров смещены в красную сторону, т. е. в сторону больших длин волн. Есть выдающиеся астрономы, которые сомневаются в том, что красные смещения имеют какое-то отношение к доплеровским сдвигам или к расширению Вселенной. Хальтон Арп из Хейльской обсерватории подчеркивал существование групп галактик, в которых некоторые галактики имеют красные смещения, сильно отличающиеся от остальных; если такие группы представляют собой реальные физические ассоциации соседних галактик, то едва ли они могут иметь сильно различающиеся скорости. Кроме того, Маартен Шмидт обнаружил в 1963 году, что некоторый класс объектов, хотя и имеет вид звезд, тем не менее обладает чудовищными красными смещениями, превышающими в некоторых случаях 300 процентов! Если такие «квазизвездные объекты» действительно так далеки, как указывают их красные смещения, они должны излучать грандиозные количества энергии для того, чтобы быть столь яркими.

Наконец, совсем нелегко определить связь между скоростью и расстоянием на действительно больших расстояниях.

Существует, однако, независимый способ подтверждения того, что галактики на самом деле разлетаются так, как указывают их красные смещения. Как мы видели, эта интерпретация красных смещений приводит к выводу, что расширение Вселенной началось чуть меньше, чем 20 миллиардов лет назад. Следовательно, такая интерпретация подтвердится, если мы сможем найти любое другое свидетельство того, что Вселенная действительно имеет такой возраст. И в самом деле, имеется довольно много фактов, подтверждающих, что возраст нашей Галактики примерно 10–15 миллиардов лет. Такие оценки возникают как из анализа относительного содержания различных радиоактивных изотопов на Земле (особенно изотопов урана ^{235}U и ^{238}U), так и из расчета эволюции звезд. Определенно нет никакой прямой связи между скоростью радиоактивного распада или звездной эволюцией и красным смещением далеких галактик, поэтому такое совпадение делает весьма убедительным заключение, что возраст Вселенной, выведенный из постоянной Хаббла, действительно близок к истинному значению.

С исторической точки зрения интересно в связи с этим напомнить, что в 30-е и 40-е годы считали, что постоянная Хаббла значительно больше — около 170 км/с на миллион световых лет. Согласно нашим предыдущим рассуждениям, возраст Вселенной будет тогда равен одному миллиону световых лет, деленному на 170 км/с, что составляет около двух миллиардов лет или даже меньше, если мы примем во внимание гравитационное торможение. Но со времен изучения радиоактивности лордом Резерфордом было хорошо известно, что Земля значительно старше этого возраста; сейчас принято считать возраст Земли равным 4,6 миллиардов лет! Едва ли Земля может быть старше Вселенной, поэтому астрономы вынуждены были сомневаться в том, что красное смещение что-то говорит нам о возрасте Вселенной. Некоторые из наиболее хитроумных космологических идей 30-х и 40-х годов, включая, возможно, и теорию стационарного состояния, были порождены этим явным парадоксом. Может быть, именно

устранение в 50-е годы парадокса возраста, благодаря десятикратному увеличению шкалы внегалактических расстояний, было существенным предварительным условием для появления космологии большого взрыва в качестве стандартной модели.

Та картина Вселенной, которую мы здесь описываем, представляет собой расширяющийся рой галактик. До сих пор свет играл для нас лишь роль «звездного посланца», несущего информацию о галактических расстояниях и скоростях. Однако в ранней Вселенной были совсем другие условия; как мы увидим, именно свет был главной составной частью Вселенной, а обычное вещество играло роль пренебрежимо малой примеси. Поэтому позднее нам пригодится, если сейчас мы повторим, что мы узнали о красном смещении в терминах поведения световых волн в расширяющейся Вселенной.

Рассмотрим световую волну, распространяющуюся между двумя типичными галактиками. Расстояние между галактиками равно времени распространения света, умноженному на скорость света, а увеличение этого расстояния за время путешествия света равно времени распространения света, умноженному на относительную скорость галактик. Когда мы вычисляем относительный рост взаимного расстояния, мы делим увеличение расстояния на среднее значение этого расстояния за время увеличения и находим, что при этом время распространения света сокращается: относительное увеличение расстояния между этими двумя галактиками (а следовательно, между любыми другими типичными галактиками) за время распространения света есть просто отношение относительной скорости галактик к скорости света. Но как мы видели раньше, это же отношение определяет относительное увеличение длины волны света за время его путешествия. Таким образом, *в процессе расширения Вселенной длина волны любого луча света просто увеличивается пропорционально взаимному расстоянию между типичными галактиками.* Можно представлять себе это так, будто гребни волн в процессе расширения Вселенной все дальше и дальше «растаскиваются» друг от друга. Хотя, строго говоря, наша аргументация справедлива только для малого времени распространения, но,

соединяя последовательность таких небольших путешествий в одно целое, мы вправе заключить, что вывод верен и в общем случае. Например, когда мы смотрим на галактику 3C295 и обнаруживаем, что длины волн в ее спектре на 46 процентов больше, чем в наших стандартных таблицах спектральных линий, мы можем заключить, что Вселенная сейчас на 46 процентов больше по размеру, чем она была тогда, когда свет покинул 3C295.

До этого момента мы сосредоточивали внимание на вопросах, которые физики называют кинематическими и которые связаны с описанием движения без какого-либо рассмотрения сил, управляющих этим движением. Однако в течение столетий физики и астрономы пытались понять динамику Вселенной. Неизбежно это привело к изучению космологической роли той единственной силы, которая действует между астрономическими телами, — силы тяготения.

Как и следовало ожидать, первым, кто вступил в схватку с этой проблемой, был Исаак Ньютон. В знаменитой переписке с кембриджским филологом Ричардом Бентли Ньютон утверждал, что если бы материя Вселенной была равномерно распределена в *конечной* области, то она вся должна была бы стремиться упасть к центру «и в результате образовалась бы одна большая сферическая масса». Напротив, если бы материя была равномерно рассеяна в *бесконечном* пространстве, то не было бы центра, к которому она могла бы падать. В этом случае материя могла бы соединяться в бесконечное число сгустков, рассеянных по Вселенной; Ньютон предположил, что именно это могло быть причиной происхождения Солнца и звезд.

Трудность рассмотрения вопросов динамики бесконечной среды^{*} в значительной степени парализовала дальнейший прогресс вплоть до появления общей теории относительности. Здесь не место объяснять эту теорию, во всяком случае, оказалось, что она менее важна для космологии, чем думали первоначально. Достаточно сказать, что Альберт Эйнштейн ис-

^{*}Краткое изложение того, как ньютонова механика может быть применена к рассмотрению бесконечных систем, дано в дополнении редактора 1 (с. 182). — *Прим. ред.*

пользовал существующую математическую теорию неевклидовой геометрии для того, чтобы объяснить тяготение как эффект искривления пространства и времени. В 1917 году, через год после завершения общей теории относительности, Эйнштейн попытался найти решение своих уравнений, которое описывало бы пространственно-временную геометрию Вселенной в целом. Следуя имевшим тогда хождение космологическим идеям, Эйнштейн специально искал решение, которое было бы однородным, изотропным и, к сожалению, *статичным*. Однако такого решения найти не удалось. Чтобы построить модель, удовлетворявшую указанным предварительным космологическим требованиям, Эйнштейн вынужден был «изуродовать» свои уравнения введением члена, так называемой космологической постоянной, который сильно портил элегантность первоначальной теории, но мог служить для уравновешивания силы гравитационного притяжения на больших расстояниях.

Эйнштейновская модель Вселенной была совершенно статичной и предсказывала отсутствие красных смещений. В том же 1917 году голландский астроном де Ситтер нашел другое решение модифицированной теории Эйнштейна. Хотя это решение было тоже статичным и потому приемлемым в соответствии с тогдашними космологическими идеями, его примечательной особенностью было предсказание красного смещения, пропорционального расстоянию! Европейские астрономы не знали тогда о существовании значительных красных смещений у туманностей. Однако в конце первой мировой войны новости из Америки о наблюдении больших красных смещений достигли Европы, и модель де Ситтера немедленно приобрела широкую известность. Действительно, в 1922 году, когда английский астроном Артур Эддингтон написал первую исчерпывающую книгу по общей теории относительности, он проанализировал существовавшие данные по красным смещениям, пользуясь моделью де Ситтера. Сам Хаббл говорил, что именно модель де Ситтера привлекла внимание астрономов к важности определения зависимости красных смещений от расстояния и, может быть, эту модель держал он в глубине своего сознания, когда обнаружил в 1929 году пропорциональ-

ность красных смещений расстоянию.

В наши дни такой упор на модель де Ситтера представляется неоправданным. С одной стороны, это на самом деле вообще не статическая модель — она кажется статической благодаря своеобразному способу введения пространственных координат, но расстояние между «типичными» наблюдателями в этой модели реально растет со временем, и именно это общее разбегание обуславливает красные смещения. С другой стороны, причина того, почему в модели де Ситтера красное смещение оказалось пропорциональным расстоянию, заключается просто в том, что эта модель удовлетворяет Космологическому Принципу, а, как мы видели, в *любой* теории, удовлетворяющей этому принципу, следует ожидать пропорциональности относительной скорости и расстояния.

Во всяком случае, открытие разбегания далеких галактик вскоре повысило интерес к космологическим моделям, которые были однородны и изотропны, но нестатичны. Космологическая постоянная оказалась поэтому уже ненужной в уравнениях гравитационного поля, и Эйнштейн даже выразил сожаление, что он вообще рассматривал подобное изменение своих исходных уравнений. В 1922 году советским математиком Александром Фридманом было найдено общее однородное и изотропное решение первоначальных уравнений Эйнштейна*. Именно эти фридмановские модели, основанные на исходных уравнениях поля Эйнштейна, а не модели Эйнштейна и де Ситтера, обеспечили математический фундамент большинству современных космологических теорий.

Существует два разных типа моделей Фридмана.

Если средняя плотность материи во Вселенной *меньше* некоторой критической величины или равна ей, то тогда Вселенная должна быть пространственно бесконечной. В этом случае современное расширение Вселенной будет продолжаться всегда.

В то же время, если плотность материи во Вселенной *больше* той же критической величины, тогда гравитационное поле, порожденное материей, искривляет Вселенную, замыкая ее на себя; Вселенная в этом случае конечна, хотя и неограничена,

* Краткую справку о жизни и деятельности А. А. Фридмана можно найти в дополнении редактора 2 (с. 186). — *Прим. ред.*

вроде поверхности сферы. (Это означает, что если мы отправимся в путешествие по прямой линии^{**}, мы не сможем добраться до какого-то угла Вселенной, а просто вернемся туда, откуда начали свой путь). Гравитационные поля достаточно сильны для того, чтобы в конце концов остановить расширение Вселенной, так что рано или поздно она начнет снова сжиматься к состоянию бесконечно большой плотности.

Критическая плотность пропорциональна квадрату постоянной Хаббла; для принятого в настоящее время значения этой постоянной (15 км/с на миллион световых лет) критическая плотность составляет $5 \cdot 10^{-30}$ грамм на кубический сантиметр, или около трех атомов водорода на тысячу литров объема пространства.

Движение любой типичной галактики в моделях Фридмана в точности напоминает движение камня, подброшенного вверх с поверхности Земли. Если камень брошен с достаточно большой скоростью или, что приводит к тому же результату, если масса Земли достаточно мала, то камень будет постоянно замедляться, но, тем не менее, сможет улететь в бесконечность. Это соответствует случаю, когда космическая плотность меньше критической плотности. Напротив, если камень подброшен с недостаточно большой скоростью, то он достигнет некоторой максимальной высоты, а затем полетит обратно вниз. Это соответствует космической плотности больше критической.

Из этой аналогии ясно, почему невозможно найти статические космологические решения уравнений Эйнштейна — ведь мы не удивляемся тому, что камень улетает от поверхности Земли или падает на нее, но вряд ли мы ожидаем увидеть этот камень неподвижно висящим в поднебесье. Эта же аналогия позволяет избежать часто встречающегося неправильного толкования понятия расширяющейся Вселенной. Галактики разлетаются не потому, что какие-то мистические силы расталкивают их, точно так же как летящий вверх ка-

^{**} Подразумевается движение по геодезической линии (длина которой между двумя точками равна кратчайшему расстоянию между ними) в искривленном пространстве. Это соответствует прямой линии в евклидовом пространстве. — *Прим. ред.*

мень в нашей аналогии не отталкивается Землей. На самом деле галактики разлетаются друг от друга потому, что они были отброшены в стороны каким-то взрывом в прошлом.

Хотя этого не понимали в 20-е годы, но многие детальные свойства моделей Фридмана могут быть количественно рассчитаны с помощью указанной аналогии, без всякого обращения к общей теории относительности. Чтобы рассчитать движение любой типичной галактики по отношению к нашей Галактике, нарисуем сферу с нашей Галактикой в центре и интересующей нас галактикой на поверхности; движение этой галактики будет таким, как будто масса Вселенной состоит только из вещества внутри сферы, а снаружи нет ничего. Дело обстоит так, как если бы мы выкопали пещеру, уходящую далеко в глубь Земли, и стали наблюдать, как в ней падают тела, — мы обнаружили бы, что ускорение свободного падения по направлению к центру Земли зависит только от массы вещества, находящегося ближе к центру, чем наша пещера, т. е. будто поверхность Земли находится на дне пещеры. Этот примечательный результат воплощен в теореме, справедливой как в ньютоновой, так и в эйнштейновской теории тяготения и основанной только на сферической симметрии изучаемой системы; вариант этой теоремы, выполняющийся в рамках общей теории относительности, был доказан в 1923 году американским математиком Дж. Д. Биркгофом, но ее значение для космологии не было осознано в течение десятилетий.

[bb=0 0 66.3mm 68.6mm]v03.pcx

Рис. 3. ТЕОРЕМА БИРКГОФА И РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ.

Показан ряд галактик со скоростями по отношению к данной галактике G , отмеченными длинами и направлениями сплошных стрелок. (В соответствии с законом Хаббла эти скорости взяты пропорциональными расстоянию до G .) Теорема Биркгофа утверждает, что для вычисления движения галактики A по отношению к G , необходимо принять во внимание лишь массу, содержащуюся внутри сферы, проведенной вокруг G и проходящей через A , которая показана здесь пунктирной линией. Если A не слишком далека от G , гравитационное поле вещества внутри сферы будет умеренным и движение A можно рассчитать с помощью правил ньютоновой механики.

Мы можем использовать эту теорему для того, чтобы вычислить критическую плотность в моделях Фридмана (рис. 3). Если мы нарисуем сферу с нашей Галактикой в центре и какой-то удаленной галактикой на поверхности, то для вычисления скорости отрыва*, т. е. той скорости, которой должна обладать галактика на поверхности сферы, чтобы иметь возможность удалиться в бесконечность, нам надо учесть массу галактик внутри сферы. Оказывается, что эта скорость отрыва пропорциональна радиусу сферы — чем массивнее сфера, тем быстрее нужно двигаться, чтобы оторваться от нее. Но закон Хаббла утверждает, что действительная скорость галактики на поверхности сферы также пропорциональна радиусу сферы, т. е. расстоянию до нас. Следовательно, хотя скорость отрыва зависит от радиуса, *отношение* действительной скорости галактики к скорости отрыва не зависит от размеров сферы; это отношение одинаково для всех галактик и не зависит от того, какую из них мы возьмем за центр сферы. В зависимости от значений постоянной Хаббла и космической плотности *каждая* галактика, движущаяся по закону Хаббла, либо имеет скорость больше скорости отрыва и будет удаляться в бесконечность, либо имеет скорость меньше скорости отрыва и приблизится к нам через какое-то время в будущем. Критическая плотность есть просто та величина космической плотности, при которой скорость отрыва каждой галактики в точности равна скорости, даваемой законом Хаббла. Критическая плотность может зависеть только от постоянной Хаббла, и оказывается, что она пропорциональна ее квадрату (см. математическое дополнение 2, с. 169).

Детальная временная зависимость размера Вселенной (т. е. расстояния между любыми типичными галактиками) может быть получена с помощью аналогичных аргументов, но результат оказывается довольно сложным (рис. 4). Однако имеется один простой результат, который будет позднее очень важен для нас. В раннюю эпоху Вселенной размер ее менялся в зависимости от времени по простому степенному закону: время в степени две трети, если можно пренебречь плотностью

* В земных условиях эта скорость называется второй космической скоростью и равна 11,2 км/с. — *Прим. ред.*

[bb=0 0 57.0mm 48.9mm]v04.pcx

Рис. 4. РАСШИРЕНИЕ И СЖАТИЕ ВСЕЛЕННОЙ.

Для двух возможных космологических моделей показано взаимное расстояние между типичными галактиками (в произвольных единицах) как функция времени. В случае «открытой Вселенной» Вселенная бесконечна, плотность меньше, чем критическая плотность, и расширение, хотя и замедляясь, будет продолжаться всегда. В случае «закрытой Вселенной» Вселенная конечна, плотность больше, чем критическая плотность, и расширение в конце концов прекратится, сменившись сжатием. Эти кривые рассчитаны с помощью эйнштейновских уравнений поля без космологической постоянной для Вселенной, в которой преобладает вещество.

излучения, или время в степени одна вторая, если плотность излучения превышает плотность вещества (см. математическое дополнение 3, с. 171). Один аспект фридмановских космологических моделей, который нельзя понять без общей теории относительности, — это связь между геометрией и плотностью: Вселенная открыта и бесконечна или замкнута и конечна соответственно тому, больше или меньше скорость галактик, чем скорость отрыва.

Один из способов узнать, превышают или нет галактические скорости скорость отрыва, заключается в измерении степени их замедления. Если это замедление меньше (или больше) некоторой величины, тогда скорость отрыва достигается (или нет). На практике это означает, что нужно измерить кривизну графика зависимости красного смещения от расстояния для очень далеких галактик (рис. 5). При переходе от более плотной конечной Вселенной к менее плотной бесконечной Вселенной кривая этой зависимости становится на очень больших расстояниях более полой. Изучение формы кривой красное смещение–расстояние на больших расстояниях часто называют «программой Хаббла».

Хаббл, Сэндейдж и в последнее время ряд других ученых вложили в эту программу колоссальные усилия. До сих пор результаты были весьма неопределенны. Проблема заключается в том, что при вычислении расстояний до далеких галактик нельзя выбрать в качестве индикаторов расстояния цефеиды или ярчайшие звезды; вместо этого мы вынуждены определять расстояние по видимой светимости самих галактик. Но откуда мы знаем, что те галактики, которые мы изучаем, име-

[bb=0 0 86.4mm 65.0mm]v05.pcx

Рис. 5. КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ КАК ФУНКЦИЯ РАССТОЯНИЯ.

Здесь показано красное смещение как функция расстояния для четырех возможных космологических теорий. (Чтобы быть точным, под «расстоянием» здесь подразумевается «расстояние по светимости» — расстояние, вычисленное для объекта известной собственной или абсолютной светимости из наблюдений его видимой светимости.) Кривые, помеченные надписями «удвоенная критическая плотность», «критическая плотность» и «нулевая плотность», вычислены в модели Фридмана с использованием эйнштейновских уравнений поля для Вселенной с преобладанием вещества без космологической постоянной; они отвечают соответственно Вселенной, которая закрыта, чуть-чуть открыта и открыта (см. рис. 4). Кривая, помеченная надписью «стационарное состояние», относится к любой теории, в которой вид Вселенной не меняется со временем. Современные наблюдения находятся в плохом согласии с кривой «стационарного состояния», но они не дают возможности сделать определенный выбор среди других возможностей, так как в теориях нестационарного состояния галактическая эволюция делает очень проблематичным определение расстояния. Все кривые построены для значения постоянной Хаббла, равного 15 км/с на миллион световых лет (соответствующего характерному времени расширения 20 000 миллионов лет), но эти же кривые можно использовать для любого другого значения постоянной Хаббла путем простого изменения масштаба всех расстояний.

ют одну и ту же *абсолютную* светимость? (Напомним, что видимая светимость — это мощность излучения, принимаемая нами на единицу площади телескопа, а абсолютная светимость — полная мощность, излучаемая астрономическим объектом во всех направлениях; видимая светимость пропорциональна абсолютной светимости и обратно пропорциональна квадрату расстояния.) Имеется страшная опасность (из-за эффектов отбора) — когда мы смотрим все дальше и дальше, мы стремимся отобрать галактики со все большими и большими абсолютными светимостями. Еще более тяжелой проблемой является эволюция галактик. Когда мы смотрим на очень далекие галактики, мы видим их такими, какими они были миллиарды лет назад, когда световые лучи начали свое путешествие к нам. Если типичные галактики тогда были ярче, чем сейчас, то мы недооцениваем истинное расстояние до них. Одна из возможностей, обсуждавшаяся совсем недавно Дж. П. Острикером и С. Д. Тримейном из Принстона, заключается в том, что наиболее крупные галактики эволюциониру-

ют не только потому, что эволюционируют отдельные звезды в них, но и потому, что эти галактики пожирают маленькие соседние галактики! Пройдет много времени, прежде чем мы сможем быть уверенными в том, что имеем адекватное количественное понимание этих различных типов галактической эволюции.

Лучший вывод, который можно в настоящее время получить из программы Хаббла, заключается в том, что замедление далеких галактик кажется довольно маленьким. Это должно означать, что галактики движутся со скоростью, превышающей скорость отрыва, так что Вселенная открыта и будет продолжать расширяться всегда. Это хорошо согласуется с оценками космической плотности; видимая материя в галактиках, как представляется, дает плотность, составляющую не более нескольких процентов критической плотности. Однако и здесь имеется большая неопределенность. По оценкам последних лет массы галактик все время возрастали.

Кроме того, как указали Джордж Филд из Гарварда и другие, может существовать межгалактический газ из ионизованного водорода, который может обеспечить критическую космическую плотность материи и который все еще ускользает от наблюдения.

К счастью, совсем не обязательно прийти к определенному решению относительно крупномасштабной геометрии Вселенной для того, чтобы делать какие-то заключения о ее начале. Причина в том, что Вселенная имеет нечто вроде горизонта и этот горизонт сужается тем быстрее, чем ближе рассматриваемый момент времени к самому началу.

Ни один сигнал не может двигаться быстрее, чем свет, поэтому в любой момент времени мы можем воспринимать события, происшедшие достаточно близко, так, чтобы луч света успел достичь нас с момента зарождения Вселенной. Любое событие, происшедшее за пределами этого расстояния, не может до сих пор оказать на нас никакого влияния — оно находится за горизонтом. Если возраст Вселенной равен 10 миллиардам лет, то горизонт находится сейчас на расстоянии 10 миллиардов световых лет. Но когда возраст Вселенной был равен нескольким минутам, горизонт был на расстоянии всего

лишь нескольких световых минут, — меньше, чем теперешнее расстояние от Земли до Солнца. Правда, и вся Вселенная была тогда меньше, в указанном нами смысле, такой, что расстояние между любой парой тел было меньше, чем сейчас. Однако, когда мы обращаемся назад к самому началу, то расстояние до горизонта сжимается быстрее, чем размер Вселенной. Размер Вселенной пропорционален времени в степени одна вторая или две трети (см. математическое дополнение 3, с. 171), в то время как расстояние до горизонта прямо пропорционально времени, так что во все более ранние времена горизонт охватывал все меньшую и меньшую часть Вселенной (рис. 6).

[bb=0 0 84.1mm 70.5mm]v06.pcx

Рис. 6. Горизонты в расширяющейся Вселенной.

Здесь символически, в виде сферы, изображена Вселенная в четыре разделенные равным промежутком момента времени. «Горизонт» данной точки P есть расстояние, из-за которого световые сигналы не успевают достичь P . Часть Вселенной внутри горизонта отмечена здесь незатененной шапочкой сферы. Расстояние от P до горизонта растет прямо пропорционально времени. В то же время «радиус» Вселенной растет как квадратный корень из времени, что отвечает случаю Вселенной с преобладанием излучения. Следовательно, во все более ранние и ранние моменты времени горизонт охватывает все меньшую и меньшую часть Вселенной.

Следствием этого сжатия горизонта в ранней Вселенной является то, что кривизна Вселенной в целом становится все менее существенной, когда мы смотрим назад на все более ранние моменты времени. Поэтому, несмотря на то что современная космологическая теория и астрономические наблюдения все еще не определили протяженность или будущее Вселенной, они дают довольно ясную картину ее прошлого.

Наблюдения, обсуждавшиеся в этой главе, дали нам представление о Вселенной, которое столь же просто, сколь и величественно. Вселенная расширяется однородно и изотропно — наблюдатели во всех типичных галактиках видят один и тот же характер движения во всех направлениях. В процессе расширения Вселенной длины волн световых лучей увеличиваются пропорционально расстоянию между галактиками. Считается, что расширение не вызвано каким бы то ни было типом

космического отталкивания, а есть просто эффект, который связан со скоростью, оставшейся от взрыва в прошлом. Эта скорость постепенно уменьшается под действием тяготения; такое замедление оказывается довольно малым, что позволяет предположить, что плотность материи во Вселенной мала и ее гравитационное поле слишком слабо как для того, чтобы сделать Вселенную пространственно конечной, так и для того, чтобы в конце концов обратить процесс расширения. Наши вычисления позволяют экстраполировать процесс расширения Вселенной назад по времени и получить, что оно должно было начаться от 10 до 20 миллиардов лет назад.

III. КОСМИЧЕСКИЙ ФОН МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Астрономы прошлого без труда разобрались бы в истории, рассказанной в предыдущей главе. Даже декорации похожи: большие телескопы, исследующие ночное небо с горных вершин Калифорнии или Перу, или невооруженный наблюдатель в своей башне, который «частенько спать ложится после Медведицы»*. Кроме того, как я отмечал в предисловии, эта исто-

* Дословный перевод строки из поэмы Дж. Мильтона (1608–1674) «П Penesoso» («Задумчивый»). По просьбе С. Вайнберга приводим соответствующий отрывок из поэмы в переводе Ю. Корнеева (цит. по изданию: Джон Милтон. Потерянный рай. Стихотворения. Самсон-борец. М., Худ. лит., 1976, с. 400):

«... Порой сию у ночника
В старинной башне я, пока
Горит Медведица Большая,
И дух Платона возвращаю
В наш мир с заоблачных высот,
Где он с бессмертными живет,
Иль тщусь, идя за Трисмегистом
Путем познания тернистым,
Заставить слушаться меня
Тех демонов воды, огня,
Земли и воздуха, чья сила
Стихии движет и светила...»

(Гермес Трисмегист — вымышленный автор теософского учения III–IV в. н. э., считался покровителем магии.) — *Прим. пер.*

рия рассказывалась уже много раз, причем часто с большими, чем здесь, подробностями.

Теперь мы обратимся к совершенно иному типу астрономии, к той истории, которую нельзя было бы рассказать еще десять лет назад*. Мы будем иметь дело не с наблюдениями света, испущенного в последние несколько сот миллионов лет галактиками, более или менее похожими на нашу, а с наблюдениями рассеянного фона радиоизлучения, оставшегося почти от самого начала Вселенной. Да и декорации стали другими: крыши университетских физических корпусов, шары-зонды или ракеты, летящие над земной атмосферой, поля северного Нью-Джерси.

В 1964 году лаборатория фирмы «Белл Телефон» стала обладательницей необычной радиоантенны, находившейся в Кроуфорд Хилле, Холмдел, Нью-Джерси. Антенна была построена для связи через спутник «Эхо», и 20-футовый рупорный отражатель со сверхнизким уровнем шума делал антенну многообещающим инструментом для радиоастрономии. Два радиоастронома, Арно А. Пензиас и Роберт В. Вилсон**, решили использовать антенну для измерения интенсивности радиоволн, излучаемых нашей Галактикой на больших галактических широтах, т.е. вне плоскости Млечного Пути.

Измерения подобного рода чрезвычайно трудны. Радиоволны от нашей Галактики, как и от большинства астрономических источников, лучше всего могут быть описаны как некий сорт шума, очень похожий на «статические разряды», которые можно слышать по радиоприемнику во время грозы. Такой радишум нелегко отличить от неизбежного электрического шума, производимого случайными движениями электронов внутри радиоантенного устройства и в усилительных цепях, или от радишума, принимаемого антенной от земной атмосферы. Трудности не столь велики, если изучается относительно «маленький» источник радишума вроде звезды или далекой галактики. В этом случае можно переключать луч антенны туда-сюда между источником и соседним участком пустого неба; любой ложный шум, идущий от антенного

*Точнее, два-три десятка лет... — *Прим. ред.*

** В 1978 году они стали лауреатами Нобелевской премии. — *Прим. ред.*

устройства, усилительных цепей или земной атмосферы, будет примерно одинаков независимо от того, направлена антенна на источник или на соседний участок неба, поэтому при сравнении показаний этот шум сократится. Однако Пензиас и Вилсон собирались измерить радиосум, идущий от нашей собственной Галактики, т.е. по существу, от самого неба. Поэтому было крайне важно определить любой электрический шум, который мог бы возникать внутри их приемной системы.

vfoto07.eps

РАДИОТЕЛЕСКОП В ХОЛМДЕЛЕ.

Арно Пензиас (справа) и Роберт В. Вилсон сняты рядом с 20-футовой рупорной антенной, с помощью которой в 1964–1965 годах они обнаружили трехградусный фон космического микроволнового излучения. Этот телескоп находится в Холмделе, Нью-Джерси, месте, где расположены лаборатории фирмы «Белл Телефон» (фотография лаборатории «Белл Телефон»).

При предварительных испытаниях этой системы был обнаружен, на самом деле, несколько больший шум, чем ожидалось по расчетам, но казалось правдоподобным, что это разногласие связано с небольшим избытком шума в усилительных цепях. Чтобы избавиться от этих проблем, Пензиас и Вилсон использовали устройство, известное как «холодная нагрузка», — мощность, приходящая от антенны, сравнивается с мощностью, создаваемой искусственным источником, охлажденным жидким гелием при температуре около четырех градусов выше абсолютного нуля. Электрический шум в усилительных цепях должен быть одинаков в обоих случаях и поэтому уничтожается при сравнении, что позволяет непосредственно измерить мощность, идущую от антенны. Измеренная таким способом мощность сигнала от антенны будет содержать вклады только от антенного устройства, земной атмосферы и любого астрономического источника радиоволн.

Пензиас и Вилсон ожидали, что антенное устройство будет давать очень небольшой электрический шум. Однако, чтобы проверить это предположение, они начали свои наблюдения

на сравнительно коротких волнах — длиной 7,35 см, на которых радишум от нашей Галактики должен был быть пренебрежимо мал. Естественно, какой-то радишум ожидался на такой длине волны и от земной атмосферы, но этот шум должен иметь характерную зависимость от направления: он должен быть пропорционален толщине атмосферы в направлении, куда смотрит антенна, — немного меньше в направлении зенита, чуть больше в направлении горизонта. Ожидалось, что после вычитания атмосферного члена с характерной зависимостью от направления не останется никакого существенно-го сигнала от антенны, и это подтвердит, что электрический шум, производимый антенным устройством, на самом деле пренебрежимо мал. После этого можно будет начать изучение самой Галактики на больших длинах волн — около 21 см, где ожидалось, что радишум будет иметь приемлемое значение. (Кстати говоря, радиоволны с длинами вроде 7,35 см или 21 см и вплоть до 1 м известны как микроволновое излучение. Такое название дано потому, что эти длины волн меньше, чем у тех ультракоротких волн, которые использовали в радарх в начале второй мировой войны.)

К своему удивлению, Пензиас и Вилсон обнаружили весной 1964 года, что они принимают на длине волны 7,35 см довольно заметное количество микроволнового шума, не зависящего от направления. Они нашли, что этот «статический фон» не меняется в зависимости от времени суток, а позднее обнаружили, что он не зависит от времени года. Создавалось впечатление, что он не может идти от нашей Галактики; если бы это было так, то большая галактика М 31 в Андромеде, во многих отношениях похожая на нашу, по-видимому, должна была бы также сильно излучать на волне 7,35 см, и этот микроволновой шум должен был бы уже наблюдаться. Кроме того, отсутствие каких-либо вариаций наблюдаемого микроволнового шума с направлением весьма серьезно указывало на то, что эти радиоволны, если они действительно существуют, приходят не от Млечного Пути, а от значительно большего объема Вселенной.

Ясно, что было необходимо снова проверить, не могла ли сама антенна производить больше электрического шума,

чем ожидалось. В частности, было известно, что пара голубей угнездилась в рупоре антенны. Голуби были пойманы, отправлены по почте на принадлежащий лабораториям компании Белл участок в Виппани, выпущены на волю, вновь обнаружены несколькими днями спустя в антенне в Холмделе, снова пойманы и, наконец, утихомирены более решительными средствами. Однако во время аренды помещения голуби покрыли внутренность антенны тем, что Пензиас деликатно назвал «белым диэлектрическим веществом», и это вещество могло при комнатной температуре быть источником электрического шума. В начале 1965 года стало возможным демонтировать рупор антенны и вычистить всю грязь, но это, как и все другие попытки, дало очень малое уменьшение наблюдаемого уровня шума. Загадка оставалась: откуда приходил этот микроволновой шум?

vfoto08.eps

ВНУТРИ РАДИОТЕЛЕСКОПА В ХОЛМДЕЛЕ.

Вы видите Пензиаса, простукивающего соединения 20-футовой рупорной антенны в Холмделе и наблюдающего за этим Вилсона. Это была одна из попыток устранить любой возможный источник электрического шума от антенного устройства, который мог бы давать вклад в трехградусный микроволновой фон, наблюдавшийся в 1964–1965 годах. Все подобные попытки привели лишь к очень небольшому уменьшению наблюдаемой интенсивности микроволнового шума, так что неизбежно пришлось прийти к выводу, что это микроволновое излучение действительно имеет астрономическое происхождение (фотография лабораторий «Белл Телефон»).

Одна часть числовых данных, имевшихся в распоряжении Пензиаса и Вилсона, относилась к интенсивности наблюдавшегося радиошума. Для описания этой интенсивности они использовали язык радиоинженеров, который неожиданно оказался весьма уместным в данном случае. Любое тело при любой температуре выше абсолютного нуля всегда испускает радиосум, производимый тепловым движением электронов внутри тела. Внутри ящика с непрозрачными стенками интенсивность радиошума на любой заданной длине волны зависит только от температуры стенок: чем выше температура, тем интенсивнее фон. Поэтому интенсивность радиошума,

наблюдаемого на определенной длине волны, можно описывать в терминах «эквивалентной температуры», т. е. температуры стенок ящика, внутри которого радишум будет иметь наблюдаемую интенсивность. Конечно, радиотелескоп — не термометр; он измеряет интенсивность радиоволн, регистрируя слабые электрические токи, которые индуцируются волнами в антенном устройстве. Когда радиоастрономы говорят, что они наблюдают радишум с такой-то и такой-то эквивалентной температурой, они подразумевают лишь то, что это есть температура непрозрачного ящика, внутри которого следует поместить антенну для того, чтобы получить наблюдаемую интенсивность радишума. Находится ли антенна в таком ящике *на самом деле* или нет, это, конечно, другой вопрос.

(Чтобы предупредить возражения со стороны специалистов, я должен заметить, что радиоинженеры часто описывают интенсивность радишума в терминах так называемой температуры антенны, которая слегка отличается от описанной выше эквивалентной температуры. Для тех длин волн и интенсивностей, которые наблюдали Пензиас и Вилсон, эти два определения практически совпадают.)

Пензиас и Вилсон нашли, что эквивалентная температура принимавшегося ими радишума равнялась примерно 3,5 градусам выше абсолютного нуля по стоградусной шкале (или, более точно, между 2,5 и 4,5 градусами выше абсолютного нуля). Температура, измеренная по стоградусной шкале, но отнесенная к абсолютному нулю, а не к точке таяния льда, называется измеренной в градусах Кельвина. Таким образом, наблюдавшийся Пензиасом и Вилсоном радишум мог быть описан как имевший эквивалентную температуру 3,5 градуса Кельвина, или, короче, 3,5 К. Это было значительно больше, чем ожидалось, но все же очень мало в абсолютных единицах, поэтому неудивительно, что Пензиас и Вилсон несколько поразмышляли над полученным результатом, прежде чем публиковать его. Со всей определенностью можно сказать, что в первый момент было совершенно неясно, что это — самое важное космологическое открытие после обнаружения красного смещения.

Смысл загадочного микроволнового шума скоро стал проясняться благодаря действиям «невидимой коллегии» астрофизиков. Случилось так, что Пензиас позвонил по совершенно другому поводу своему приятелю, радиоастроному Бернарду Берку из МТИ*. Совсем незадолго до этого Берк слышал от другого своего коллеги Кена Тернера из Института Карнеги о докладе, который Тернер, в свою очередь, слышал в Университете Джона Гопкинса и который сделал молодой теоретик из Принстона П. Дж. Е. Пиблз. В этом докладе Пиблз приводил аргументы в пользу того, что должен существовать фон радишума, оставшийся от ранней Вселенной и имеющий сейчас эквивалентную температуру примерно 10 К. Берк уже знал, что Пензиас измерял температуру радишума с помощью рупорной антенны, принадлежащей лабораториям компании Белл, поэтому он воспользовался телефонным разговором, чтобы спросить, как идут измерения. Пензиас ответил, что измерения идут превосходно, но в результатах есть что-то, чего он не может понять. Берк сообщил Пензиасу, что физики в Принстоне, возможно, имеют интересные идеи относительно того, что принимает антенна в Холмделе.

В своем докладе и препринте, написанном в марте 1965 года, Пиблз рассматривал излучение, которое должно было присутствовать в ранней Вселенной. Термин «излучение» имеет, конечно, общий смысл, объединяя электромагнитные волны всех длин — не только радиоволны, но и инфракрасный, видимый, ультрафиолетовый свет, рентгеновское излучение и излучение очень коротких длин волн, называемое гамма-излучением (см. табл. 2 на с. 152). Здесь нет резких границ; с изменением длины волны один тип излучения плавно переходит в другой. Пиблз заметил, что если бы в течение нескольких первых минут существования Вселенной не было интенсивного фона излучения, то ядерные реакции должны были бы происходить столь быстро, что большая доля имевшегося водорода «сварилась» бы в более тяжелые элементы. А это противоречит тому факту, что около трех четвертей сегодняшней Вселенной составляет водород. Этот процесс быст-

* МТИ — Массачусетский технологический институт. США. — *Прим. пер.*

рого приготовления ядер мог быть предотвращен, только если Вселенная была заполнена излучением, имевшим чудовищную эквивалентную температуру на очень коротких длинах волн и которое могло бы разрывать ядра на части так же быстро, как они образовывались.

Мы увидим, что это излучение должно было выжить при последующем расширении Вселенной, но его эквивалентная температура должна была непрерывно падать в процессе расширения Вселенной обратно пропорционально ее размеру. (Как будет видно, это, по существу, есть эффект красного смещения, обсуждавшийся в главе II.) Отсюда следует, что теперешняя Вселенная также должна быть заполнена излучением, но с эквивалентной температурой значительно меньшей, чем та, которая была в первые несколько минут. Пиблз оценил, что для того, чтобы образование гелия и более тяжелых элементов в первые несколько минут сохранилось в известных границах, фон излучения должен был быть столь интенсивным, что его теперешняя температура должна составлять по меньшей мере 10 К.

Число 10 К было несколько завышено, и вскоре появились более тщательные и аккуратные вычисления Пиблза и других, которые будут обсуждаться в главе V. На самом деле, препринт Пиблза никогда не был опубликован в первоначальном виде. Но вывод был по существу правильным: из наблюдаемой распространенности водорода мы можем вывести, что в первые несколько минут Вселенная должна была быть заполнена мощным излучением, которое могло предотвратить образование слишком большого количества более тяжелых элементов; с тех пор расширение Вселенной должно было понизить эквивалентную температуру этого излучения до нескольких градусов Кельвина, так что оно проявляется сейчас как фон радишума, идущий одинаково со всех направлений. Это сразу же естественным образом объяснило открытие Пензиаса и Вилсона. Таким образом, в определенном смысле антенна в Холмделе находится в ящике — этим ящиком является вся Вселенная. Однако эквивалентная температура, зафиксированная антенной, не есть температура сегодняшней Вселенной, а скорее ее очень давняя температура, которая уменьши-

лась пропорционально огромному расширению, испытанному Вселенной с тех пор.

Работа Пиблза была последней в длинной серии аналогичных космологических гипотез. В самом деле, в конце 40-х годов теория нуклеосинтеза, основанная на «большом взрыве», развивалась Георгием Гамовым и его сотрудниками Ральфом Альфером и Робертом Херманом, и в 1948 году Альфер и Херман использовали эту теорию для предсказания фона излучения с теперешней температурой около 5 К. Аналогичные вычисления были выполнены в 1964 году Я. Б. Зельдовичем в СССР и независимо Фредом Хойлом и Р. Дж. Тайлером в Великобритании. Эти более ранние работы поначалу не были известны группам ученых в лабораториях Белл и Принстоне и не оказали влияния на действительное открытие фона излучения, поэтому мы отложим детальное их рассмотрение до главы VI. Мы также перенесем в главу VI обсуждение загадочного исторического вопроса о том, почему ни одна из этих более ранних работ не привела к поискам космического микроволнового фона.

Вычисления Пиблза в 1965 году были инициированы идеями физика-экспериментатора из Принстона Роберта Дикке. (Среди прочего Дикке изобрел несколько важнейших микроволновых устройств, используемых радиоастрономами.) Где-то в 1964 году Дикке начал задумываться над тем, не должно ли быть какого-то наблюдаемого излучения, оставшегося от горячей плотной ранней стадии космической истории. Рассуждения Дикке основывались на «осциллирующей» теории Вселенной, к которой мы вернемся в последней главе этой книги. По-видимому, у него не было определенных ожиданий относительно температуры этого излучения, но он понимал самое главное, что было что-то, что стоило искать. Дикке предложил П. Г. Роллу и Д. Т. Уилкинсону начать поиски микроволнового фона излучения, и те стали сооружать маленькую низкошумящую антенну на крыше Пальмеровской физической лаборатории в Принстоне. (Для этой цели не обязательно использовать большие радиотелескопы, так как излучение идет со всех направлений; оттого что имеется более узко сфокусированный антенный луч, ничего не выигрывает-

ся.)

vfoto09.eps

РАДИОАНТЕННА В ПРИНСТОНЕ.

Фотография первой установки в Принстоне, на которой получено доказательство существования фона космического излучения. Маленькая рупорная антенна водружена раструбом вверх на деревянную платформу. Уилкинсон стоит под антенной несколько справа: Ролл, почти заслоненный аппаратурой стоит прямо под антенной. Блестящий цилиндр с конической верхушкой является частью криогенного оборудования, использовавшегося для создания контрольного источника на жидком гелии, излучение которого могло сравниваться с излучением от неба. Этот эксперимент подтвердил существование фона излучения с температурой 3 К на длине волны более короткой, чем та, которую использовали Пензиас и Вилсон (фотография Принстонского университета).

Прежде чем Дикке, Ролл и Уилкинсон смогли завершить свои измерения, Дикке имел телефонный разговор с Пензиасом, который только что услышал от Берка о работе Пиблза. Они решили опубликовать одновременно два письма в «Астрофизическом Журнале», в которых Пензиас и Вилсон сообщили бы о своих наблюдениях, а Дикке, Пиблз, Ролл и Уилкинсон изложили бы космологическую интерпретацию. Пензиас и Вилсон, все еще очень настороже, дали своей заметке скромное название «Измерение избыточной антенной температуры на частоте 4080 МГц». (Частота, на которую была настроена антенна, равнялась 4080 МГц, или 4080 миллионов колебаний в секунду, что соответствовало длине волны 7,35 см.) Они просто объявили, что «измерения эффективной зенитной температуры шума . . . дали значение на 3,5 К выше, чем ожидалось», и избежали всяких упоминаний о космологии, за исключением фразы, что «возможное объяснение наблюдаемой избыточной температуры шума дано Дикке, Пиблзом, Роллом и Уилкинсоном в сопутствующем письме в этом же выпуске журнала.

Действительно ли микроволновое излучение, обнаруженное Пензиасом и Вилсоном, осталось от начала Вселенной? Прежде чем мы перейдем к рассмотрению экспериментов, осуществленных после 1965 года для того, чтобы разрешить

этот вопрос, нам необходимо сначала спросить себя, что мы ожидаем теоретически, то есть каковы общие свойства излучения, которое *должно* заполнять Вселенную, если сегодняшние космологические идеи правильны? Этот вопрос приводит нас к рассмотрению того, что происходит с излучением при расширении Вселенной — не только во время нуклеосинтеза, в конце первых трех минут, но и на протяжении эпох*, прошедших с тех пор.

Нам будет очень полезно отказаться сейчас от классической картины излучения в терминах электромагнитных волн, которую мы до сего момента использовали, и принять более современную «квантовую» точку зрения, согласно которой излучение состоит из частиц, известных как фотоны. Обычная световая волна содержит огромное количество фотонов, летящих вместе в одном направлении, но если бы мы очень точно измерили энергию, переносимую рядом волн, то обнаружили бы, что она всегда есть кратное определенной величины, которую называют энергией отдельного фотона. Как будет видно, энергия фотона, вообще говоря, довольно мала, так что в большинстве практических случаев кажется, будто электромагнитная волна может иметь какую угодно энергию. Однако взаимодействие излучения с атомами и атомными ядрами обычно происходит с отдельным фотоном в данный момент времени, и при изучении таких процессов необходимо предпочесть волновому описанию описание с помощью фотонов. Фотоны имеют нулевую массу* и нулевой электрический заряд, но, тем не менее, они вполне реальны — каждый из них несет определенную энергию и импульс и даже определенным образом вращается вокруг своего направления движения**.

Что происходит с отдельным фотоном, пока он путешествует сквозь Вселенную? Ничего особенного, если только подразумевается сегодняшняя Вселенная. Свет от объектов, удаленных чуть не на 10 миллиардов световых лет, по-видимому, прекрасно доходит до нас. Значит, какая бы материя ни

* Эоны (древнегреч.) — гигантские интервалы времени. — *Прим. пер.*

** См. примечания редактора на с. 16.

** Далее это свойство фотона автор называет просто «спином фотона». — *Прим. пер.*

присутствовала в межгалактическом пространстве, она должна быть достаточно прозрачна, чтобы фотоны смогли путешествовать в течение времени, составляющего значительную часть возраста Вселенной, не будучи рассеянными или поглощенными.

Однако красные смещения далеких галактик говорят нам, что Вселенная расширяется, так что ее составные части должны были быть когда-то более сжатыми, чем сейчас. Температура произвольной жидкости в общем случае растет, когда жидкость сжимается, поэтому мы можем также заключить, что вещество Вселенной было в прошлом много горячее. В действительности, мы полагаем, был период времени, который, как мы увидим, длился, вероятно, в течение первых 700 000 лет существования Вселенной, когда содержимое Вселенной было столь горячим и плотным, что не могло еще собраться в звезды и галактики, и даже атомы были все еще разбиты на составляющие их ядра и электроны.

В этих мало приятных условиях фотон не мог путешествовать на заметные расстояния без помех, как он может это делать в сегодняшней Вселенной. Фотон должен был находить на своем пути огромное количество свободных электронов, которые могли эффективно рассеивать или поглощать его*. Если фотон рассеивается электроном, то он в общем случае либо отдает немного энергии электрону, либо получает от него немного энергии в зависимости от того, имел ли начальный фотон энергию больше или меньше, чем у электрона. «Среднее свободное время», в течение которого фотон может путешествовать, прежде чем он поглотится или испытает заметное изменение энергии, должно было быть очень малым, значительно меньше характерного времени расширения Вселенной. Соответствующее среднее свободное время для других частиц (электронов и атомных ядер) должно было быть еще короче. Таким образом, хотя в определенном смысле Вселенная вначале расширялась очень быстро, для отдельного фотона, электрона либо ядра это расширение занимало значительное вре-

* Поглощение фотона свободным электроном невозможно (из-за закона сохранения энергии-импульса), и это оказывается существенным (см. дополнение редактора 3, с. 187). — *Прим. ред.*

мя, такое, которого было достаточно для того, чтобы каждая частица многократно рассеялась, или поглотилась, или вновь испустилась.

Предполагается, что любая система такого рода, в которой отдельные частицы имеют время для многократных взаимодействий, приходит в состояние равновесия. Количество частиц, характеристики которых (положение, энергия, скорость, спин и др.) находятся в определенном интервале значений, должно стать таким, чтобы каждую секунду из этого интервала выбивалось и вносилось обратно равное число частиц. Таким образом, свойства подобной системы определяются не какими бы то ни было начальными условиями, а лишь условием достижения равновесия. Конечно, «равновесие» здесь не означает, что частицы замерзли — каждая из них непрерывно ударяется о своих соседей. Скорее, равновесие статистическое — это распределение частиц по положению, энергии и т. п., причем такое распределение, которое не меняется или меняется очень медленно.

Равновесие подобного статистического рода обычно называют «тепловым равновесием», так как такое состояние всегда характеризуется определенной температурой, которая должна быть одинакова во всей системе. В действительности, строго говоря, только в состоянии теплового равновесия и можно точно определить саму температуру. Мощная и глубокая ветвь теоретической физики, известная как статистическая механика, дает математические средства для расчета свойств любой системы в тепловом равновесии.

Достижение теплового равновесия происходит так, что это несколько напоминает предположительное действие механизма цен в классической экономике. Если спрос превышает предложение, то цена товаров будет расти, ограничивая эффективный спрос и поощряя увеличение производства. Если предложение превышает спрос, то цены падают, увеличивая эффективный спрос и приостанавливая дальнейшее производство. В обоих случаях спрос и предложение достигнут равенства. Точно так же, если имеется слишком много или слишком мало частиц с энергиями, скоростями и другими характеристиками в определенном интервале значений, то скорость, с ко-

торой они покидают этот интервал, будет больше или меньше скорости, с которой они попадают в него, пока не установится равновесие.

Конечно, механизм цен не всегда работает точно так, как это предполагается в классической экономике, но и здесь имеется аналогия — большинство физических систем в реальном мире весьма далеко от теплового равновесия. В центрах звезд имеется почти идеальное тепловое равновесие, так что мы можем с определенной уверенностью оценить, каковы там условия, но поверхность Земли ни в какой мере не близка к равновесию, и мы совершенно не уверены в том, будет завтра дождь или нет. Вселенная никогда не была в состоянии идеального теплового равновесия, так как помимо всего прочего она *расширяется*. Однако в ранний период, когда скорости рассеяния и поглощения отдельных частиц были много больше скорости космического расширения, Вселенную можно рассматривать как «медленно» переходящую от одного состояния почти идеального теплового равновесия к другому.

Решающим для всей аргументации в этой книге является то, что Вселенная когда-то прошла через состояние теплового равновесия. Согласно выводам статистической механики, свойства любой системы в тепловом равновесии полностью определяются, как только заданы температура системы и плотности нескольких сохраняющихся величин (о которых будет сказано чуть больше в следующей главе). Поэтому Вселенная имеет лишь очень ограниченные воспоминания о своих начальных условиях. Это грустно, если мы хотим реконструировать самое начало, но в то же время потеря компенсируется тем, что мы можем вывести ход событий с самого начала без слишком большого числа произвольных предположений.

Мы видели, что микроволновое излучение, открытое Пензиасом и Вилсоном, считается оставшимся от того времени, когда Вселенная находилась в состоянии теплового равновесия. Поэтому, чтобы понять, каковы ожидаемые свойства наблюдаемого фона микроволнового излучения, мы должны задать вопрос: каковы общие свойства излучения, находящегося в тепловом равновесии с веществом?

Случилось так, что именно этот вопрос исторически по-

[bb=0 0 83.5mm 86.7mm]v07.pcx

Рис. 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНКА.

Показана плотность энергии на единичный интервал длин волн излучения черного тела с температурой 3 К как функция длины волны. (Для температуры, которая больше 3 К на множитель f , необходимо только изменить длины волн на множитель $1/f$ и увеличить плотности энергии на множитель f .) Прямая часть кривой справа приближенно описывается более простым распределением Рэлея – Джинса; кривая с таким наклоном ожидается не только для излучения черного тела, но и во многих других случаях. Крутое падение слева обязано квантовой природе излучения и является специфическим свойством излучения черного тела. Линия, помеченная «галактическое излучение», показывает интенсивность радишума от нашей Галактики. (Стрелки указывают длину волны первоначального измерения Пензиаса и Вилсона и длину волны, для которой температура излучения может быть выведена из измерений поглощения первым возбужденным вращательным состоянием межзвездного циана.)

родил квантовую теорию и интерпретацию излучения в терминах фотонов. К 90-м годам девятнадцатого века стало известно, что свойства излучения в состоянии теплового равновесия с веществом зависят только от температуры. Более точно, количество энергии в единичном объеме такого излучения в любом заданном интервале длин волн дается универсальной формулой, содержащей только длину волны и температуру. Эта же формула дает количество излучения внутри ящика с непроницаемыми стенками, поэтому радиоастроном может использовать ее для интерпретации наблюдаемой им интенсивности радишума с помощью понятия эквивалентной температуры. Эта же формула определяет количество излучения, испущенного за секунду с одного квадратного сантиметра полностью поглощающей поверхности на любой длине волны, так что излучение такого рода общеизвестно как «излучение черного тела». Таким образом, излучение черного тела характеризуется некоторым распределением энергии по длинам волн, даваемым универсальной формулой, зависящей только от температуры. Самый острый вопрос, с которым столкнулись физики-теоретики 90-х годов, был в том, чтобы найти эту формулу.

Правильная формула для излучения черного тела была найдена в последние недели девятнадцатого века Максом Кар-

лом Эрнстом Людвигом Планком. Точный вид результата Планка показан на рис. 7 для температуры наблюдаемого космического микроволнового шума 3 К. Качественно формула Планка может быть описана следующим образом: в ящике, заполненном излучением черного тела, энергия в любом интервале длин волн плавно растёт с увеличением длины волны, достигает максимума, а затем плавно падает. Это «распределение Планка» универсально и не зависит от природы вещества, с которым взаимодействует излучение, а зависит только от его температуры. В используемом в наши дни смысле, термин «излучение черного тела» означает любое излучение, в котором распределение энергии по длинам волн подчиняется формуле Планка независимо от того, действительно ли оно испущено черным телом или нет. Таким образом, в течение первого миллиона лет или около того, когда излучение и вещество находились в состоянии теплового равновесия, Вселенная должна была быть заполнена излучением черного тела с температурой, равной температуре того вещества, из которого она состояла.

Важность планковского расчета выходит далеко за рамки проблемы излучения черного тела, так как в этом расчете Планк ввел новую идею, что энергия может существовать в виде отдельных порций или «квантов». Планк рассматривал только квантование энергии вещества в равновесии с излучением*, но несколько лет спустя Эйнштейн предположил, что и само излучение также состоит из квантов (названных позднее фотонами). Эти достижения привели, в конце концов, в 20-е годы к великой интеллектуальной революции в истории науки, к замене классической механики совершенно новым языком — квантовой механикой.

В этой книге мы не собираемся углубляться в квантовую механику. Однако для понимания свойств излучения в расширяющейся Вселенной нам будет полезно посмотреть, как картина излучения в терминах фотонов приводит к общим свойствам планковского распределения.

*Точнее, квантование испускания и поглощения энергии веществом. Идея квантования энергии самого вещества возникла позднее. — *Прим. ред.*

Причина того, что плотность энергии излучения черного тела падает для очень больших длин волн, проста: излучение очень трудно загнать в любой объем, размеры которого меньше, чем длина волны. Это могло быть (и было) понято и без обращения к квантовой теории, просто на основе старой волновой теории излучения.

В то же время, уменьшение плотности энергии излучения черного тела для очень коротких длин волн невозможно понять в рамках неквантовой картины излучения. Хорошо известным следствием статистической механики является то, что при любой заданной температуре трудно получить любой сорт частиц, или волн, или других возбуждений, энергия которых была бы больше некоторой определенной величины, пропорциональной температуре. Однако, если бы излучение с короткой длиной волны могло иметь произвольно малую энергию, то не было бы ничего, что ограничивало бы полное количество излучения черного тела очень коротких длин волн. Это не только находилось бы в противоречии с экспериментом — это должно было бы привести к катастрофическому результату, заключающемуся в том, что полная энергия излучения черного тела всех длин волн равна бесконечности! Единственный выход состоял в том, чтобы предположить, что энергия существует в виде порций или «квантов», причем количество энергии в каждой порции увеличивается с уменьшением длины волны, так что при любой заданной температуре было бы очень мало излучения на коротких длинах волн, для которых порции содержат много энергии. В окончательной формулировке этой гипотезы, принадлежащей Эйнштейну, *энергия любого фотона обратно пропорциональна длине волны*; при любой заданной температуре излучение черного тела содержит очень мало фотонов со слишком большой энергией, следовательно, очень мало фотонов со слишком короткой длиной волны, что и объясняет падение планковского распределения в области коротких длин волн.

Конкретно энергия фотона с длиной волны 1 см равна 0,000124 электронвольта (эВ) и соответственно растет при уменьшении длины волны. Электронвольт — это удобная единица энергии, равная той энергии, которую приобретает

один электрон при прохождении разности потенциалов в один вольт. Например, обычная батарейка карманного фонаря с напряжением 1,5 вольта тратит 1,5 эВ на каждый электрон, который она проталкивает через нить электрической лампочки. (В обычных метрических единицах энергии один электрон-вольт равен $1,602 \cdot 10^{-12}$ эрга или $1,602 \cdot 10^{-19}$ джоуля). Согласно правилу Эйнштейна, энергия фотона при длине волны в микроволновом диапазоне 7,35 см, на которую настроились Пензиас и Вилсон, была равна 0,000124 эВ, деленным на 7,35, т.е. 0,000017 эВ. В то же время, фотоны видимого света имеют среднюю длину волны около одной двадцатитысячной доли сантиметра ($5 \cdot 10^{-5}$ см), поэтому их энергия равна 0,000124 эВ, умноженным на 20 000, или приблизительно 2,5 эВ. В обоих случаях энергия фотона очень мала в макроскопических единицах и именно поэтому кажется, что фотоны сливаются вместе в непрерывные потоки излучения.

Между прочим, энергии химических реакций в общем случае имеют значения порядка электронвольта на атом или на электрон. Например, для того чтобы вырвать электрон из атома водорода, требуется 13,6 эВ, что представляет собой исключительно бурное химическое событие. Тот факт, что фотоны в солнечном свете также имеют энергии порядка электронвольта, чудовищно важен для всех нас; именно это позволяет им осуществлять необходимые для жизни химические реакции, такие как фотосинтез*. Энергии ядерных реакций, в общем случае, порядка *миллиона* электронвольт на ядро атома, и поэтому грамм плутония эквивалентен по взрывной энергии 1 тонне ТНТ*.

Описание с помощью фотонов позволяет легко понять главные качественные свойства излучения черного тела. Во-первых, принципы статистической механики утверждают, что средняя энергия фотонов пропорциональна температуре, в то время, как правило Эйнштейна говорит нам, что длина

* Чтобы поглотить в процессе фотосинтеза одну молекулу углекислого газа CO_2 , растениям нужно четыре фотона из видимого солнечного света. — *Прим. ред.*

* ТНТ — тринитротолуол, тротил — взрывчатое вещество, широко употребляемое в технике. — *Прим. ред.*

волны любого фотона обратно пропорциональна его энергии. Отсюда, объединяя эти два правила, получаем, что типичная длина волны фотонов в излучении черного тела обратно пропорциональна температуре. Если выразить это количественно, получим, что типичная длина волны, вблизи которой сконцентрирована большая часть энергии излучения черного тела, равна 0,29 см при температуре 1 К и пропорционально уменьшается при более высоких температурах**.

Например, непрозрачное тело при обычной «комнатной» температуре 300 К (27°C) будет испускать излучение черного тела со средней длиной волны, равной 0,29 см, деленным на 300, т.е. около одной тысячной сантиметра. Это лежит в области инфракрасного излучения, и длина волны слишком велика, чтобы наши глаза могли его видеть. В то же время, поверхность Солнца имеет температуру около 5 800 К и, следовательно, испускаемый свет имеет максимум в спектре при длине волны, равной 0,29 см, деленным на 5 800, т.е. примерно пять сотых долей сантиметра ($5 \cdot 10^{-5}$ см) или 5 000 ангстрем. (Один ангстрем равен одной стомиллионной (10^{-8}) сантиметра.) Как уже отмечалось, это находится в середине той области длин волн, которую в процессе эволюции приспособились видеть наши глаза и которую мы называем видимой областью. То, что эти длины волн столь малы, объясняет тот факт, что лишь в начале девятнадцатого века была обнаружена волновая природа света: ведь только тогда, когда мы изучаем свет, прошедший через очень маленькие отверстия, мы можем заметить явления, характерные для распространения волн, такие, как дифракция.

Мы видели также, что уменьшение плотности энергии излучения при больших длинах волн связано с трудностью заключить излучение в любой объем, размеры которого меньше длины волны. В самом деле, среднее расстояние между фотонами в излучении черного тела, грубо говоря, равно средней длине волны фотона. Но мы видели, что средняя длина волны обратно пропорциональна температуре, следовательно, среднее расстояние между фотонами также обратно пропорционально температуре. Число предметов любого сорта в за-

** Максимум распределения соответствует условию $h\nu = 2,82 kT$ (см. математическое дополнение 4, с. 175). — *Прим. ред.*

данном объеме обратно пропорционально кубу среднего расстояния между ними, поэтому при излучении черного тела выполняется правило: *число фотонов в данном объеме пропорционально кубу температуры*.

Мы можем теперь собрать всю эту информацию воедино, чтобы сделать ряд выводов о количестве энергии в излучении черного тела. Количество энергии в одном литре, или «плотность энергии», есть просто число фотонов в одном литре, умноженное на среднюю энергию одного фотона. Но мы видели, что число фотонов в одном литре пропорционально кубу температуры, в то время как средняя энергия фотона просто пропорциональна температуре. Отсюда, количество энергии в одном литре излучения черного тела пропорционально кубу температуры, умноженному на температуру, или, другими словами, *четвертой степени температуры*. Выражая это количественно, находим, что плотность энергии излучения черного тела равна 4,72 эВ на литр при температуре 1 К, 47 200 эВ на литр при температуре 10 К и так далее. (Это правило известно как закон Стефана-Больцмана.) Если микроволновой шум, обнаруженный Пензиасом и Вилсоном, действительно является излучением черного тела с температурой 3 К, то плотность энергии его должна быть равной 4,72 эВ на литр, умноженным на три в четвертой степени, т. е. около 380 эВ на литр. Когда температура была в тысячу раз больше, плотность энергии была в миллион миллионов (10^{12}) раз больше.

Теперь мы можем вернуться к вопросу о происхождении древнего микроволнового излучения. Мы видели, что должно было быть время, когда Вселенная была столь горячей и плотной, что атомы были диссоциированы на составляющие их ядра и электроны, и рассеяние фотонов на свободных электронах устанавливало тепловое равновесие между веществом и излучением. С течением времени Вселенная расширялась и охлаждалась, достигнув в конце концов температуры (около 3 000 К), достаточно низкой для того, чтобы позволить ядрам и электронам скомбинироваться в атомы. (В астрофизической литературе это обычно называют «рекомбинацией», т. е. крайне неудачным термином, так как к моменту времени, который мы рассматриваем, ядра и электроны еще никогда за

всю предыдущую историю Вселенной не были скомбинированы в атомы!) Внезапное исчезновение свободных электронов нарушило тепловой контакт между излучением и веществом, после чего излучение продолжало свободно расширяться.

К тому моменту, как это случилось, энергия поля излучения при различных длинах волн определялась условиями теплового равновесия и поэтому давалась планковской формулой для черного тела с температурой, равной температуре вещества, — около 3 000 К. В частности, средняя длина волны фотона должна была быть около одного микрона (десятитысячная доля сантиметра, или 10 000 ангстрем), а среднее расстояние между фотонами примерно равнялось этой средней длине волны.

Что случилось с фотонами после этого? Отдельные фотоны не рождались и не уничтожались, поэтому среднее расстояние между ними просто увеличивалось пропорционально размеру Вселенной, т. е. пропорционально среднему расстоянию между типичными галактиками. Но мы видели в предыдущей главе, что эффект космологического красного смещения заключается в «растяжении» длины волны любого луча света в процессе расширения Вселенной; следовательно, длины волн всех отдельных фотонов также просто увеличивались пропорционально размеру Вселенной. Поэтому расстояние между фотонами оставалось равным средней длине волны, в точности как в излучении черного тела. И действительно, выразив эти аргументы количественно, можно показать, что *излучение, заполняющее Вселенную, будет продолжать в процессе ее расширения описываться в точности планковской формулой для черного тела*, даже несмотря на то, что оно уже больше не находится в тепловом равновесии с веществом. (См. математическое дополнение 4, с. 175.) Единственный эффект расширения будет заключаться в увеличении средней длины волны фотонов пропорционально размеру Вселенной. Температура излучения черного тела обратно пропорциональна средней длине волны, поэтому она будет падать при расширении Вселенной обратно пропорционально ее размеру.

В частности, Пензиас и Вилсон нашли, что интенсивность микроволнового фона, который был ими обнаружен, соответ-

ствуется температуре примерно 3 К. Это как раз то, что следует ожидать, если Вселенная расширилась в 1 000 раз с тех пор, когда температура была достаточно высока (3 000 К) для того, чтобы держать вещество и излучение в тепловом равновесии. Если подобная интерпретация правильна, то трехградусный ради фон представляет в настоящее время самый древний сигнал из всех, принятых астрономами, испущенный задолго до испускания света самыми далекими из видимых нами галактик.

Но Пензиас и Вилсон измерили интенсивность космического ради фона на единственной длине волны 7,35 см. Сразу же стало необходимо как можно быстрее определить, описывается ли распределение энергии излучения по длинам волн формулой Планка для черного тела, как того следует ожидать, если это действительно смещенное в красную сторону древнее излучение, оставшееся от той эпохи, когда вещество и излучение находились в состоянии теплового равновесия. Если это так, то эквивалентная температура, вычисленная подстановкой наблюдаемой интенсивности ради шума в планковскую формулу, должна иметь одно и то же значение на всех длинах волн, такое же, как и на волне длиной 7,35 см, изученной Пензиасом и Вилсоном.

Мы видели, что к моменту открытия Пензиаса и Вилсона в Нью-Джерси уже готовилась другая попытка обнаружить космический фон микроволнового излучения. Вскоре после появления первой пары работ двух групп ученых из лабораторий фирмы Белл и Принстона Ролл и Уилкинсон объявили свой результат: эквивалентная температура фона излучения на длине волны 3,2 см составляла от 2,5 до 3,5 К. Это значило, что в пределах экспериментальных погрешностей интенсивность космического фона на длине волны 3,2 см была больше, чем на длине волны 7,35 см как раз в то количество раз, которое следовало ожидать, если излучение описывается формулой Планка!

Начиная с 1965 года интенсивность древнего микроволнового излучения была измерена радиоастрономами более чем на дюжине длин волн в интервале от 73,5 вплоть до 0,33 см. Каждое из этих измерений согласуется с планковским распре-

делением энергии в зависимости от длины волны с температурой между 2,7 и 3 К.

Однако, прежде чем мы окончательно придем к выводу, что это действительно излучение черного тела, мы должны напомнить, что средняя длина волны, на которой планковское распределение достигает максимума, равна 0,29 см, деленным на температуру в градусах Кельвина, что для температуры 3 К оказывается чуть меньше 0,1 см. Таким образом, все упомянутые микроволновые измерения относились к *длинноволновой* стороне по отношению к максимуму планковского распределения. Но мы видели, что рост плотности энергии с уменьшением длины волны в этой части спектра происходит просто из-за трудности заключения больших длин волн в малые объемы, и этот рост следует ожидать для разнообразных полей излучения, включая и излучение, которое *не* образовано в условиях теплового равновесия. (Радиоастрономы называют эту часть спектра областью Рэля – Джинса, так как она была впервые проанализирована лордом Рэлеем и сэром Джеймсом Джинсом.) Чтобы убедиться в том, что мы действительно видим излучение черного тела, необходимо пройти через максимум планковского распределения в область коротких волн и проверить, что плотность энергии на самом деле падает с уменьшением длины волны, как ожидается на основе квантовой теории*. При длинах волн короче 0,1 см мы, в действительности, находимся вне сферы деятельности радио- или микроволновой астрономии и попадаем в новую область инфракрасной астрономии.

К сожалению, атмосфера нашей планеты, которая почти прозрачна для длин волн больше 0,3 см, становится все менее прозрачной для более коротких длин волн. Похоже на то, что никакая наземная радиообсерватория, даже расположенная на горной высоте, не сможет измерить космический фон излучения на длинах волн много меньших 0,3 см.

Довольно забавно, что фон излучения на более коротких

* Квантовые эффекты значительны и до достижения максимума. При длине волны 0,27 см интенсивность в 2,7 раза меньше, чем по формуле Рэля – Джинса, а при длине волны 0,15 см — в 7,4 раза меньше, а это — следствие квантовых эффектов. — *Прим. ред.*

длинах волн *был-таки* измерен задолго до того, как появились все те астрономические работы, которые обсуждали до сих пор в этой главе, причем он был измерен астрономом, работавшим в оптическом, а не в радио- или инфракрасном диапазоне! В созвездии Змееносца имеется облако межзвездного газа, которое по случайности лежит между Землей и горячей, но во всех других отношениях ничем не примечательной, звездой ζ Змееносца. Спектр ζ Змееносца пересечен рядом необычных темных полос, указывающих на то, что лежащий на пути света газ поглощает его на множестве определенных длин волн. Это те длины волн, на которых фотоны имеют необходимые энергии для того, чтобы индуцировать переходы молекул газового облака из состояний с меньшей в состояния с большей энергией. (Молекулы, как и атомы, существуют только в состояниях с определенной, или «квантованной», энергией.) Таким образом, наблюдая длины волн, при которых возникают темные полосы, можно сделать ряд выводов о природе этих молекул и о состояниях, в которых они находятся.

Одна из линий поглощения в спектре ζ Змееносца находится на длине волны 3875 ангстрем (одна 38,75-миллионная доля сантиметра), указывая на существование в межзвездном облаке молекулы циана CN, состоящей из одного углеродного и одного азотного атома. (Строго говоря, CN следует называть «радикалом», имея в виду что при нормальных условиях он быстро соединяется с другими атомами, образуя более стабильные молекулы, например яд — циановую кислоту HCN. В межзвездном пространстве CN вполне стабилен.) В 1941 году У. С. Адамс и А. Мак-Келлар обнаружили, что эта линия поглощения в действительности расщеплена и состоит из трех компонентов с длинами волн 3874,608; 3875,763 и 3873,998 ангстрем. Первая из этих длин волн поглощения отвечает переходу, при котором молекула циана поднимается из состояния наименьшей энергии («основного состояния») в *колебательное состояние**, причем следует ожидать, что такой переход происходит, даже если циан находится при нулевой температуре. Однако две другие линии могут возникать только в резуль-

*Электронно-возбужденное состояние. — *Прим. ред.*

тате переходов, в которых молекула поднимается из *вращательного* состояния, находящегося как раз над основным состоянием, в различные другие колебательные состояния. Следовательно, заметная доля молекул циана в межзвездном облаке должна находиться в этом вращательном состоянии. Используя известную разницу энергий между основным и вращательными состояниями и наблюдаемую относительную интенсивность различных линий поглощения, Мак-Келлар смог оценить, что циан подвергается некоему возмущению с эффективной температурой около 2,3 К, которое может поднять молекулу циана во вращательное состояние.

В то время, казалось, не было никаких причин ассоциировать это загадочное возмущение с вопросом о происхождении Вселенной, и поэтому работа не привлекла внимания. Однако после обнаружения трехградусного космического фона излучения в 1965 году было осознано (Джорджем Филдом, И. С. Шкловским и Н. Дж. Вулфом), что этот фон как раз и является тем возмущением, которое наблюдали в 1941 году и которое вызывало вращение молекул циана в облаках Змееносца. Длина волны фотонов излучения черного тела, необходимая для того, чтобы вызвать это вращение, равна 0,263 см, т. е. короче любой длины волны, доступной наземной радиоастрономии, но все еще недостаточно коротка, чтобы проверить быстрое падение, ожидаемое для планковского распределения при 3 К на длинах волн короче 0,1 см.

С тех пор проводились поиски других линий поглощения, вызванных возбуждением молекул циана в другие вращательные состояния, или иных молекул в различные вращательные состояния. Наблюдение в 1974 году поглощения вторым вращательным состоянием межзвездного циана дало оценку интенсивности излучения на длине волны около 0,132 см, также соответствующего температуре около 3 К. Однако до сих пор такие наблюдения установили лишь верхние пределы плотности энергии излучения на длинах волн, меньших 0,1 см. Эти результаты вселяют надежду, так как они указывают, что плотность энергии излучения действительно начинает плавно падать на некоторой длине волны вблизи 0,1 см, как и ожидается, если это излучение черного тела. Однако такие верхние пределы не позволяют нам убедиться в том, что это на са-

мом деле есть излучение черного тела, или точно определить температуру излучения.

Единственная возможность атаковать эту проблему заключается в том, чтобы поднять инфракрасный приемник над земной атмосферой с помощью шара-зонда или ракеты. Подобные эксперименты невероятно трудны, и поначалу они дали не согласующиеся друг с другом результаты, попеременно ободряя то приверженцев стандартной космологии, то ее оппонентов. Корнеллская ракетная группа обнаружила значительно больше излучения на коротких длинах волн, чем это можно ожидать для планковского распределения, в то время как группа шаров-зондов в МТИ получила результаты, примерно согласующиеся с теми, которые ожидаются для излучения черного тела. Обе группы продолжали свою работу и к 1972 году опубликовали результаты, указывающие на распределение черного тела с температурой, близкой 3 К. В 1976 году группа шаров-зондов в Беркли подтвердила, что плотность энергии излучения продолжает падать для коротких длин волн в области от 0,25 до 0,06 см по закону, ожидаемому для температур в интервале от 0,1 до 3 К. Сейчас представляется установленным, что космический фон излучения действительно есть излучение черного тела с температурой, близкой 3 К.

Читатель может удивиться в этом месте, почему такой вопрос не мог быть разрешен просто поднятием инфракрасного оборудования на искусственный спутник Земли, чтобы потратить столько времени, сколько нужно для аккуратных измерений заведомо над земной атмосферой. В самом деле, я не уверен, что понимаю, почему это было невозможно сделать. Приводимый обычно довод заключается в том, что для измерения столь низких температур излучения, как 3 К, необходимо охлаждать аппаратуру жидким гелием (холодная нагрузка), и не существует технологии, позволяющей держать подобное криогенное оборудование на борту спутника Земли. Однако трудно избавиться от подозрения, что подобные воистину космические исследования просто заслуживают большей доли ассигнований из бюджета на исследования космоса.

Важность проведения наблюдений над земной атмосфе-

рой представляется еще большей, если рассмотреть распределение космического фона излучения *по направлению* так же, как и по длине волны. Проведенные до сих пор наблюдения согласуются с полностью изотропным, т. е. не зависящим от направления, фоном излучения. Как отмечено в предыдущей главе, это один из наиболее сильных аргументов в пользу Космологического Принципа. Однако очень трудно отличить возможную зависимость от направления, присущую космическому фону излучения, от такой зависимости, которая равным образом связана с эффектами земной атмосферы; в самом деле, при измерениях температуры фона излучения этот фон отделяют от излучения нашей атмосферы, используя *предположение*, что он изотропен.

Обстоятельство, делающее зависимость фона микроволнового излучения от направления столь пленительным предметом для изучения, заключается в том, что интенсивность этого излучения и не ожидается точно изотропной. Возможны флуктуации интенсивности с небольшими изменениями по направлению, вызванные реальной крупнозернистой структурой Вселенной, либо в те времена, когда испускалось излучение, либо после этого. Например, галактики на ранних стадиях формирования могут наблюдаться как тепловые пятна на небе с несколько большей, чем средняя, температурой черного тела, имеющие угловые размеры, может быть, больше половины дуговой минуты *. Вдобавок к этому, почти наверняка имеются небольшие плавные вариации интенсивности излучения по всему небу, вызванные движением Земли во Вселенной. Земля вращается вокруг Солнца со скоростью 30 км/с, а Солнечная система, благодаря вращению нашей Галактики, несется со скоростью около 250 км/с. Никто точно не знает, какую скорость имеет наша Галактика по отношению к космическому распределению типичных галактик, но, вероятно, она движется в определенном направлении со скоростью несколько сот километров в секунду.

Если, например, мы предположим, что Земля движется со скоростью 300 км/с относительно среднего распределения ве-

* См. дополнение редактора 4, с. 189. — *Прим. ред.*

щества во Вселенной и, следовательно, относительно фона излучения, тогда длина волны излучения, приходящего спереди или сзади по отношению к движению Земли, должна уменьшиться или соответственно увеличиться на величину, равную отношению 300 км/с к скорости света, т. е. на 0,1 процента. Таким образом, эквивалентная температура излучения должна плавно меняться с направлением, будучи на 0,1 процента больше средней в том направлении, куда движется Земля, и на 0,1 процента меньше средней в направлении, откуда мы летим. Наилучший верхний предел, полученный в последние годы, для какой бы то ни было зависимости эквивалентной температуры от направления как раз равен примерно 0,1 процента, и, таким образом, мы находимся в мучительном положении, сумев почти что, но не совсем, измерить скорость Земли во Вселенной. Возможно, что этот вопрос не удастся разрешить до тех пор, пока не будут проведены измерения на спутниках Земли. (Когда в эту книгу вносились последние исправления, я получил от Джона Матера из НАСА* Бюллетень № 1 спутника-исследователя космического фона. В нем объявлено о создании группы из шести ученых под руководством Ренье Вейсса из МТИ для изучения возможностей измерения инфракрасного и микроволнового фона из космоса. Счастливого пути!**.)

Мы видели, что космический фон микроволнового излучения дает мощное свидетельство того, что излучение и вещество во Вселенной когда-то находились в состоянии теплового равновесия. Однако мы еще мало извлекли для космологии из конкретно наблюдаемого числового значения эквивалентной температуры излучения, равной 3 К . На самом же деле, эта температура излучения позволяет определить одно критическое число, которое понадобится нам, чтобы проследить историю первых трех минут.

Как мы показали, при любой данной температуре число фотонов в единичном объеме обратно пропорционально ку-

* НАСА — Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства США. — *Прим. пер.*

** Об измерениях, обнаруживших эффект анизотропии излучения, см. дополнение редактора 5, с. 190. — *Прим. ред.*

бу средней длины волны и, следовательно, прямо пропорционально кубу температуры. Для температуры, точно равной 1 К, в одном литре будет находиться 20282,9 фотонов, так что трехградусный фон излучения содержит около 550 000 фотонов в одном литре. Однако плотность ядерных частиц (нейтронов и протонов) в теперешней Вселенной составляет от 6 до 0,03 частиц на тысячу литров. (Верхний предел равен удвоенной критической плотности, обсуждавшейся в главе II; нижний предел соответствует нижней оценке плотности, реально наблюдаемой в видимых галактиках.) Таким образом, в зависимости от истинного значения плотности частиц, на каждую ядерную частицу в сегодняшней Вселенной приходится от 100 миллионов до 20 000 миллионов фотонов.

Более того, это огромное отношение числа фотонов к числу ядерных частиц очень долгое время оставалось примерно постоянным. В течение того периода времени, когда излучение свободно расширялось (с тех пор, как температура упала ниже, примерно, 3 000 К), фоновые фотоны и ядерные частицы не рождались и не уничтожались, поэтому их отношение, естественно, оставалось постоянным. В следующей главе мы увидим, что это отношение было примерно постоянным даже раньше, *несмотря на то*, что тогда отдельные фотоны рождались и уничтожались.

Это наиболее важный количественный вывод из измерений фона микроволнового излучения — сколь далеко мы ни заглянули бы в раннюю историю Вселенной, на каждый нейтрон или протон приходилось от 100 миллионов до 20 000 миллионов фотонов. Чтобы избежать ненужной неопределенности, я в последующем изложении округлю это число и буду предполагать для иллюстрации, что сейчас и тогда Вселенная в среднем содержала ровно один миллиард фотонов на одну ядерную частицу.

Одно очень важное следствие этого вывода заключается в том, что разделение вещества на галактики и звезды не могло начаться до тех пор, пока космическая температура не стала достаточно низкой, для того чтобы электроны смогли

захватиться ядрами с образованием атомов. Как предвидел еще Ньютон, для того чтобы тяготение могло привести к собиранию вещества в отдельные сгустки, необходимо, чтобы оно преодолело давление вещества и связанного с ним излучения. Сила тяготения внутри любого возникающего сгустка вещества увеличивается с увеличением размера сгустка, в то время как давление не зависит от размера; следовательно, при любых заданных плотности и давлении существует минимальная масса, поддающаяся гравитационному связыванию. Она известна как «масса Джинса», так как впервые была введена сэром Джеймсом Джинсом в 1902 году в теории образования звезд. Оказывается, что масса Джинса пропорциональна давлению в степени три вторых (см. математическое дополнение 5, с. 178). Перед тем как электроны начали захватываться в атомы при температуре около 3000 К, давление излучения было колоссальным и, соответственно, масса Джинса была велика, примерно в миллион раз больше массы большой галактики. Сами галактики и даже скопления галактик недостаточно велики, чтобы образоваться в это время. Однако чуть позже электроны вместе с ядрами объединились в атомы; с исчезновением свободных электронов Вселенная стала прозрачной для излучения; в результате давление излучения стало несущественным. При заданных температуре и плотности, давление вещества или излучения просто пропорционально числу частиц или фотонов, соответственно, поэтому, когда давление излучения перестало играть роль, полное эффективное давление упало примерно в миллиард раз. Масса Джинса уменьшилась на этот множитель в степени три вторых, став равной одной миллионной массы галактики. С этого момента давление одного лишь вещества было во много раз слабее того, которое могло бы предотвратить собирание вещества в видимые нами на небе галактики*.

Этим мы не хотим сказать, что действительно понимаем,

* Полное давление, складывающееся из давления излучения и давления вещества, не уменьшилось. Собирацию прозрачного вещества в сгустки препятствует только давление самого вещества, но не давление излучения. Именно это имеет в виду автор, говоря об уменьшении полного «эффективного» давления. — *Прим. ред.*

как образовались галактики. Теория образования галактик является одной из открытых проблем астрофизики, кажущейся сегодня еще очень далекой от разрешения. Но это другая история. Для нас важно, что в ранней Вселенной при температуре выше примерно 3 000 К Вселенная состояла не из галактик и звезд, которые мы сейчас видим на небе, а только из ионизованного и неразделимого супа — из вещества и излучения.

Другим примечательным следствием большого отношения числа фотонов к числу ядерных частиц является то, что должно было существовать время в не столь далеком прошлом, когда энергия излучения была больше энергии, сосредоточенной в веществе Вселенной. Энергия, заключенная в массе ядерной частицы, равна, согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$, примерно 939 миллионам электронвольт. Средняя энергия фотона в трехградусном излучении черного тела намного меньше, около 0,0007 эВ, так что даже при наличии одного миллиарда фотонов на один нейтрон или протон большая часть энергии сегодняшней Вселенной находится в форме вещества, а не излучения. Однако раньше температура была выше, — так что энергия каждого фотона тоже была выше, в то время как энергия, заключенная в нейтронной или протонной массе, всегда была одна и та же. Чтобы энергия излучения превысила энергию вещества, при наличии одного миллиарда фотонов на одну ядерную частицу необходимо лишь, чтобы средняя энергия фотона излучения черного тела стала больше одной миллиардной доли энергии, отвечающей ядерной массе, т.е. больше примерно одного электронвольта. Это соответствует тому, что температура была в 1 300 раз больше, чем сейчас, т.е. около 4 000 К. Эта температура характеризует переход от «эры преобладания излучения», в которой большая часть энергии Вселенной находилась в форме излучения, к теперешней «эре преобладания вещества», в которой большая часть энергии сосредоточена в массах ядерных частиц.

Поразительно, что переход от эры преобладания излучения к эре преобладания вещества произошел как раз примерно в то же время, когда содержимое Вселенной стало прозрачным для излучения, т.е. при температуре около 3 000 К. Никто на самом деле не знает, почему должно быть так, хотя и имеются

интересные гипотезы на этот счет. Мы также не знаем, какой переход произошел первым; если сейчас имеется 10 миллиардов фотонов на ядерную частицу, тогда излучение продолжало бы преобладать над веществом вплоть до момента, когда температура упала до 400 К, т. е. значительно позже того, когда Вселенная стала прозрачной.

Эти неопределенности не мешают нашему рассказу об истории ранней Вселенной. Для нас важно, что в любой момент времени задолго до того, как содержимое Вселенной стало прозрачным, ее можно рассматривать как состоящую из излучения лишь с небольшой примесью вещества. Грандиозная плотность энергии излучения в ранней Вселенной постепенно уменьшилась благодаря смещению длин волн фотонов в красную сторону в процессе ее расширения, дав возможность примеси ядерных частиц и электронов превратиться в звезды, скалы и живые существа теперешней Вселенной.

IV. РЕЦЕПТ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Наблюдения, обсуждавшиеся в двух предыдущих главах, показали, что Вселенная расширяется и что она заполнена универсальным фоном излучения, который имеет сейчас температуру 3 К. Это излучение представляется пережитком того времени, когда Вселенная была непрозрачной и примерно в 1000 раз меньше и горячее, чем в настоящее время. (Как и всегда, когда мы говорим, что Вселенная была в 1000 раз меньше, чем сейчас, мы просто имеем в виду, что расстояние между любой данной парой типичных галактик было тогда в 1000 раз меньше теперешнего.) В качестве заключительного этапа подготовки к нашему расчету первых трех минут мы должны заглянуть назад в еще более ранние моменты времени, когда Вселенная была еще меньше и горячее, используя для изучения господствовавших тогда физических условий не оптические или радиотелескопы, а теоретические методы исследования.

В конце главы III мы отмечали, что когда Вселенная была в 1000 раз меньше, чем в настоящее время, и содержавшееся

в ней вещество было на грани того, чтобы стать прозрачным для излучения, Вселенная перешла от эры преобладания излучения к теперешней эре преобладания вещества. Во время эры преобладания излучения было не только то же самое огромное количество фотонов на каждую ядерную частицу, что и сейчас, но энергия отдельных фотонов была достаточно велика, так что большая часть энергии Вселенной была в форме излучения, а не частиц. (Напомним, что фотоны — это безмассовые частицы, или кванты, из которых, согласно квантовой теории, состоит свет.) Следовательно, с достаточно хорошим приближением Вселенную в течение этой эры можно рассматривать так, будто она заполнена только одним излучением и не содержит вовсе никакого вещества.

Этот вывод надо сопроводить одним важным уточнением. Мы увидим в этой главе, что эра чистого излучения началась на самом деле только в конце первых нескольких минут, когда температура упала ниже нескольких миллиардов градусов Кельвина. До этого момента вещество было важно, но вещество, сильно отличавшееся от того, из которого состоит наша нынешняя Вселенная. Однако прежде, чем мы заглянем столь далеко назад, кратко рассмотрим собственно эру излучения, от конца первых нескольких минут до момента на несколько сот тысяч лет позднее, когда вещество стало вновь более важным, чем излучение.

Все, что нам нужно для того, чтобы проследить историю Вселенной в течение этой эры, это знать, насколько все было горячим в любой данный момент времени. Иными словами, как температура связана с размером Вселенной в процессе ее расширения?

Было бы легко ответить на этот вопрос, если бы излучение можно было рассматривать расширяющимся свободно. Длина волны каждого фотона просто растягивалась бы (благодаря красному смещению) пропорционально размеру Вселенной в процессе ее расширения. Кроме того, мы видели в предыдущей главе, что средняя длина волны излучения черного тела обратно пропорциональна температуре. Следовательно, температура должна была уменьшаться обратно пропорционально размеру Вселенной, так же, как это происходит сейчас.

К счастью для теоретика-космолога, это же простое соотношение выполняется даже тогда, когда мы принимаем во внимание, что излучение в действительности не расширялось свободно, — быстрые столкновения фотонов с относительно небольшим числом электронов и ядерных частиц делали содержимое Вселенной непрозрачным в течение эры преобладания излучения. Пока фотон был в свободном полете между столкновениями, его длина волны должна была увеличиваться пропорционально размеру Вселенной, а на каждую частицу приходилось так много фотонов, что столкновения просто вынуждали температуру вещества следовать температуре излучения, но не наоборот. Таким образом, когда Вселенная была, например, в десять тысяч раз меньше, чем сейчас, температура должна была быть пропорционально выше теперешней, т. е. около 30 000 К. Вот все, что можно сказать об эре излучения.

В конце концов, по мере того, как мы все дальше и дальше заглядываем в глубь истории Вселенной, мы приходим к моменту времени, когда температура была столь высока, что столкновения фотонов друг с другом могли порождать частицы вещества из чистой энергии излучения. Мы собираемся показать, что образованные таким образом частицы были так же важны для определения скорости различных ядерных реакций и скорости расширения Вселенной в первые несколько минут, как и само излучение. Поэтому, чтобы проследить за ходом событий в действительно ранние моменты времени, нам потребуется знать, сколь горяча должна быть Вселенная, чтобы из энергии излучения образовалось большое количество материальных частиц, и сколько частиц так образовалось.

Процесс, в котором вещество образуется из излучения, можно легче всего понять, используя квантовую картину света. Два кванта излучения, или фотона, могут столкнуться и исчезнуть, причем вся их энергия и импульс уйдут на образование двух или более материальных частиц. (В действительности этот процесс косвенным образом наблюдается в современных лабораториях ядерной физики высоких энергий.) Однако эйнштейновская специальная теория относительности утверждает, что даже в покое материальная частица должна иметь определенную «энергию покоя», даваемую знаменитой

формулой $E = mc^2$. (Здесь c — скорость света. Это есть источник энергии, высвобождаемой в ядерных реакциях, в которых доля массы атомного ядра уничтожается.) Отсюда, для того, чтобы два фотона образовали две материальные частицы массы m при лобовом столкновении, энергия каждого фотона должна быть по меньшей мере равна энергии покоя mc^2 каждой частицы. Реакция будет происходить и тогда, когда энергия отдельных фотонов будет больше mc^2 ; избыток энергии просто уйдет на то, чтобы придать материальным частицам большую скорость. Однако частицы массой m не могут образоваться в столкновениях двух фотонов, если энергия фотонов меньше mc^2 , потому что в этом случае энергии не хватает даже на то, чтобы образовать массу этих частиц.

Очевидно, чтобы судить об эффективности излучения для образования материальных частиц, нам надо знать характерную энергию отдельных фотонов в поле излучения. Это может быть установлено с достаточной для наших теперешних целей точностью с помощью простого мнемонического правила: чтобы найти характерную энергию фотона, просто умножьте температуру излучения на фундаментальную постоянную статистической механики, известную как постоянная Больцмана. (Людвиг Больцман, наряду с американцем Уиллардом Гиббсом, был основателем современной статистической механики. Говорят, что самоубийство Больцмана в 1906 году, по крайней мере, отчасти было вызвано философской оппозицией его работе, но вся эта полемика уже давно прекратилась.) Значение постоянной Больцмана равно 0,00008617 эВ на градус Кельвина. Например, при температуре 3000 К, когда содержимое Вселенной только-только стало прозрачным, характерная энергия каждого фотона примерно равнялась 3000 К, умноженным на постоянную Больцмана, или 0,26 эВ. (Напомним, что электронвольт равен энергии одного электрона, прошедшим разность потенциалов один вольт. Типичные энергии химических реакций — порядка электронвольта на атом, именно поэтому излучение при температурах выше 3000 К достаточно горячо, чтобы удерживать значительную долю электронов от включения в состав атомов.)

Для того, чтобы образовать материальные частицы мас-

сой m в столкновениях фотонов, характерная энергия фотонов, как мы видели, должна быть по меньшей мере равна энергии mc^2 частиц в покое. Так как характерная энергия фотонов равна температуре, умноженной на Больцмановскую постоянную, то отсюда вытекает, что температура излучения должна быть по меньшей мере порядка энергии покоя mc^2 , деленной на Больцмановскую постоянную. Это значит, что для каждого типа материальных частиц имеется «пороговая температура», равная энергии покоя mc^2 , деленной на постоянную Больцмана, которая должна быть достигнута прежде, чем частицы данного типа начнут рождаться из энергии излучения.

Например, легчайшие из известных материальных частиц — электрон e^- и позитрон e^+ . Позитрон есть античастица по отношению к электрону; это значит, что он имеет противоположный электрический заряд (положительный вместо отрицательного), но те же массу и спин. Когда позитрон сталкивается с электроном, заряды могут уничтожиться, причем энергия массы двух частиц проявится как чистое излучение. Именно поэтому, конечно, позитроны столь редки в обычной жизни — просто они очень мало живут перед тем, как найти электрон и аннигилировать. (Позитроны были открыты в космических лучах в 1932 году.) Процесс аннигиляции может идти и в обратную сторону — два фотона с достаточной энергией могут столкнуться и образовать электрон-позитронную пару, причем энергия фотонов превратится в массу электрона и позитрона.

Для того, чтобы два фотона образовали при лобовом столкновении электрон и позитрон, энергия каждого из фотонов должна достичь энергии mc^2 , соответствующей массе электрона и позитрона. Эта энергия равна 0,511003 миллиона электронвольт. Чтобы найти пороговую температуру, при которой у фотонов будет достаточно шансов иметь такую энергию, мы делим энергию на постоянную Больцмана (0,00008617 эВ на градус Кельвина) и получаем пороговую температуру шесть миллиардов градусов Кельвина ($6 \cdot 10^9$ K). При любой более высокой температуре электроны и позитроны будут свободно рождаться в столкновениях фотонов друг с другом и потому будут присутствовать в очень больших ко-

личествах.

(Кстати, пороговая температура $6 \cdot 10^9$ К, которую мы получили для рождения электронов и позитронов из излучения, много выше, чем любая температура, с которой мы обычно имеем дело в теперешней Вселенной. Даже в центре Солнца температура всего около 15 миллионов градусов. Вот почему мы не привыкли видеть, чтобы электроны и позитроны выпрыгивали из пустого пространства, сколь бы ярким ни был свет).

Аналогичные соображения применимы к любому типу частиц. Фундаментальным правилом современной физики является то, что для каждого типа частиц в природе существует соответствующая античастица точно с теми же массой и спином, но с противоположным электрическим зарядом. Единственное исключение составляют некоторые чисто нейтральные частицы вроде самого фотона, которые можно рассматривать так, будто они сами — свои античастицы. Связь частицы и античастицы взаимна: позитрон есть античастица для электрона, а электрон — для позитрона. При достаточном количестве энергии всегда можно родить пару: частица-античастица любого сорта при столкновении пары фотонов.

(Существование частиц и античастиц есть прямое математическое следствие принципов квантовой механики и специальной теории относительности. Существование антиэлектрона было впервые теоретически предсказано в 1930 году Полем Адрианом Морисом Дираком. Не желая вводить в свою теорию неизвестную частицу, он отождествил антиэлектрон с единственной известной в те годы положительно заряженной частицей — протоном. Открытие позитрона в 1932 году подтвердило теорию античастиц и показало также, что протон — не античастица для электрона; у протона есть своя античастица — антипротон, открытый в Беркли в 50-х годах.)

Следующий после электрона и позитрона тип легчайших частиц — это мюон, или μ^- , нечто вроде нестабильного тяжелого электрона, и *его* античастица μ^+ . Точно так же как электроны и позитроны, μ^- и μ^+ имеют противоположные электрические заряды, но равные массы и могут рождаться в столкновениях фотонов друг с другом. Частицы μ^- и μ^+

имеют каждая энергию покоя mc^2 , равную 105,6596 миллионов электронвольт, что после деления на больцмановскую постоянную дает соответствующую пороговую температуру 1,2 миллиона миллионов градусов ($1,2 \cdot 10^{12}$ K). Пороговые температуры, соответствующие другим типам частиц, приведены в табл. 1 на с. 150. Рассматривая эту таблицу, мы можем сказать, какие частицы могли присутствовать в больших количествах в разные времена истории Вселенной: это как раз те частицы, чья пороговая температура была ниже температуры Вселенной в этот момент времени*.

Сколько же этих материальных частиц в действительности имелось при температуре выше пороговой? В условиях высоких температуры и плотности, преобладавших в ранней Вселенной, число частиц определялось основным условием теплового равновесия: это число должно было быть столь велико, чтобы каждую секунду уничтожалось в точности столько же частиц, сколько рождалось. (Это значит, что спрос равен предложению.) Скорость, с какой любая данная пара частица — античастица будет аннигилировать на два фотона, примерно равна скорости, с какой любая данная пара фотонов одной и той же энергии будет превращаться в частицу и античастицу. Отсюда, условие теплового равновесия требует, чтобы число частиц каждого типа, чья пороговая температура ниже космической температуры, должно быть примерно равно числу фотонов. Если частиц меньше, чем фотонов, то они будут рождаться быстрее, чем уничтожаться, и их число будет расти; если же частиц больше, чем фотонов, то они будут уничтожаться быстрее, чем рождаться, и их число будет падать. Например, при температуре выше порога, равного шести миллиардам градусов, число электронов и позитронов должно быть примерно таким же, что и число фотонов, и Вселенная в эти времена может рассматриваться как состоявшая преимущественно из фотонов, электронов и позитронов, а не из одних фотонов.

* В соответствии с плавным распределением частиц по энергии в тепловом равновесии количество частиц и античастиц также плавно меняется с температурой и становится значительным уже при $1/4$ температуры, которую автор называет пороговой. — *Прим. ред.*

Однако при температуре выше пороговой материальная частица ведет себя во многом подобно фотону. Ее средняя энергия примерно равна температуре, умноженной на постоянную Больцмана, так что при температуре много больше пороговой средняя энергия частицы много больше той энергии, которая соответствует ее массе*, и поэтому массой можно пренебречь. При таких условиях давление и плотность энергии, определяемые материальными частицами данного типа, просто пропорциональны четвертой степени температуры, в точности как для фотонов. Таким образом, мы можем представить себе Вселенную в любой данный момент времени как состоящую из различных типов «излучения», причем каждый тип относится к той или иной разновидности частиц, чья пороговая температура была в этот момент времени ниже космической температуры. В частности, плотность энергии во Вселенной в любой момент времени пропорциональна четвертой степени температуры и числу разновидностей частиц, чья пороговая температура в этот момент времени ниже космической. Подобные условия, когда температура так высока, что пары частица-античастица в состоянии теплового равновесия так же распространены, как и фотоны, не существуют нигде в теперешней Вселенной, может быть, за исключением сердец взрывающихся звезд. Тем не менее мы достаточно доверяем нашим знаниям статистической механики, чтобы без опасений создавать теории о том, что должно было происходить при столь экзотических условиях в ранней Вселенной.

Чтобы быть точными, мы должны иметь в виду, что античастица вроде позитрона считается отдельной разновидностью. Кроме того, частицы типа фотонов и электронов существуют в двух различных состояниях спина, и их нужно учитывать как отдельные разновидности. Наконец, частицы типа электрона (но не фотон) подчиняются специальному правилу, «принципу исключения Паули», которое запрещает двум частицам занимать одно и то же состояние; это правило снижает их вклад в полную плотность энергии на множитель семь восьмых. (Именно принцип исключения не допускает падения

*Здесь и ниже автор имеет в виду массу покоя. — Прим. ред.

всех электронов в атоме на оболочку с наименьшей энергией, поэтому он ответственен за сложную оболочечную структуру атомов, обнаруживающуюся в периодической таблице элементов.) Эффективное число разновидностей каждого типа частиц приведено вместе с пороговыми температурами в табл. 1 на с. 150. Плотность энергии Вселенной при данной температуре пропорциональна четвертой степени температуры и эффективному числу разновидностей тех частиц, чья пороговая температура лежит ниже температуры Вселенной.

Спросим себя теперь: *когда* Вселенная была при такой высокой температуре? Скорость расширения Вселенной регулируется балансом между полем тяготения и направленным наружу импульсом содержимого Вселенной. При этом полная плотность энергии фотонов, электронов, позитронов является источником поля тяготения Вселенной в ранние времена. Мы видели, что плотность энергии Вселенной существенно зависит только от температуры, поэтому космическую температуру можно использовать как часы, рассматривая вместо тикания охлаждение при расширении Вселенной. Точнее, можно показать, что время, необходимое для того, чтобы плотность энергии Вселенной упала от одного значения до другого, пропорционально разности обратных квадратных корней из плотностей энергий (см. математическое дополнение 3, с. 171). Но мы видели, что плотность энергии пропорциональна четвертой степени температуры и числу разновидностей частиц с пороговой температурой ниже действительной. Отсюда, пока температура не достигнет любого из «пороговых» значе-

[bb=0 0 88.8mm 47.4mm]v08.pcx

Рис. 8. ЭРА ПРЕОБЛАДАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ.

Показана температура Вселенной как функция времени для промежутка от конца нуклеосинтеза до рекомбинации ядер и электронов в атомы.

ний, *промежуток времени, нужный для того, чтобы Вселенная охладилась от одной температуры до другой, пропорционален разности обратных квадратов этих температур.* Например, если мы начинаем с температуры 100 миллионов градусов (значительно ниже пороговой температуры для электронов)

и находим, что требуется 0,06 года (или 22 дня) для того, чтобы температура упала до 10 миллионов градусов, то тогда требуется еще шесть лет, чтобы температура упала до одного миллиона градусов, еще 600 лет, чтобы температура упала до 100 000 градусов и так далее. Полное время, потребовавшееся на то, чтобы Вселенная охладилась от 100 миллионов до 3000 градусов Кельвина (т. е. до точки, когда содержимое Вселенной было близко к тому, чтобы стать прозрачным для излучения), равно 700 000 лет (рис. 8). Конечно, когда я пишу здесь «годы», я подразумеваю определенное число абсолютных единиц времени, например, таких, как определенное число периодов, с которым электрон совершает движение по орбите вокруг ядра в атоме водорода. Речь идет об эпохе задолго до того, как Земля начала свое вращение вокруг Солнца.

Если Вселенная в первые несколько минут действительно состояла из строго равного числа частиц и античастиц, то, когда температура упала ниже одного миллиарда градусов, они все должны были проаннигилировать и ничего бы не осталось, кроме излучения. Имеется очень хорошее свидетельство, опровергающее такую возможность, — существуем мы! Должен был быть некоторый избыток электронов над позитронами, протонов над антипротонами и нейтронов над антинейтронами для того, чтобы что-то осталось после аннигиляции частиц и античастиц, т. е. для образования вещества теперешней Вселенной. Вплоть до этого места в данной главе я намеренно игнорировал сравнительно небольшое количество избыточного вещества. Такое приближение является хорошим, если мы хотим только рассчитать плотность энергии или скорость расширения ранней Вселенной; в предыдущей главе мы видели, что плотность энергии ядерных частиц не становится сравнимой с плотностью энергии излучения до момента, когда Вселенная охладится примерно до 4000 К. Однако небольшая приправа из оставшихся электронов и ядерных частиц требует нашего особого внимания, потому что эти частицы определяют состав нынешней Вселенной и, в частности, потому, что они являются главными составными частями автора и читателя.

Коль скоро мы допускаем возможность избытка вещества

над антивеществом в первые несколько минут, мы сталкиваемся с проблемой определения полного перечня ингредиентов ранней Вселенной. В списке, публикуемом каждые шесть месяцев Лоуренсовской лабораторией в Беркли, имеются буквально сотни так называемых элементарных частиц. Неужели мы должны определить количество элементарных частиц каждого из этих типов? И почему нужно остановиться на элементарных частицах — не должны ли мы также определить количество различных типов атомов, молекул, соли и перца? В таком случае мы вправе решить, что Вселенная слишком произвольна для того, чтобы в ней стоило разбираться.

К счастью, Вселенная не настолько сложна. Чтобы показать, как становится возможным написать рецепт ее состава, необходимо еще немного подумать о том, что подразумевается под условием теплового равновесия. Я уже подчеркивал, сколь важно то, что Вселенная прошла через состояние теплового равновесия, — именно это позволяет нам говорить с такой уверенностью о составе Вселенной в любой данный момент времени. Все, что до сих пор мы обсуждали в данной главе, основано на следствиях известных свойств вещества и излучения в тепловом равновесии.

Когда столкновения или другие процессы приводят физическую систему в состояние теплового равновесия, всегда имеются некоторые величины, значения которых не меняются. Одной из таких «сохраняющихся величин» является полная энергия; хотя столкновения и могут передавать энергию от одной частицы к другой, они никогда не меняют полную энергию частиц, участвующих в столкновении. Каждому такому закону сохранения соответствует величина, значение которой нужно определить прежде, чем мы можем установить свойства системы в тепловом равновесии, — очевидно, если какая-то величина не меняется, пока система достигает теплового равновесия, ее значение не может быть выведено из условий равновесия, а должно быть установлено заранее. Система в тепловом равновесии поистине примечательна тем, что *все* ее свойства однозначно определяются, как только мы установим значения сохраняющихся величин. Вселенная прошла через состояние теплового равновесия, поэтому все, что нам

требуется, чтобы дать полный рецепт ее состава в ранние времена, это знать, какие физические величины сохранялись при расширении Вселенной и каковы были значения этих величин.

Обычно вместо полного количества энергии системы в тепловом равновесии мы устанавливаем температуру. Для того сорта систем, которые до сих пор рассматривались и которые состоят исключительно из излучения и равного количества частиц и античастиц, температура — это все, что требуется задать, чтобы выяснить равновесные свойства системы. Но в общем случае в дополнение к энергии имеются другие сохраняющиеся величины и необходимо установить плотности каждой из них.

Например, в стакане воды при комнатной температуре непрерывно происходят реакции, в которых молекула воды разбивается на ион водорода (голый протон — ядро водорода с сорванным электроном) и ион гидроксила (атом кислорода, связанный с атомом водорода, с одним лишним электроном), или реакции, в которых ионы водорода и гидроксила вновь объединяются, образуя молекулы воды. Заметим, что в каждой такой реакции исчезновение молекулы воды сопровождается появлением иона водорода и наоборот, в то время как ионы водорода и гидроксила всегда появляются вместе. Следовательно, сохраняющиеся величины — это полное число молекул воды *плюс* число ионов водорода и число ионов водорода *минус* число ионов гидроксила. (Конечно, есть и другие сохраняющиеся величины вроде полного числа молекул воды плюс ионы гидроксила, но они суть простые комбинации двух фундаментальных сохраняющихся величин.) Свойства нашего стакана воды могут быть полностью определены, если мы зададим, что температура равна 300 К (комнатная температура по шкале Кельвина), что плотность молекул воды плюс ионов водорода равна $3,3 \cdot 10^{22}$ молекул или ионов в кубическом сантиметре (что грубо соответствует воде при давлении на уровне моря) и что плотность ионов водорода *минус* ионов гидроксила равна нулю (в соответствии с нулевым полным зарядом)*. В частности, оказывается, что при таких условиях имеется один ион водорода примерно на каждые пятьсот мил-

* Существенно, что рассматривается чистая вода без примесей. —

лионов молекул воды. Отметим, что мы не должны задавать это в нашем рецепте для стакана воды; мы выводим пропорцию ионов водорода из законов теплового равновесия. В то же время, мы не можем вывести из условий теплового равновесия плотности сохраняющихся величин — например, мы можем сделать плотность молекул воды плюс ионов водорода немного больше или меньше, чем $3,3 \cdot 10^{22}$ молекул в кубическом сантиметре, повышая или понижая давление, — поэтому нам нужно задать их, чтобы знать, что находится в нашем стакане.

Этот пример также позволяет нам понять меняющийся смысл того, что мы называем «сохраняющимися» величинами. Если наша вода находится при температуре в миллионы градусов, скажем, внутри звезд, то тогда молекулам или ионам очень легко диссоциировать, а составляющим их атомам — потерять свои электроны. Сохраняющимися величинами являются числа электронов и ядер кислорода и водорода. Плотность молекул воды плюс атомов гидроксила при этих условиях нужно *вычислять* по правилам статистической механики, а не устанавливать заранее; конечно, эта плотность оказывается довольно малой. (В аду редко встретишь снежки.) На самом деле, при этих условиях происходят и ядерные реакции, так что даже число ядер каждого сорта не абсолютно фиксировано, но эти числа меняются столь медленно, что звезду можно рассматривать как постепенно переходящую из одного состояния равновесия в другое.

В конце концов, при температуре несколько тысяч миллионов градусов, которая характерна для ранней Вселенной, даже атомные ядра охотно диссоциируют на свои составные части — протоны и нейтроны. Реакции происходят столь быстро, что вещество и антивещество может легко рождаться из чистой энергии и вновь аннигилировать. При подобных условиях сохраняющиеся величины — это не число частиц какого-то определенного сорта. Вместо этого необходимые законы сохранения сводятся к такому небольшому числу законов, которые (насколько мы знаем) справедливы при всех возмож-

ных условиях. Считается, что есть лишь три сохраняющиеся величины, плотности которых нужно задать в нашем рецепте ранней Вселенной.

1. *Электрический заряд*. Мы можем порождать или уничтожать пары частиц с равными по величине и противоположными по знаку электрическими зарядами, но полный электрический заряд никогда не меняется. (Мы можем быть более уверены в этом законе сохранения, чем в каком-либо другом, так как если заряд не сохраняется, то общепринятая максвелловская теория электричества и магнетизма не будет иметь смысла.)

2. *Барионное число*. «Барион» — это объединяющий термин, включающий ядерные частицы (протоны и нейтроны) вместе с несколько более тяжелыми нестабильными частицами, известными как гипероны. Барионы и антибарионы могут рождаться и уничтожаться парами; кроме того, барионы могут распадаться на другие барионы, как в бета-распаде радиоактивных ядер, когда нейтрон переходит в протон или наоборот. Однако полное число барионов минус число антибарионов (антипротонов, антинейтронов, антигиперонов) никогда не меняется. Мы приписываем протону, нейтрону и гиперонам барионное число^{*} +1, а соответствующим античастицам — барионное число -1; тогда правило заключается в том, что полное барионное число никогда не меняется. Представляется, что барионное число не имеет никакого динамического значения вроде заряда (ему не соответствует никакое поле). Барионное число есть средство бухгалтерского учета — его значение целиком исчерпывается тем фактом, что оно сохраняется^{**}.

3. *Лептонное число*. «Лептоны» — это легкие отрицательно заряженные частицы, электрон и мюон, а также электрически нейтральная частица нулевой массы, называемая нейтрино, и их античастицы позитрон, антимюон и антинейтрино. Несмотря на нулевую массу и заряд, нейтрино и антинейтри-

^{*} Иногда эту же величину называют барионным зарядом. — *Прим. ред.*

^{**} В настоящее время этот закон подвергается сомнению. Вопрос чрезвычайно важен для космологии. См. дополнение редактора 6 на с. 193. — *Прим. ред.*

но не более фиктивны, чем фотоны; они несут энергию и импульс, как и любые другие частицы. Сохранение лептонного числа есть другое бухгалтерское правило — полное число лептонов минус полное число антилептонов никогда не меняется. (В 1962 году эксперименты с пучками нейтрино показали, что на самом деле имеется, по крайней мере, два типа нейтрино, «электронное» и «мюонное», и два типа лептонного числа: электронное лептонное число есть полное число электронов плюс нейтрино электронного типа минус число их античастиц, в то время как мюонное лептонное число есть полное число мюонов плюс нейтрино мюонного типа минус число их античастиц. Представляется, что оба эти числа абсолютно сохраняются, но с полной определенностью это не известно^{***}.)

Хороший пример действия этих правил дает нам радиоактивный распад нейтрона n на протон p , электрон e^- и антинейтрино $\bar{\nu}_e$ (электронного типа). Значения заряда, барионного числа и лептонного числа для каждой из частиц таковы:

Частица	n	p	e^-	$\bar{\nu}_e$
Заряд	0	+1	-1	0
Барионное число	+1	+1	0	0
Лептонное число	0	0	+1	-1

Читатель легко может проверить, что сумма значений любой сохраняющейся величины для частиц в конечном состоянии равна значению той же величины для начального нейтрона. Это и есть то, что мы подразумеваем под сохранением величин. Законы сохранения далеко не бессодержательны, так как они говорят нам, что большое число реакций *не* происходит, например, запрещенный процесс распада, в котором нейтрон распадается на протон, электрон и более чем одно антинейтрино.

Чтобы завершить наш рецепт состава Вселенной в любой заданный момент времени, мы должны, таким образом, наряду с температурой задать заряд, барионное число и лептонное

^{***} В последнее время обнаружена еще одна частица типа мюона, но значительно более тяжелая — тау-лептон (масса $m_\tau \sim 1780$ МэВ). Предполагается, что существует соответствующий третий тип нейтрино и антинейтрино ν_τ и $\bar{\nu}_\tau$, а также выполняется соответствующий закон сохранения «трионного» лептонного числа. — *Прим. ред.*

число в единице объема. Законы сохранения говорят нам, что в любом объеме, расширяющемся вместе со Вселенной, значения этих величин остаются постоянными. Следовательно, заряд, барионное число и лептонное число в *единице объема* меняются просто обратно пропорционально кубу размера Вселенной. (В главе III мы видели, что число фотонов в единице объема пропорционально кубу температуры, в то же время, как было отмечено в начале этой главы, температура меняется обратно пропорционально размеру Вселенной.) Поэтому заряд, барионное число и лептонное число, приходящееся *на один фотон*, остаются фиксированными, и наш рецепт может быть задан раз и навсегда указанием значений сохраняющихся величин по отношению к числу фотонов.

(Строго говоря, величина, меняющаяся обратно пропорционально кубу размера Вселенной, — это не число фотонов в единице объема, а *энтропия* в единице объема. Энтропия — фундаментальная величина статистической механики, связанная со степенью беспорядка в физической системе. Не считая условного численного множителя, энтропия в достаточно хорошем приближении дается полным числом всех частиц в тепловом равновесии, как материальных частиц, так и фотонов, причем отдельные разновидности частиц имеют свои весовые множители, указанные в табл. 1 на с. 150. Те константы, которые мы реально должны использовать для характеристики нашей Вселенной, это отношения заряда к энтропии, барионного числа к энтропии и лептонного числа к энтропии. Однако даже при очень высоких температурах число материальных частиц не более, чем того же порядка величины, что и число фотонов, поэтому мы не делаем серьезной ошибки, если будем использовать в качестве стандарта для сравнения число фотонов вместо энтропии.)

Легко оценить космический электрический заряд, приходящийся на один фотон. Насколько мы знаем, средняя плотность электрического заряда равна нулю во всей Вселенной. Если бы Земля и Солнце имели избыток положительных зарядов над отрицательными (или наоборот) всего лишь на одну часть на миллион миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов (10^{36}), то электрическое отталкивание меж-

ду ними было бы больше гравитационного притяжения. Если Вселенная конечна и замкнута, то мы можем даже усилить это утверждение до теоремы: полный заряд Вселенной должен равняться нулю, так как в противном случае линии электрического поля накручивались бы и накручивались на Вселенную, приводя к бесконечному электрическому полю. Но открыта ли Вселенная или замкнута, вполне надежно можно утверждать, что космический электрический заряд на фотон пренебрежимо мал.

Барионное число на фотон также легко оценить. Единственные *стабильные* барионы — это ядерные частицы (протон и нейтрон) и их античастицы (антипротон и антинейтрон). На самом деле свободный нейтрон нестабилен (среднее время жизни 15,3 минуты), но ядерные силы делают нейтрон абсолютно стабильным в атомных ядрах обычного вещества. Кроме того, насколько мы знаем, во Вселенной нет значительных количеств антивещества (об этом подробнее см. ниже). Следовательно, барионное число любой части нынешней Вселенной, по существу, равно числу ядерных частиц. Мы заметили в предыдущей главе, что сейчас имеется одна ядерная частица на каждый миллиард фотонов микроволнового фона излучения (точная цифра неопределенна), поэтому барионное число на фотон примерно равно одной миллиардной (10^{-9}).

Это поистине примечательный вывод. Чтобы увидеть его следствия, рассмотрим время в прошлом, когда температура была выше десяти миллионов миллионов градусов (10^{13} K), т. е. выше пороговой температуры для нейтронов и протонов. В это время Вселенная содержала множество ядерных частиц и античастиц, примерно столько же, сколько фотонов. Но барионное число есть *разность* между числами ядерных частиц и античастиц. Если эта разность была в миллиард раз меньше, чем число фотонов, и, следовательно, в миллиард раз меньше, чем *полное* число ядерных частиц, то, отсюда, число ядерных частиц превышало число античастиц всего лишь на одну часть на миллиард. С этой точки зрения, когда Вселенная охладилась ниже пороговой температуры для ядерных частиц, все античастицы проаннигилировали с соответствующими частицами, оставив в наследство крошечный избыток частиц над

античастицами, который в конце концов превратился в знакомый нам мир.

Появление в космологии безразмерного числа, столь малого, как одна часть на миллиард, привело некоторых теоретиков к предположению, что это число в действительности есть нуль — это значит, что Вселенная на самом деле содержит одинаковое количество вещества и антивещества. Тогда тот факт, что барионное число на фотон оказывается равным одной части на миллиард, мог бы быть объяснен предположением, что когда-то, прежде чем космическая температура упала ниже пороговой температуры для ядерных частиц, произошло разделение Вселенной на различные области, некоторые с небольшим избытком (несколько частей на миллиард) вещества над антивеществом, а другие — с небольшим избытком антивещества над веществом. После того как температура упала и максимально возможное количество пар частица-античастица проаннигилировало, мы получили бы Вселенную, состоящую из областей чистого вещества и областей чистого антивещества. Недостаток этой идеи в том, что никто не видел где-либо во Вселенной признаков заметного количества антивещества. Считается, что космическое излучение, проникающее в верхнюю атмосферу нашей Земли, частично приходит с далеких расстояний в нашей Галактике, а частично, возможно, и из областей вне ее. Это космическое излучение подавляющим образом состоит из вещества, а не из антивещества, — в самом деле, никто еще не наблюдал антипротон или антиядро в космических лучах. Вдобавок, мы не наблюдаем фотоны, которые должны были бы образоваться в результате аннигиляции вещества и антивещества в космических масштабах.

Другая возможность — в том, что плотность фотонов (или, правильнее, энтропии) не оставалась пропорциональной обратному кубу размера Вселенной. Такое могло случиться, если был какой-то вид отклонения от теплового равновесия, что-то вроде трения или вязкости, которые могли нагревать Вселенную и образовывать лишние фотоны. В этом случае барионное число на фотон могло вначале иметь какое-то разумное значение, возможно, близкое к единице, а затем упасть до его теперешнего малого значения, так как образовалось много

фотонов. Трудность здесь в том, что никто не сумел предложить сколько-нибудь детальный механизм образования таких лишних фотонов. Несколько лет тому назад я сам пытался найти такой механизм, но без малейшего успеха*.

В последующем я буду игнорировать все эти «нестандартные» возможности и буду просто предполагать, что барионное число на фотон таково, каким оно, по-видимому, кажется: одна часть на миллиард.

Что можно сказать о плотности лептонного числа во Вселенной? Из того факта, что Вселенная не имеет электрического заряда, сразу же вытекает, что сейчас имеется ровно один отрицательно заряженный электрон на каждый положительно заряженный протон. Около 87 процентов ядерных частиц в теперешней Вселенной составляют протоны, так что число электронов близко к полному числу ядерных частиц. Если бы электроны были единственными лептонами в нынешней Вселенной, мы могли бы немедленно заключить, что лептонное число на фотон примерно такое же, как и барионное число на фотон.

Однако помимо электрона и позитрона имеется другой тип стабильных частиц, несущий ненулевое лептонное число. Нейтрино и его античастица антинейтрино — это электрически нейтральные безмассовые частицы вроде фотона, но с лептонными числами $+1$ и -1 соответственно. Следовательно, чтобы определить плотность лептонного числа в сегодняшней Вселенной, мы должны что-то знать о распространённости нейтрино и антинейтрино.

К сожалению, получить эту информацию невероятно трудно. Нейтрино похоже на электрон тем, что оно не чувствует сильных ядерных сил, которые удерживают протоны и нейтроны внутри атомного ядра. (Иногда я буду говорить «нейтрино», подразумевая как нейтрино, так и антинейтрино.) Однако в противоположность электрону нейтрино электрически нейтрально, так что оно не чувствует ни электрических, ни магнитных сил вроде тех, которые удерживают электроны внутри атома. На самом деле, нейтрино вообще слабо подвержено действию каких бы то ни было сил. Как и все прочее во

* См. дополнение редактора 6, с. 193. — *Прим. ред.*

Вселенной, оно подвержено действию сил тяготения и, кроме того, ощущает слабые силы, ответственные за радиоактивные процессы, вроде упомянутого выше (см. с. 98) распада нейтрона (однако эти силы приводят лишь к ничтожному взаимодействию с обычным веществом). С целью показать, насколько слабо взаимодействует нейтрино, обычно приводят такой пример: для того чтобы иметь заметную вероятность остановки или рассеяния любого данного нейтрино, образованного в каком-то радиоактивном процессе, нам потребуется поместить на его пути слой свинца толщиной несколько световых лет. Солнце непрерывно излучает нейтрино, образованные при превращении протонов в нейтроны в ядерных реакциях в сердцевине Солнца; эти нейтрино пронизывают нас сверху в течение дня и *снизу* ночью, когда Солнце — *на другой стороне* Земли, так как Земля для них полностью прозрачна. Существование нейтрино задолго до того, как они были обнаружены, предположил Вольфганг Паули в качестве средства для расчета баланса энергии в процессах типа распада нейтрона. Только лишь в конце 50-х годов стало возможным непосредственно детектировать нейтрино или антинейтрино, образуя огромные их количества в ядерных реакторах или ускорителях частиц. При этом несколько сот нейтрино на самом деле останавливались и вызывали реакции внутри регистрирующей аппаратуры.

Легко понять, что при такой чрезвычайной слабости взаимодействия колоссальные количества нейтрино и антинейтрино могут заполнять Вселенную вокруг нас, причем мы и не подозреваем об их существовании. Удастся получить ряд слабых верхних пределов на число нейтрино и антинейтрино; если бы этих частиц было слишком много, это слегка повлияло бы на определенные слабые ядерные процессы распада, и, вдобавок, скорость космического расширения замедлялась бы сильнее, чем наблюдается. Однако эти верхние пределы не исключают возможности того, что плотность нейтрино и (или) антинейтрино такая же, как и плотность фотонов, причем с близкими энергиями*.

* По поводу концентрации нейтрино см. дополнение редактора 7, с. 196. — *Прим. ред.*

Несмотря на эти замечания, космологи обычно предполагают, что лептонное число (числа электронов, мюонов и нейтрино *минус* числа соответствующих античастиц) на фотон мало, много меньше единицы. Это делается исключительно по аналогии: барионное число на фотон мало, так почему же лептонное число на фотон не должно быть мало? Это одно из наименее надежных предположений, вводимых в стандартную модель, но, по счастью, даже если оно и неверно, общая картина, которую мы получим, изменилась бы лишь в деталях.

Конечно, при температуре, выше пороговой для электронов, было множество лептонов и антилептонов — примерно столько же электронов и позитронов, сколько и фотонов. Кроме того, в этих условиях Вселенная была столь горяча и плотна, что даже призрачные нейтрино достигали теплового равновесия, так что нейтрино и антинейтрино было примерно столько же, сколько фотонов. Предположение, делаемое в стандартной модели, заключается в том, что лептонное число (*разность* чисел лептонов и антилептонов) есть сейчас и было тогда много меньше числа фотонов. Должен был быть какой-то небольшой избыток лептонов над антилептонами вроде упомянутого выше избытка барионов над антибарионами, который сохранился до нашего времени. Вдобавок нейтрино и антинейтрино взаимодействуют столь слабо, что большое их количество могло избежать аннигиляции, и в этом случае сейчас может быть примерно равное количество нейтрино и антинейтрино, сравнимое с числом фотонов. Похоже, что так оно и есть на самом деле (мы это увидим в следующей главе), но в обозримом будущем не предвидится ни малейшего шанса наблюдать вокруг нас эти огромные количества нейтрино и антинейтрино.

Вот, значит, каков вкратце наш рецепт состава ранней Вселенной. Возьмите электрический заряд на фотон, равный нулю, барионное число на фотон, равное одной части на миллиард, и неопределенное, но малое лептонное число на фотон. Установите в любой данный момент времени температуру, равную температуре нынешнего фона излучения 3 К, умноженную на отношение теперешнего размера Вселенной

к ее размеру в тот момент времени. Хорошенько размешайте так, чтобы детальное распределение частиц разных типов определялось требованиями теплового равновесия, и поместите в расширяющуюся Вселенную, скорость расширения которой определяется порождаемым этой средой полем тяготения. Если теперь как следует подождать, это варево должно превратиться в нашу теперешнюю Вселенную.

V. ПЕРВЫЕ ТРИ МИНУТЫ

Теперь мы подготовлены к тому, чтобы проследить ход космической эволюции в течение ее первых трех минут. Вначале события развиваются значительно быстрее, чем потом, и будет нецелесообразно показывать снимки, разделенные равными интервалами времени, как в обычном кино. Вместо этого я приспособлю скорость нашего фильма к падению температуры Вселенной, останавливая камеру, чтобы сделать снимок каждый раз, как температура упадет примерно в три раза.

К сожалению, я не могу начать фильм в нулевой момент времени при бесконечной температуре. Выше пороговой температуры полторы тысячи миллиардов градусов Кельвина ($1,5 \cdot 10^{12}$ К) Вселенная содержала большое количество частиц, известных как пи-мезоны, масса которых составляет примерно одну седьмую часть массы ядерной частицы (см. табл. 1 на с. 150). В отличие от электронов, позитронов, мюонов и нейтрино, эти пи-мезоны очень сильно взаимодействуют друг с другом и с ядерными частицами — в действительности, непрерывный обмен пи-мезонами между ядерными частицами ответственен за большую часть силы притяжения, которая удерживает от развала атомные ядра. Наличие большого количества таких сильновзаимодействующих частиц чрезвычайно затрудняет расчет поведения вещества при сверхвысоких температурах. Чтобы избежать сложных математических проблем, я начну историю в этой главе с момента времени около одной сотой секунды после начала, когда температура опустилась до нескольких сот миллиардов градусов Кельвина, что заведомо ниже пороговых температур для пи-мезонов, мюонов и всех более тяжелых частиц. В главе VII я скажу немного о

том, что, по мнению физиков-теоретиков, могло происходить ближе к самому началу.

Договорившись об этом, начнем наш фильм.

Первый кадр. Температура Вселенной равна 100 миллиардам градусов Кельвина (10^{11} К). Вселенная проще и легче поддается описанию, чем когда-либо в будущем. Она заполнена везде одинаковым, однородным по свойствам супом из вещества и излучения, причем каждая частица в нем очень быстро сталкивается с другими частицами. Поэтому, несмотря на быстрое расширение, Вселенная находится в состоянии почти идеального теплового равновесия. Составные части Вселенной определяются правилами статистической механики и вообще не зависят от того, что происходило до первого кадра. Нам надо только знать, что температура равна 10^{11} К и что сохраняющиеся величины — заряд, барионное число, лептонное число — все очень малы или равны нулю.

Частицы, имеющиеся в изобилии — это те, чья пороговая температура ниже 10^{11} К; это электрон и его античастица позитрон и, конечно, безмассовые частицы фотон, нейтрино и антинейтрино. (Вновь см. табл. 1 на с. 150). Вселенная столь плотна, что даже нейтрино, которые могут годами путешествовать сквозь свинцовые бруски, не будучи рассеянными, удерживаются в тепловом равновесии с электронами, позитронами и фотонами благодаря быстрым столкновениям с ними и друг с другом. (Опять же я буду иногда употреблять просто термин «нейтрино», подразумевая как нейтрино, так и антинейтрино.)

Другое большое упрощение — температура 10^{11} К много выше пороговой температуры для электронов и позитронов. Отсюда вытекает, что эти частицы, так же как фотоны и нейтрино, ведут себя просто как много разных сортов излучения. Какова плотность энергии этих различных сортов излучения? В соответствии с табл. 1 на с. 150, электроны и позитроны вместе вносят $7/4$ энергии фотонов, а нейтрино и антинейтрино вносят столько же, сколько электроны и позитроны*, так

* Автор имеет в виду два сорта нейтрино и антинейтрино. Учет третьего сорта (см. примечание редактора на с. 98) дал бы $7/4 + 3 \cdot (7/8) + 1 = 43/8$, что мало меняет дальнейшее. — *Прим. ред.*

что полная плотность энергии больше, чем плотность энергии чисто электромагнитного излучения при этой же температуре, на множитель

$$7/4 + 7/4 + 1 = 9/2.$$

Закон Стефана–Больцмана (см. главу III) дает для плотности энергии электромагнитного излучения при температуре 10^{11} К значение $4,72 \cdot 10^{44}$ эВ на литр, так что полная плотность энергии во Вселенной при этой температуре была в $9/2$ раза больше, или $21 \cdot 10^{44}$ эВ на литр. Это эквивалентно плотности массы 3,8 миллиарда килограмм на литр, или в 3,8 миллиарда раз больше плотности воды при нормальных земных условиях. (Когда я говорю, что данная энергия эквивалентна данной массе, я, конечно, подразумеваю, что это та энергия, которая высвободилась бы в соответствии с формулой Эйнштейна $E = mc^2$, если бы вся масса полностью превратилась в энергию.) Если бы гора Эверест состояла из вещества такой плотности, то ее притяжение разрушило бы Землю.

Вселенная в первом кадре быстро расширяется и остывает. Скорость ее расширения задается условием, что каждый кусочек Вселенной летит прочь от любого произвольного центра как раз со скоростью отрыва. При чудовищных плотностях первого кадра скорость отрыва соответственно велика — характерное время расширения Вселенной составляет примерно 0,02 с. (См. математическое дополнение 3, с. 171. «Характерное время расширения» можно грубо определить как время, в 100 раз большее того промежутка времени, за который размер Вселенной увеличился на один процент. Более точно, характерное время расширения в любую эпоху есть обратная величина «постоянной» Хаббла в эту эпоху. Как отмечено в главе II, возраст Вселенной всегда меньше характерного времени расширения, потому что тяготение непрерывно замедляет расширение.)

В момент времени, соответствующий первому кадру, имеется небольшое число ядерных частиц, около одного протона или нейтрона на каждый миллиард фотонов, электронов или нейтрино. Чтобы в конце концов предсказать распространность химических элементов, образованных в ранней Все-

ленной, нам потребуется также знать относительную пропорцию протонов и нейтронов. Нейтрон тяжелее протона, причем разность масс между ними эквивалентна энергии 1,293 миллиона электронвольт. Однако характерная энергия электронов, позитронов и других частиц при температуре 10^{11} К много больше — около 10 миллионов электронвольт (постоянная Больцмана, умноженная на температуру). Следовательно, столкновения нейтронов или протонов со значительно более многочисленными электронами, позитронами и другими частицами будут приводить к быстрым переходам протонов в нейтроны и обратно. Наиболее важными реакциями являются:

antineutrino + proton → positron + neutron (и обратно);

neutrino + neutron → electron + proton (и обратно).

С учетом нашего предположения, что полное лептонное число и заряд на фотон очень малы, количество нейтрино почти точно такое же, как и антинейтрино, а позитронов столько же, сколько электронов, так что переходы от протона к нейтрону так же быстры, как и переходы от нейтрона к протону. (Радиоактивным распадом нейтрона можно пренебречь, так как он занимает около 15 минут, а мы имеем сейчас дело со шкалой времени в сотые доли секунды.) Равновесие, таким образом, требует, чтобы количества протонов и нейтронов в первом кадре были почти равны. Эти ядерные частицы все еще не связаны в ядра; энергия, необходимая для того, чтобы разбить типичное ядро на составные части, равна всего лишь от шести до восьми миллионов электронвольт на ядерную частицу; это меньше, чем характерная тепловая энергия при температуре 10^{11} К, так что сложные ядра разрушаются так же быстро, как и образуются.

Естественным было бы спросить, насколько велика была Вселенная в очень раннее время. К сожалению, мы не знаем этого и даже не уверены, что такой вопрос имеет какой-то смысл. Как отмечалось в главе II, возможно, что сейчас Вселенная бесконечна, в таком случае она была также бесконечна и во время первого кадра и всегда будет бесконечной.

В то же время, возможно, что Вселенная сейчас имеет конечную длину окружности, иногда оцениваемую примерно в 125 миллиардов световых лет. (Длина окружности Вселенной есть то расстояние, которое нужно пройти по прямой линии, прежде чем обнаружить, что вы вернулись назад, туда, откуда был начат путь. Приведенная оценка основана на современном значении постоянной Хаббла в предположении, что плотность Вселенной примерно вдвое больше «критического» значения.) Так как температура Вселенной падает обратно пропорционально ее размеру, то длина окружности Вселенной в момент времени первого кадра была меньше теперешней пропорционально отношению температур тогда (10^{11} К) и теперь (3 К); это дает для первого кадра длину окружности около четырех световых лет. Ни одна из деталей истории космической эволюции в первые несколько минут не зависит от того, равна ли длина окружности Вселенной бесконечности или лишь несколькими световым годам.

Второй кадр. Температура Вселенной равна 30 миллиардам градусов Кельвина ($3 \cdot 10^{10}$ К). С момента первого кадра пролетело 0,11 секунды. Качественно ничего не изменилось — состав Вселенной все еще определяется электронами, позитронами, нейтрино, антинейтрино и фотонами, причем все они находятся в тепловом равновесии и при температуре значительно выше пороговой. Так как плотность энергии падает просто как четвертая степень температуры, то она в 30 миллионов раз больше плотности энергии, содержащейся в массе покоя обычной воды. Скорость расширения упала как квадрат температуры, так что характерное время расширения Вселенной теперь увеличилось до 0,2 секунды. Малое число ядерных частиц все еще не связано в атомные ядра, но с падением температуры более тяжелым нейтронам теперь существенно легче превратиться в более легкие протоны, чем наоборот. Баланс ядерных частиц по этой причине сдвинулся к 38 процентам нейтронов и 62 процентам протонов.

Третий кадр. Температура Вселенной равна 10 миллиардам градусов Кельвина (10^{10} К). С момента первого кадра пролетело 1,09 секунды. К этому времени уменьшившаяся плотность и температура настолько увеличили среднее

свободное время нейтрино и антинейтрино, что они начинают вести себя как свободные частицы, не находясь более в тепловом равновесии с электронами, позитронами и фотонами. С этого момента они перестают играть сколько-нибудь активную роль в нашей истории, за исключением того, что их энергия продолжает являться частью источника гравитационного поля Вселенной. Когда нейтрино выходят из теплового равновесия, ничего особенного не происходит. (Перед этим «отъединением» средняя длина волны нейтрино была обратно пропорциональна температуре, а так как температура падала обратно пропорционально размеру Вселенной, то длина волны нейтрино увеличивалась прямо пропорционально размеру Вселенной. После отъединения нейтрино стали свободно расширяться, но общее красное смещение продолжало растягивать их длину волны прямо пропорционально размеру Вселенной. Кстати, это показывает, что знание точного момента отъединения нейтрино не очень важно, вдобавок это и трудно сделать, так как вычисление зависит от деталей теории нейтринных взаимодействий, установленных не полностью.)

Полная плотность энергии уменьшилась по сравнению с предыдущим кадром в количество раз, равное четвертой степени отношения температур, так что сейчас она эквивалентна плотности массы, в 380 000 раз большей, чем у воды. Характерное время расширения Вселенной соответственно увеличилось примерно до двух секунд. Температура сейчас лишь вдвое превышает пороговую температуру для электронов и позитронов, так что они начинают аннигилировать быстрее, чем вновь рождаются из излучения.

Все еще слишком горячо для того, чтобы нейтроны и протоны на какое-то заметное время связались в атомные ядра. Уменьшившаяся температура позволила протон-нейтронному балансу сдвинуться к 24 процентам нейтронов и 76 процентам протонов.

Четвертый кадр. Теперь температура Вселенной равна трем миллиардам градусов Кельвина ($3 \cdot 10^9$ K). С момента первого кадра прошло 13,82 секунды. Мы теперь находимся ниже пороговой температуры для электронов и позитронов, так

что они начинают быстро исчезать, переставая быть главными составными частями Вселенной. Энергия, выделившаяся при их аннигиляции, замедлила скорость, с которой Вселенная охлаждается, так что нейтрино, которые не получили ни капли этого добавочного тепла, теперь на восемь процентов холоднее электронов, позитронов и фотонов. С этого момента, говоря о температуре Вселенной, мы будем подразумевать температуру *фотонов*. С учетом быстрого исчезновения электронов и позитронов плотность энергии Вселенной сейчас несколько меньше, чем она была бы, если бы просто падала как четвертая степень температуры.

Теперь уже достаточно прохладно для того, чтобы образовались различные стабильные ядра вроде гелия (${}^4\text{He}$), но это не происходит сразу. Причина в том, что Вселенная все еще столь быстро расширяется, что ядра могут образовываться лишь в серии быстрых двухчастичных реакций. Например, протон и нейтрон могут образовать ядро тяжелого водорода, или дейтерия, причем избыток энергии и импульса уносится фотоном. Ядро дейтерия может затем столкнуться с протоном или нейтроном и образовать либо ядро легкого изотопа гелия-3 (${}^3\text{He}$), состоящего из двух протонов и нейтрона, либо ядро самого тяжелого изотопа водорода, называемого тритием (${}^3\text{H}$), состоящего из протона и двух нейтронов. Наконец, гелий-3 может столкнуться с нейтроном, а тритий — с протоном, причем в обоих случаях образуется ядро обычного гелия (${}^4\text{He}$), состоящего из двух протонов и двух нейтронов. Но для того чтобы эта цепочка реакций произошла, нужно начать с первого шага — с образования дейтерия*.

Обычный гелий — это сильносвязанное ядро, поэтому, как я говорил, он может удерживаться и при температуре третьего кадра. Тритий и гелий-3 связаны много слабее, а дейтерий — особенно слабо. (Чтобы развалить ядро дейтерия на части, нужна лишь девятая часть той энергии, которая тре-

* В действительности, после образования дейтерия основные реакции таковы: $\text{D}+\text{D}\rightarrow\text{T}+p$; $\text{T}+\text{D}\rightarrow{}^4\text{He}+p$; $\text{D}+\text{D}\rightarrow{}^3\text{He}+n$; $n+{}^3\text{He}\rightarrow\text{T}+p$ и $\text{T}+\text{D}\rightarrow{}^4\text{He}+p$. Эти реакции, не требующие испускания кванта, более вероятны по сравнению с приведенными в тексте реакциями присоединения $\text{D}+\text{D}\rightarrow\text{T}+\gamma$; $\text{T}+p\rightarrow{}^4\text{He}+\gamma$. — *Прим. ред.*

буется, чтобы выбить одну ядерную частицу из ядра гелия). При температуре четвертого кадра 10^{10} К ядра дейтерия разрушаются так же быстро, как и образуются, поэтому более тяжелые ядра не имеют шансов образоваться. Нейтроны продолжают превращаться в протоны, хотя и значительно медленнее, чем раньше; баланс теперь составляет 17 процентов нейтронов и 83 процента протонов.

Пятый кадр. Теперь температура Вселенной равна одному миллиарду градусов Кельвина (10^9 К), что всего лишь в 70 раз горячее, чем в центре Солнца. С момента первого кадра прошло три минуты и две секунды. Большинство электронов и позитронов исчезло, и главными составными частями Вселенной являются теперь фотоны, нейтрино и антинейтрино. Энергия, выделившаяся при аннигиляции электронов и позитронов, дала фотонам температуру на 35 процентов большую, чем у нейтрино.

Сейчас Вселенная уже достаточно прохладна, чтобы могли удерживаться ядра трития и гелия-3 так же, как и обычного гелия, однако «дейтериевая щель»^{**} все еще существует: ядра дейтерия не удерживаются от развала достаточно долго для того, чтобы дать возможность образоваться заметному числу более тяжелых ядер. Столкновения нейтронов и протонов с электронами, нейтрино с их античастицами сейчас стали уже довольно редкими, но становится существенным распад свободного нейтрона; каждые 100 секунд 10 процентов остающихся нейтронов распадаются на протоны. Теперь нейтрон-протонный баланс составляет 14 процентов нейтронов и 86 процентов протонов.

Чуть позже. В какой-то момент времени, вскоре после пятого кадра, происходит драматическое событие: температура падает до точки, при которой ядра дейтерия могут удерживаться от развала. Раз пройдена дейтериевая щель, более тяжелые ядра могут очень быстро образовываться в цепочке двухчастичных реакций, описанных в четвертом кадре*. Однако ядра тяжелее гелия не образуются в заметном количест-

^{**} Здесь автор употребляет слово «bottleneck», что буквально означает «горлышко бутылки». — *Прим. пер.*

* См. примечание редактора на с. 111.

ве благодаря другим щелям: не существует стабильных ядер с пятью или восемью ядерными частицами **. Следовательно, как только температура достигает точки, когда может образоваться дейтерий, почти все оставшиеся нейтроны немедленно уходят на приготовление ядер гелия. Точная температура, при которой это происходит, слегка зависит от числа ядерных частиц на фотон, так как высокая плотность частиц несколько облегчает образование ядер. (Именно поэтому данный момент времени я обозначил неопределенно словами «чуть позже, чем пятый кадр».) В случае одного миллиарда фотонов на одну ядерную частицу нуклеосинтез начнется при температуре 900 миллионов градусов Кельвина ($0,9 \times 10^9$ K). С момента первого кадра прошло уже три минуты и сорок шесть секунд. (Читатель простит мне неточность в названии этой книги «Первые три минуты». Это просто лучше звучит, чем «Первые три и три четверти минуты».) Как раз перед началом нуклеосинтеза, нейтронный распад сдвинул нейтрон-протонный баланс до 13 процентов нейтронов и 87 процентов протонов. После нуклеосинтеза доля гелия по массе в точности равна доле всех ядерных частиц, связанных в гелии; половина из них — нейтроны, и практически все нейтроны связаны в ядре гелия, так что доля гелия по массе просто есть удвоенная доля нейтронов среди ядерных частиц, т. е. около 26 процентов. Если плотность ядерных частиц несколько выше, нуклеосинтез начнется немного раньше, когда еще распалось не так много нейтронов, поэтому образуется чуть больше гелия, но, вероятно, не более чем 28 процентов по массе (рис. 9).

Мы теперь достигли и даже перешли запланированную точку по времени, но, чтобы лучше увидеть то, чего мы достигли, бросим последний взгляд на Вселенную после еще одного падения температуры.

Шестой кадр. Теперь температура Вселенной равна 300 миллионам градусов Кельвина ($3 \cdot 10^8$ K). С момента первого кадра прошло 34 минуты и 40 секунд. Все электроны и позитроны теперь полностью проаннигилировали, за исключением маленького (одна часть на миллиард) избытка электронов, не-

** Строго говоря, существуют медленно распадающиеся ядра ${}^5\text{He}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^8\text{B}$, но вероятность их образования очень мала. — *Прим. ред.*

обходимого для компенсации заряда протонов. Выделившаяся при этой аннигиляции энергия дала фотонам температуру, которая теперь уж навсегда на 40,1 процента выше, чем у нейтрино (см. математическое дополнение 6, с. 179). Плотность энергии Вселенной эквивалентна теперь плотности массы, составляющей 9,9 процента плотности воды; 31 процент находится в форме нейтрино и антинейтрино и 69 процентов — в форме фотонов. Такая плотность энергии дает характерное время расширения Вселенной, равное одному часу с четвертью. Ядерные процессы остановились — ядерные частицы большей частью либо связаны в ядра гелия, либо являются свободными протонами (ядрами водорода), причем доля гелия по массе — от 22 до 28 процентов. На каждый свободный или связанный протон имеется один электрон, но Вселенная все еще слишком горяча, чтобы могли удержаться стабильные атомы.

[bb=0 0 97.6mm 68.8mm]v09.pcx

Рис. 9. Сдвиг нейтрон-протонного баланса.

Показана доля нейтронов по отношению ко всем ядерным частицам как функция температуры и времени. Часть кривой, помеченная надписью «тепловое равновесие», описывает период, в течение которого плотности и температуры были столь высоки, что среди всех частиц достигалось тепловое равновесие; доля нейтронов в этой области может быть вычислена по известной разности масс нейтрона и протона с помощью правил статистической механики. Часть кривой, помеченная надписью «распад нейтрона», описывает период, в течение которого все процессы взаимопревращений нейтронов и протонов исчезли, за исключением радиоактивного распада свободного нейтрона. Сплошная часть кривой зависит от детальных расчетов вероятностей процессов слабого взаимодействия. Пунктирная часть кривой показывает, что случилось бы, если бы каким-то образом было предотвращено образование ядер. В действительности, в момент времени где-то внутри интервала, отмеченного стрелкой с надписью «эра нуклеосинтеза», нейтроны быстро объединились в ядра гелия и нейтрон-протонное отношение замерзло на том значении, которое оно в этот момент имело. Эту кривую можно также использовать для оценки доли (по массе) космологически образованного гелия: для любой данной температуры или данного времени нуклеосинтеза эта доля в точности равна удвоенной нейтронной фракции в этот момент

Вселенная будет продолжать расширяться и охлаждаться, но в течение 700 000 лет не произойдет ничего особенно

интересного. К этому времени температура упадет до точки, когда электроны и ядра могут образовывать стабильные атомы; исчезновение свободных электронов сделает содержимое Вселенной прозрачным для излучения; разьединение вещества и излучения позволит веществу начать формироваться в галактики и звезды. Пройдет еще примерно 10 миллиардов лет, и живые существа начнут реконструировать эту историю.

Этот расчет ранней Вселенной имеет одно следствие, которое немедленно можно сопоставить с наблюдениями: оставшийся после первых трех минут материал, из которого должны были первоначально образоваться звезды, состоял на 22–28 процентов из гелия, а остальное почти все было водородом. Как мы видели, этот результат зависит от предположения, что имеется огромное отношение числа фотонов к числу ядерных частиц, что, в свою очередь, основано на измеренной температуре теперешнего фона космического микроволнового излучения, равной 3 К. Первый расчет космологического образования гелия, использовавший измеренную температуру излучения, был сделан П. Дж. Е. Пиблзом в Принстоне в 1965 году, вскоре после открытия Пензиасом и Вилсоном микроволнового фона. Похожий результат был независимо получен почти в то же самое время в более искусном вычислении Роберта Вагонера, Уильяма Фаулера и Фреда Хойла. Этот результат был ошеломляющим успехом стандартной модели, так как в это время уже имелись независимые оценки, что Солнце и другие звезды начали свою жизнь, состоя большей частью из водорода и лишь на 20–30 процентов из гелия!

Конечно, на Земле очень мало гелия, но это только потому, что атомы гелия так легки и так химически инертны, что большинство их покинуло Землю многие века тому назад. Оценки изначальной распространенности гелия во Вселенной основаны на сравнении детальных расчетов звездной эволюции со статистическим анализом наблюдаемых свойств звезд, а также с прямыми наблюдениями линий гелия в спектрах горячих звезд и межзвездного материала. В самом деле, как указывает само название, гелий был идентифицирован впервые как элемент при исследовании спектра солнечной атмосферы

Дж. Норманом Локайром в 1868 году.

В начале 60-х годов несколькими астрономами было отмечено, что распространенность гелия в Галактике не только велика, но и не меняется от места к месту так же сильно, как меняется распространенность более тяжелых элементов. Это, конечно, как раз то, что и нужно было ожидать, если тяжелые элементы образовывались в звездах, а гелий образовался в ранней Вселенной прежде, чем начала приготовляться любая звезда. Имеется все еще довольно много неопределенностей и колебаний в оценках распространенности ядер, но свидетельство в пользу изначальной 20–30-процентной распространенности гелия достаточно сильно для того, чтобы весьма воодушевить приверженцев стандартной модели.

Вдобавок к большому количеству гелия, образованного в конце первых трех минут, имелись также следы более легких ядер, особенно дейтерия (ядро водорода плюс один лишний нейтрон) и легкого изотопа гелия ^3He , избежавших объединения в ядра обычного гелия. (Их распространенность была впервые вычислена в 1967 году Вагнером, Фаулером и Хойлом.) В противоположность распространенности гелия, распространенность дейтерия очень чувствительна к плотности ядерных частиц в момент нуклеосинтеза: при высоких плотностях ядерные реакции происходят быстрее, так что почти весь дейтерий должен уйти в состав гелия. Для определенности приведем значения распространенности дейтерия (по массе)*, образованного в ранней Вселенной, полученные Вагнером для трех возможных значений отношения числа фотонов к числу ядерных частиц:

Фотон/ядерная частица	Распространенность дейтерия, части на миллион
100 миллионов	0,00008
1000 миллионов	16
10 000 миллионов	600

Ясно, что если бы мы могли определить изначальную распространенность дейтерия, существовавшую перед тем, как начала приготовляться звезды, то мы могли бы точно определить

* По отношению к массе вещества. — *Прим. ред.*

отношение числа фотонов к числу ядерных частиц; зная нынешнюю температуру излучения, равную 3 К, мы смогли бы затем найти точное значение плотности массы ядер во Вселенной в настоящий момент и судить о том, открыта она или закрыта.

К сожалению, очень трудно определить истинную первичную распространенность дейтерия. Классическое значение для распространенности по массе дейтерия в воде на Земле — 150 частей на миллион. (Именно дейтерий будет использоваться в качестве топлива термоядерных реакторов, если когда-нибудь удастся должным образом управлять термоядерными реакциями.) Однако это искаженная временем цифра; тот факт, что атомы дейтерия вдвое тяжелее атомов водорода, дает им возможность несколько более охотно связываться в молекулы тяжелой воды (HDO), так что из поля притяжения Земли должна была вырваться меньшая доля дейтерия, чем водорода. В то же время спектроскопия указывает на очень малую распространенность дейтерия на поверхности Солнца — меньше, чем четыре части на миллион. Это тоже искаженная цифра — дейтерий во внешних областях Солнца должен был быть большей частью уничтожен путем реакции с водородом с превращением в легкий изотоп гелия ^3He .

Наши знания о распространенности космического дейтерия были поставлены на значительно более прочную основу в 1973 году, благодаря наблюдениям в ультрафиолетовом диапазоне с искусственного спутника Земли «Коперник». Атомы дейтерия, как и водорода, могут поглощать ультрафиолетовый свет строго определенных длин волн, соответствующих переходам, в которых атом возбуждается из состояния наименьшей энергии в более высокое по энергии состояние. Эти длины волн слегка зависят от массы атомного ядра, так что ультрафиолетовый спектр звезды, чей свет доходит до нас сквозь межзвездную смесь водорода и дейтерия, будет пересечен рядом темных линий поглощения, разделенных на две компоненты каждая, одна из которых — от водорода, а другая — от дейтерия. Относительное потемнение любой пары компонент линий поглощения немедленно даст тогда относительную распространенность водорода и дейтерия в межзвездном облаке.

К сожалению, атмосфера Земли такова, что очень трудно с поверхности осуществить какие бы то ни было астрономические наблюдения в ультрафиолетовой области. Спутник «Коперник» нес на себе ультрафиолетовый спектрометр, который был использован для изучения линий поглощения в спектре горячей звезды β Центавра; из их относительной интенсивности было найдено, что межзвездная среда между нами и β Центавра содержит около 20 частей на миллион (по массе) дейтерия. Более поздние наблюдения линий ультрафиолетового поглощения в спектрах других горячих звезд дали аналогичные результаты.

Если эти 20 частей на миллион дейтерия действительно образовались в ранней Вселенной, тогда должно было быть (и есть сейчас) как раз около 1,1 миллиарда фотонов на одну ядерную частицу (см. таблицу выше). При теперешней температуре космического излучения 3 К имеется 550 000 фотонов в литре, так что сейчас должно быть около 500 ядерных частиц на миллион литров. Это существенно меньше, чем минимальная плотность для замкнутой Вселенной, которая, как мы видели в главе II, равна примерно 3000 ядерных частиц на миллион литров. Следовательно, нужно сделать вывод, что Вселенная открыта; это значит, что галактики движутся со скоростью, превышающей скорость отрыва, и Вселенная будет расширяться всегда. Если часть межзвездного газа захватывается звездами, которые стремятся уничтожить дейтерий (как на Солнце), тогда распространенность космологически образованного дейтерия должна быть даже больше, чем найденное с помощью спутника «Коперник» значение 20 частей на миллион. Отсюда, плотность ядерных частиц должна быть даже меньше, чем 500 частиц на миллион литров, что усиливает вывод: мы живем в открытой, вечно расширяющейся Вселенной.

Должен сказать, что сам я нахожу эту аргументацию довольно неубедительной. Дейтерий непохож на гелий — хотя его распространенность и кажется выше, чем следовало бы ожидать для относительно плотной закрытой Вселенной, он все же чрезвычайно редок в абсолютных единицах. Мы можем представить себе, что такое количество дейтерия было обра-

зовано в «недавних» астрофизических явлениях — вспышках сверхновых, космическом излучении, возможно, даже в квазизвездных объектах. Для гелия это не так; 20–30-процентная распространенность не могла быть создана недавно без высвобождения чудовищного количества излучения, которого мы не наблюдаем. Считается, что дейтерий в количестве 20 частей на миллион, найденный «Коперником», не мог бы образоваться ни в каком из обычных астрофизических механизмов без образования также неприемлемо большого количества других редких элементов: лития, бериллия и бора. Однако я не вижу, как мы можем быть уверены в том, что эти следы дейтерия не были образованы каким-то не космологическим механизмом, о котором до сих пор еще никто не думал.

Есть еще один остаток ранней Вселенной, находящийся в настоящее время всюду вокруг нас, который, по-видимому, все еще невозможно наблюдать. Мы видели в третьем кадре, что нейтрино начали вести себя как свободные частицы с того момента, как космическая температура упала ниже примерно 10 миллиардов градусов Кельвина. В течение этого времени длины волн нейтрино просто растягивались пропорционально размеру Вселенной; количество нейтрино и их распределение по энергии оставались, следовательно, таким же, какими они были в тепловом равновесии, но с температурой, падавшей обратно пропорционально размеру Вселенной. С нейтрино произошло почти то же самое, что случилось за это время с фотонами, даже несмотря на то, что фотоны оставались в тепловом равновесии значительно дольше, чем нейтрино. Так что современная температура нейтрино должна быть приблизительно такой же, как и современная температура фотонов. Поэтому должно существовать что-то около миллиарда нейтрино и антинейтрино на каждую ядерную частицу во Вселенной.

Все это можно рассмотреть значительно более точно. Чуть позднее того момента, как Вселенная стала прозрачной для нейтрино, электроны и позитроны начали аннигилировать, нагревая фотоны, но не нейтрино. Вследствие этого нынешняя температура нейтрино должна быть несколько меньше температуры фотонов. Довольно легко подсчитать, что температура нейтрино меньше температуры фотонов на мно-

житель, равный кубическому корню из $4/11$, или на 71,38 процента; следовательно, нейтрино и антинейтрино вносят вклад в энергию Вселенной, равный 45,42 процента энергии фотонов (см. математическое дополнение 6, с. 179). Хотя я и не говорил об этом прямо, когда обсуждал промежутки времени космического расширения, я учитывал эту добавочную плотность энергии нейтрино.

Наиболее драматическим из возможных подтверждений стандартной модели ранней Вселенной было бы детектирование этого фона нейтрино. Мы имеем четкое предсказание о его температуре; она составляет 71,38 процента температуры фотонов, т.е. около 2 К. Единственной реальной теоретической неопределенностью в количестве и энергетическом распределении нейтрино остается вопрос, так ли мала плотность лептонного числа, как мы предположили. (Напомним, что лептонное число есть число нейтрино и других лептонов минус число антинейтрино и других антилептонов.) Если плотность лептонного числа так же мала, как и плотность барионного числа, тогда число нейтрино должно равняться числу антинейтрино с точностью до одной части на миллиард. В то же время, если плотность лептонного числа сравнима с плотностью числа фотонов, тогда должно быть «вырождение», т.е. заметный избыток нейтрино (или антинейтрино) и недостаток антинейтрино (или нейтрино). Такое вырождение должно было повлиять на сдвиг нейтрон-протонного баланса в первые три минуты и, следовательно, изменило бы количество космологически образованных гелия и дейтерия. Наблюдение фона космических нейтрино и антинейтрино с температурой 2 К немедленно разрешило бы вопрос, имеет ли Вселенная большое лептонное число, и, что значительно более важно, доказало бы, что стандартная модель ранней Вселенной действительно правильна.

Увы, нейтрино так слабо взаимодействуют с обычным веществом, что никто еще не смог предложить какой-либо способ наблюдения двухградусного фона космических нейтрино. Это поистине мучительная проблема: на каждую ядерную частицу имеется около миллиарда нейтрино и антинейтрино и до сих пор никто не знает, как их обнаружить! Возможно, ког-

да-нибудь кто-нибудь сможет.

Следя за этим расчетом первых трех минут, читатель мог ощутить с моей стороны оттенок чрезмерной научной уверенности. Может быть, он и прав. Однако я не верю в то, что наука всегда развивается наилучшим образом, если оставаться полностью непредубежденным. Часто необходимо забыть чьи-то сомнения и следовать за выводами из каких-то предположений, куда бы они ни привели, — великое искусство не в том, чтобы быть свободным от теоретических предубеждений, а в том, чтобы иметь правильные теоретические предубеждения. И, как всегда, проверка любой предварительной теоретической концепции — в том, к чему она приводит. Стандартная модель ранней Вселенной достигла некоторых успехов и обеспечивает последовательную теоретическую основу будущих экспериментальных программ. Это не значит, что она верна, но это значит, что она заслуживает того, чтобы отнестись к ней серьезно.

Тем не менее *есть* все-таки одна большая неопределенность, темным облаком висящая над стандартной моделью. В основе всех вычислений, описанных в этой главе, лежит Космологический Принцип (предположение о том, что Вселенная однородна и изотропна). (См. с. 33. Под словом «однородна» мы понимаем то, что Вселенная выглядит одинаково для любого наблюдателя, увлекаемого общим расширением Вселенной, где бы этот наблюдатель ни находился; под словом «изотропна» мы подразумеваем, что Вселенная выглядит для такого наблюдателя одинаково во всех направлениях.) Из прямых наблюдений мы знаем, что фон космического излучения в высокой степени изотропен, и из этого мы заключаем, что Вселенная была весьма изотропна и однородна всегда, с тех пор как излучение вышло из равновесия с веществом при температуре около 3000 К. Однако у нас нет свидетельств того, что Космологический Принцип был справедлив до этого момента.

Возможно, что Вселенная изначально была в высокой степени неоднородной и анизотропной, но постепенно сгладилась благодаря силам трения. Такая «перемешивающаяся» модель пропагандировалась, в частности, Чарльзом Мизнером из Мэрилендского университета. Возможно даже, что тепло, порож-

денное в процессе гомогенизации и изотропизации Вселенной силами трения, ответственно за теперешнее колоссальное (миллиард к одному) отношение фотонов к ядерным частицам. Однако, насколько мне известно, никто не может сказать, почему Вселенная должна иметь какую-то начальную степень неоднородности или анизотропии, и никто не знает, как рассчитать образованное при ее сглаживании тепло*.

По моему мнению, правильное отношение к подобным неопределенностям не в том, чтобы (как, может быть, хотят некоторые космологи) отдать на слом стандартную модель, а скорее в том, чтобы воспринимать ее очень серьезно и тщательно разрабатывать ее следствия, даже лишь в надежде выявить противоречия с наблюдениями. Ведь неясно даже, могли ли большая начальная анизотропия и неоднородность сильно повлиять на рассказанную в этой главе историю. Могло быть так, что Вселенная сгладилась в первые несколько секунд; в этом случае космологическое образование гелия и дейтерия может быть рассчитано так, будто Космологический Принцип был всегда верен. Даже если анизотропия и неоднородность Вселенной продолжали сохраняться после эры синтеза гелия, образование гелия и дейтерия в любом однородно расширяющемся комке зависело бы только от скорости расширения внутри этого комка и не должно было слишком отличаться от рассчитанного по стандартной модели. Могло быть даже и так, что вся Вселенная, доступная нашему взору, обращенному к моменту нуклеосинтеза, была не что иное, как однородный и изотропный комок внутри неоднородной и анизотропной Вселенной.

Неопределенность, связанная с Космологическим Принципом, становится действительно существенной, когда мы обращаемся назад, к самому началу, или вперед, к концу Вселенной. Я буду полагаться на этот Принцип в большей части двух последних глав. Однако всегда следует допускать, что наши простые космологические модели могут описывать лишь малую часть Вселенной или ограниченный отрезок ее истории.

* См. дополнение редактора 8, с. 200. — *Прим. ред.*

VI. ИСТОРИЧЕСКОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ

Давайте оставим на время историю ранней Вселенной и рассмотрим историю последних трех десятилетий космологических исследований. В особенности я хочу попытаться разрешить здесь историческую проблему, которая представляется мне в равной степени загадочной и поразительной. Обнаружение в 1965 году фона космического микроволнового излучения было одним из самых важных научных открытий двадцатого века. Почему оно произошло случайно? Или, другими словами, почему не было систематических поисков этого излучения задолго до 1965 года?

Как мы видели в последней главе, измеренные современные значения температуры фона излучения и плотности массы Вселенной позволяют нам предсказать космическую распространенность легких элементов, находящуюся, как представляется, в хорошем согласии с наблюдениями. Задолго до 1965 года можно было привести обратное вычисление, предсказать фон космического излучения и начать его поиски. Из наблюдаемой в настоящее время космической распространенности гелия (около 20–30 процентов) и водорода (70–80 процентов), можно было вывести, что нуклеосинтез должен был начаться в то время, когда нейтронная фракция ядерных частиц упала до 10–15 процентов. (Напомним, что нынешняя распространенность гелия по массе есть в точности удвоенное значение нейтронной фракции в момент нуклеосинтеза.) Такое значение нейтронной фракции было достигнуто, когда Вселенная имела температуру около одного миллиарда градусов Кельвина (10^9 K). Условие, что нуклеосинтез начался в этот момент, позволяет сделать грубую оценку плотности ядерных частиц при температуре 10^9 K, в то время как плотность фотонов при такой температуре можно вычислить из известных свойств излучения черного тела. Следовательно, для этого момента было бы также известно отношение числа фотонов и ядерных частиц. Но это отношение не меняется, так что оно стало бы столь же хорошо известно и для настоящего времени. Из наблюдений теперешней плотности ядерных частиц можно было бы, следовательно, предсказать тепереш-

ную плотность фотонов и прийти к выводу о существовании фона космического микроволнового излучения с температурой где-то в интервале от 1 до 10 К. Если бы история науки была так же проста и прямолинейна, как история Вселенной, то кто-нибудь, рассуждая указанным способом, должен был бы сделать такое предсказание в 40-х или 50-х годах, и оно побудило бы радиоастрономов искать фон излучения. Но случилось не совсем так.

Действительно, предсказание, во многом соответствовавшее приведенной линии рассуждений, *было* сделано в 1948 году, но ни тогда, ни позже оно не привело к поискам излучения. В конце 40-х годов Георгий Гамов и его коллеги Ральф А. Альфер и Роберт Херман исследовали космологическую теорию «большого взрыва». Они предположили, что Вселенная стартовала из состояния с одними нейтронами и что затем нейтроны начали превращаться в протоны благодаря знакомому нам процессу радиоактивного распада, в котором нейтрон спонтанно превращается в протон, электрон и антинейтрино. В какой-то момент расширения стало достаточно прохладно для того, чтобы из нейтронов и протонов построились ядра тяжелых элементов путем быстрой последовательности нейтронных захватов. Альфер и Херман обнаружили, что, для того чтобы вычислить нынешнюю наблюдаемую распространенность легких элементов, необходимо предположить, что отношение числа фотонов к ядерным частицам составило бы порядка миллиарда. Используя оценки теперешней космической плотности ядерных частиц, они смогли предсказать существование фона излучения, оставшегося от ранней Вселенной, с температурой в настоящее время равной 5 К!

Первоначальные вычисления Альфера, Хермана и Гамова не были правильны во всех деталях. Как мы видели в предыдущей главе, Вселенная, вероятно, стартовала с равным числом нейтронов и протонов, а не из нейтронного состояния. Кроме того, превращение нейтронов в протоны (и наоборот) имело место, главным образом, благодаря их столкновениям с электронами, позитронами, нейтрино и антинейтрино, а не путем радиоактивного распада нейтронов. Эти моменты были отмечены в 1950 году К. Хаяши, и к 1953 году Альфер и Хер-

ман (вместе с Дж. В. Фоллином-младшим) пересмотрели свою модель и сделали в основном правильное вычисление сдвига нейтрон-протонного баланса. Это был, на самом деле, первый подробный современный анализ ранней истории Вселенной.

Тем не менее ни в 1948, ни в 1953 году никто не соби-
рался искать предсказанное микроволновое излучение. Более того, в течение многих лет до 1965 года астрофизикам вообще не было известно, что в моделях «большого взрыва» наблюдаемая распространенность водорода и гелия с неизбежностью приводит к существованию в нынешней Вселенной фона космического излучения, который может реально наблюдаться. Удивительно здесь не то, что астрофизики вообще не знали о предсказании Альфера и Хермана, — одна или две статьи всегда могут ускользнуть из поля зрения в огромном океане научной литературы, — значительно загадочнее, что более десяти лет никто больше не продолжал эту линию рассуждений. Лишь в 1964 году вновь начались вычисления процесса нуклеосинтеза в модели «большого взрыва» работавшими независимо Я. Б. Зельдовичем в СССР, Хойлом и Р. Дж. Тайлером в Великобритании и Пиблзом в США. Однако к этому времени Пензиас и Вилсон уже начали свои наблюдения в Холмделе, и открытие микроволнового фона произошло без всякого «подстрекательства» со стороны космологов-теоретиков.

Столь же загадочно, что те, кто знал о предсказании Альфера-Хермана, казалось, не придавали ему особого значения. Сами Альфер, Фоллин и Херман в работе 1953 года оставили проблему нуклеосинтеза для «будущих исследований», так что они не собирались вновь вычислять температуру фона микроволнового излучения на основе своей исправленной модели. (Они также не упомянули свое более раннее предсказание, что ожидается фон излучения, равный 5 К. Они сообщили о некоторых вычислениях нуклеосинтеза на собрании Американского Физического Общества в 1953 году, но затем все трое разъехались по разным лабораториям, и работа так никогда и не была написана в окончательном виде). Много лет спустя в письме к Пензиасу, написанному после открытия фона микроволнового излучения, Гамов отмечал, что в своей работе 1953 года в «Сообщениях Королевской Датской Академии»

он предсказал фон излучения с примерно правильной температурой 7 К. Однако взгляд на эту работу 1953 года показывает, что предсказание Гамова основывалось на математически ошибочных аргументах, относящихся к возрасту Вселенной, а не на его собственной теории космического нуклеосинтеза.

Можно возразить, что космическая распространенность легких элементов не была достаточно хорошо известна в 50-х и в начале 60-х годов для того, чтобы вывести определенное заключение о температуре фона излучения. Даже сейчас мы не до конца уверены, что имеется универсальная распространенность гелия на уровне 20–30 процентов. Однако важно то, что задолго до 1960 года считалось признанным, что большая часть массы Вселенной находится в форме водорода. (Например, исследования Ганса Суесса и Гарольда Ури дали в 1956 году для распространенности водорода число 75 процентов по массе.) И при этом водород *не* образовался в звездах — это то первичное топливо, из которого звезды черпали свою энергию, образуя более тяжелые элементы. Это уже само по себе достаточно ясно говорит нам о том, что в ранней Вселенной должно было быть большое отношение фотонов к ядерным частицам, чтобы предотвратить превращение всего водорода в гелий и более тяжелые элементы.

Кто-то может спросить: а когда на самом деле стало технически возможным наблюдать трехградусный изотропный фон излучения? Трудно ответить точно, но мои коллеги-экспериментаторы говорят мне, что наблюдения могли быть проведены задолго до 1965 года, возможно, в середине 50-х, а может быть, даже и в середине 40-х годов. В 1946 году группа ученых из МТИ, возглавлявшаяся не кем иным, как Робертом Дикке, смогла установить верхний предел на любой изотропный внеземной фон излучения: эквивалентная температура была меньше 20 К на длинах волн 1,00; 1,25 и 1,50 см. Это измерение было побочным продуктом излучения атмосферного поглощения и, безусловно, не являлось частью программы наблюдательной космологии. (Дикке сообщил мне, что к тому времени, когда он начал интересоваться возможным фоном космического микроволнового излучения, он забыл о верхнем пределе 20 К на температуру фона, полученным им самим поч-

ти два десятилетия назад!)

Мне не кажется очень существенным с исторической точки зрения точно определить момент, когда стало возможным детектирование трехградусного изотропного микроволнового фона. Здесь важно то, что радиоастрономы не знали, что они должны пытаться его обнаружить! Рассмотрим для контраста историю нейтрино. Когда в 1930 году Паули впервые предположил существование нейтрино, было ясно, что нет ни малейшего шанса наблюдать эту частицу в любом из возможных тогда экспериментов. Однако детектирование нейтрино оставалось в умах физиков вызывающей задачей, и, когда в 50-е годы для этих целей стали доступны ядерные реакторы, нейтрино начали искать и нашли. Еще более яркий пример — открытие антипротона. После того как в 1932 году в космических лучах был открыт позитрон, большинство теоретиков ожидало, что протон, так же как и электрон, должен иметь свою античастицу. Не было никакой надежды образовать антипротоны на первых циклотронах, построенных в 30-х годах, но физики полностью сознавали значение этой проблемы, и в 50-е годы был построен ускоритель (беватрон в Беркли) специально так, чтобы иметь достаточно энергии для образования антипротонов. Ничего похожего не произошло в случае с фоном космического микроволнового излучения до тех пор, пока Дикке с сотрудниками не вознамерились обнаружить его в 1964 году. Но даже тогда Принстонская группа не была осведомлена о сделанной более десяти лет назад работе Гамова, Альфера и Хермана!

В чем же тогда дело? Можно указать, по меньшей мере, три интересные причины, почему большинство ученых не понимало важности поисков трехградусного фона микроволнового излучения в 50-х и начале 60-х годов.

Во-первых, следует отдавать себе отчет в том, что Гамов, Альфер, Херман, Фоллин и другие работали в рамках более общей космогонической теории. В их теории «большого взрыва» предполагалось, что все без исключения сложные ядра, а не только гелий, были построены в ранней Вселенной с помощью процесса быстрого добавления нейтронов. Однако, хотя эта теория правильно предсказывала отношения рас-

пространенностей ряда тяжелых элементов, она сталкивалась с трудностями в объяснении того, почему вообще появились какие-то тяжелые элементы! Как уже отмечалось, не существует стабильных ядер с пятью или восемью ядерными частицами, поэтому невозможно построить ядро тяжелее гелия добавлением к ядрам гелия (^4He) нейтронов или протонов либо слиянием двух ядер гелия. (Это обстоятельство было впервые отмечено Энрико Ферми и Антони Туркевичем.) Имея в виду эту трудность, становится понятным, почему теоретики совершенно не желали серьезно относиться к расчету образования гелия в такой теории.

Космологическая теория синтеза элементов еще больше потеряла под собой почву, когда были сделаны усовершенствования в альтернативной теории, согласно которой элементы синтезировались в звездах. В 1952 году Э. Э. Солпитер показал, что на пропасти, отвечающей ядрам с пятью или восемью ядерными частицами, могут быть наведены мосты в плотных, богатых гелием сердцевинах звезд: при столкновениях двух ядер гелия образуется нестабильное ядро бериллия (^8Be), и при условиях высокой плотности ядро бериллия прежде, чем распадется, может наткнуться на другое ядро гелия, образуя стабильное ядро углерода (^{12}C). (Плотность Вселенной к моменту космологического нуклеосинтеза слишком низка, чтобы этот процесс мог тогда происходить.) В 1957 году появилась знаменитая статья Джеффри и Маргарет Бербиджей, Фаулера и Хойла, в которой было показано, что тяжелые элементы могли быть образованы в звездах, особенно в звездных взрывах (подобных сверхновым) в периоды интенсивного нейтронного потока. Но даже до 50-х годов среди астрофизиков сильна была склонность верить, что все элементы, кроме водорода, образовались в звездах. Хойл заметил мне, что это мнение могло быть следствием той борьбы, которую должны были вести астрономы в первые десятилетия нашего века, чтобы понять источник энергии, образующийся в звездах. К 1940 году из работ Ганса Бете и других стало ясно, что основной процесс — это слияние четырех ядер водорода в одно ядро гелия, и такая картина привела в 40-х и 50-х годах к быстрым успехам в понимании звездной эволюции. Как го-

ворит Хойл, после всех этих успехов многим астрофизикам казалось извращением сомневаться в том, что звезды являются местом формации элементов.

Но звездная теория нуклеосинтеза тоже имеет свои проблемы. Трудно представить, каким образом звезды могли образовывать гелий в таком количестве, что его распространенность достигла 25–30 процентов. Действительно, энергия, которая должна была высвободиться при таком синтезе, была бы много больше той, которую звезды, как представляется, могли излучить за всю их жизнь. Космологическая теория очень тонко обходится с этой энергией — энергия просто теряется при общем красном смещении. В 1964 году Хойл и Р. Дж. Тайлер отметили, что гелий с такой большой распространенностью, как в теперешней Вселенной, не мог быть создан в обычных звездах. Они провели вычисление количества гелия, которое должно было образоваться на ранних стадиях «большого взрыва», и получили значение распространенности 36 процентов по массе. Довольно забавно, что они зафиксировали момент времени, когда должен был произойти нуклеосинтез, соответствующий более или менее произвольной температуре пять миллиардов градусов Кельвина, несмотря на то, что это предположение зависит от выбранного значения неизвестного тогда параметра — отношения числа фотонов к числу ядерных частиц. Если бы они использовали свои вычисления для оценки этого отношения из наблюдаемой распространенности гелия, они смогли бы предсказать нынешний фон микроволнового излучения с температурой примерно правильного порядка величины. Тем не менее поразительно, что Хойл, один из создателей теории стационарного состояния, хотел следовать этой линии рассуждений и подтвердить, что она дает свидетельство в пользу чего-то вроде модели «большого взрыва».

В настоящее время общепризнано, что нуклеосинтез происходил *как* космологически, *так* и в звездах; гелий и, возможно, другие легкие ядра были синтезированы в ранней Вселенной, а звезды ответственны за все остальное. Теория нуклеосинтеза в «большом взрыве», пытаясь сделать слишком многое, перестала внушать доверие, которого она действительно заслуживала как теория синтеза гелия.

Во-вторых, это был классический пример разрыва связи между теоретиками и экспериментаторами. Большинство теоретиков никогда не сознавало, что изотропный трехградусный фон излучения может быть когда-нибудь обнаружен. В письме к Пиблзу, датированном 23 июня 1967 года, Гамов объясняет, что ни он, ни Альфер и Херман не рассматривали возможности детектирования оставшегося после «большого взрыва» излучения, так как к моменту появления их работы по космологии радиоастрономия была еще в младенческом состоянии. (Однако Альфер и Херман сообщили мне, что они на самом деле изучали возможность наблюдения фона космического излучения совместно с экспертами по радарам в Университете Джона Гопкинса, Морской исследовательской лаборатории в Национальном Бюро Стандартов, но им было сказано, что температура фона излучения 5 или 10 К слишком низка, чтобы быть обнаруженной доступной тогда техникой). В то же время, кажется, некоторые советские астрофизики понимали, что микроволновой фон можно детектировать, но были сбиты с толку терминологией в американских технических журналах. В обзорной статье 1964 года Я. Б. Зельдович сделал правильное вычисление космической распространенности гелия для двух возможных значений теперешней температуры излучения и правильно подчеркнул, эти величины связаны, так как число фотонов на ядерную частицу (или энтропия на ядерную частицу) не меняется со временем. Однако представляется, что он был введен в заблуждение использованием термина «температура неба» в статье Э. А. Ома 1961 года в Техническом журнале «Белл Систем», заключив, что температура излучения была измерена и оказалась меньше 1 К. (Использувавшаяся Омом антенна была тем самым 20-футовым рупорным отражателем, который в конце концов послужил Пензиасу и Вилсону для открытия микроволнового фона!) Это, наряду с довольно низкими оценками космической распространенности гелия, привело Зельдовича к отказу на основании наблюдений от идеи горячей ранней Вселенной.

Конечно, кроме того, что информация плохо передавалась от экспериментаторов к теоретикам, она столь же плохо передавалась и от теоретиков к экспериментаторам. Пен-

зиас и Вилсон никогда не слышали о предсказании Альфера–Хермана, намереваясь в 1964 году проверить свою антенну.

В-третьих, и мне думается, что самое главное, теория «большого взрыва» не привела к поиску трехградусного микроволнового фона потому, что физикам было чрезвычайно трудно серьезно воспринять *любую* теорию ранней Вселенной. (Я говорю так отчасти по воспоминаниям о моем собственном отношении к этому до 1965 года.) Каждая из упомянутых выше трудностей могла быть без особых усилий преодолена. Однако первые три минуты столь удалены от нас по времени, условия на температуру и плотность так незнакомы, что мы стесняемся применять наши обычные теории статистической механики и ядерной физики.

Такое часто случается в физике — наша ошибка не в том, что мы воспринимаем наши теории слишком серьезно, а в том, что мы не относимся к ним достаточно серьезно. Всегда очень трудно осознать, что те числа и уравнения, с которыми мы забавляемся за нашими столами, имеют какое-то отношение к реальному миру. Хуже того, часто кажется, что существует общее соглашение, будто некоторые явления еще не годятся для того, чтобы стать предметом солидных теоретических и экспериментальных исследований. Гамов, Альфер и Херман заслуживают колоссального уважения помимо всего прочего за то, что они серьезно захотели воспринять раннюю Вселенную и исследовали то, что должны сказать известные физические законы о первых трех минутах. Но даже они не сделали последнего шага, не убедили радиоастрономов, что те должны искать фон микроволнового излучения. Самое важное, что сопутствовало окончательному открытию в 1965 году трехградусного фона излучения, заключалось в том, что это открытие заставило всех нас всерьез отнестись к мысли, что ранняя Вселенная *была*.

Я подробно остановился на этой упущенной возможности потому, что эта история представляется мне одной из самых поучительных историй науки. Вполне понятно, что большая часть историографии науки посвящена ее успехам, ошеломляющим открытиям, блестящим выводам или великим волшебным скачкам, сделанным Ньютоном или Эйнштейном. Но я не думаю, что можно по-настоящему понять успехи науки, не

понимая того, как тяжело они даются — как легко быть сбитым с пути, как трудно узнать в любой момент времени, что нужно делать дальше*.

VII. ПЕРВАЯ СОТАЯ ДОЛЯ СЕКУНДЫ

Мы взяли за расчет первых трех минут в главе не с самого начала. Вместо этого мы начали с «первого кадра», когда космическая температура уже уменьшилась до 100 миллиардов градусов Кельвина и единственными частицами, имевшимися в большом количестве, были фотоны, электроны, нейтрино и соответствующие им античастицы. Если бы эти частицы были единственными типами частиц в природе, мы, вероятно, могли бы экстраполировать расширение Вселенной назад по времени и вычислить, что должно было существовать действительное начало, состояние бесконечных температуры и плотности, которое возникло на 0,0108 секунды раньше нашего первого кадра.

Однако современной физике известно много других типов частиц: мюоны, пи-мезоны, протоны, нейтроны и др. Когда мы смотрим назад на все более ранние моменты времени, мы сталкиваемся со столь высокими температурой и плотностью, что все эти частицы должны были присутствовать в большом количестве, находясь в состоянии теплового равновесия и непрерывного взаимодействия друг с другом. По причинам, которые я надеюсь разъяснить, мы до сих пор просто недостаточно знаем физику элементарных частиц, чтобы иметь возможность рассчитать с какой-то уверенностью свойства подобной смеси. Незнание микроскопической физики стоит как пелена, застилающая взор при взгляде на самое начало.

Конечно, заманчиво попытаться рассеять эту пелену. Искушение особенно велико для теоретиков вроде меня, чья работа значительно больше связана с физикой элементарных частиц, чем с астрофизикой. Множество интересных идей современной физики частиц имеют столь тонкие следствия, что

* Дополнительные данные по истории создания теории горячей Вселенной см. в дополнении редактора 9, с. 205. — *Прим. ред.*

их чрезвычайно трудно проверить сегодня в лабораториях, но эти следствия весьма драматичны, если подобные идеи применять к ранней Вселенной.

Первая проблема, с которой мы сталкиваемся, обращаясь к температурам выше 100 миллиардов градусов, связана с «сильными взаимодействиями» элементарных частиц. Сильные взаимодействия — это те силы, которые удерживают вместе нейтроны и протоны в атомном ядре. Эти силы не знакомы нам в повседневной жизни так, как знакомы электромагнитные или гравитационные силы, потому что радиус действия этих сил невероятно мал, около одной десятиллионной от миллионной доли сантиметра (10^{-13} см). Даже в молекулах, ядра которых обычно находятся на расстоянии нескольких сот миллионных долей сантиметра (10^{-8} см) друг от друга, сильные взаимодействия между различными ядрами по существу не дают никакого эффекта. Однако, как указывает их название, эти взаимодействия очень сильны. Когда два протона прижимаются друг к другу достаточно близко, сильное взаимодействие между ними становится примерно в 100 раз больше, чем электрическое отталкивание; именно поэтому сильные взаимодействия способны удержать от развала атомные ядра, преодолевая электрическое отталкивание почти 100 протонов. Причиной взрыва водородной бомбы является перераспределение нейтронов и протонов, в результате которого они более тесно связываются друг с другом сильными взаимодействиями; энергия бомбы есть как раз та избыточная энергия, которая высвобождается при этом перераспределении.

Именно интенсивность сильных взаимодействий делает их значительно более трудными для математического анализа, чем электромагнитные взаимодействия. Когда мы, например, рассчитываем вероятность рассеяния двух электронов за счет электрического отталкивания между ними, мы должны сложить бесконечное число вкладов, отвечающих определенной последовательности испускания и поглощения фотонов и электрон-позитронных пар. Эти вклады символически изображаются «фeyнмановскими диаграммами», вроде тех, которые показаны на рис. 10. (Метод расчета с использованием

[bb=0 0 93.9mm 58.9mm]v10.pcx

Рис. 10. НЕКОТОРЫЕ ФЕЙНМАНОВСКИЕ ДИАГРАММЫ.

Показаны некоторые из простейших фейнмановских диаграмм для процесса электрон-электронного рассеяния. Сплошные линии обозначают электроны или позитроны; волнистые линии обозначают фотоны. Каждой диаграмме отвечает определенная численная величина, зависящая от импульсов и спинов входящих и выходящих электронов; вероятность процесса рассеяния равна квадрату суммы этих величин, связанных со всеми фейнмановскими диаграммами. Вклад каждой диаграммы в эту сумму пропорционален числу множителей $1/137$ (постоянная тонкой структуры), равному числу фотонных линий. Диаграмма *a* представляет обмен одним фотоном и дает главный вклад, пропорциональный $1/137$. Диаграммы *b*, *c*, *d* и *e* представляют все типы диаграмм, приводящих к главным «радиационным» поправкам к диаграмме *a*; все они вносят вклад, пропорциональный $(1/137)^2$. Диаграмма *e* дает еще меньший вклад, пропорциональный $(1/137)^3$.

этих диаграмм был разработан в конце 40-х годов Ричардом Фейнманом, работавшим тогда в Корнелле. Строго говоря, вероятность процесса рассеяния дается *квадратом* суммы вкладов от каждой диаграммы.) Добавление к любой диаграмме одной лишней внутренней линии понижает вклад этой диаграммы на множитель, грубо говоря, равный фундаментальной постоянной, которая известна как «постоянная тонкой структуры». Эта константа довольно мала, приблизительно равна $1/137,036$. Поэтому сложные диаграммы дают малые вклады, и мы можем рассчитать вероятность процесса рассеяния с достаточным приближением, складывая вклады лишь от нескольких простых диаграмм. (Именно поэтому мы уверены в том, что можем предсказать атомные спектры с почти неограниченной точностью.) Однако для сильных взаимодействий та константа, которая играет роль постоянной тонкой структуры, примерно равна единице, а не $1/137$, и поэтому сложные диаграммы дают столь же большой вклад, как и простые. Эта проблема, заключающаяся в сложности расчета вероятностей процессов, включающих сильные взаимодействия, была единственной величайшей помехой прогрессу физики элементарных частиц в последнюю четверть века.

Не все процессы включают сильные взаимодействия. Эти взаимодействия затрагивают только класс частиц, известный

как «адроны»; сюда входят ядерные частицы и пи-мезоны, а также другие нестабильные частицы, известные как *K*-мезоны, эта-мезоны, лямбда-гипероны, сигма-гипероны и др. Вообще говоря, адроны тяжелее лептонов (название «лептон» произошло от греческого слова «легкий»), но действительно важное различие между ними в том, что адроны чувствуют влияние сильных взаимодействий, в то время как лептоны — нейтрино, электроны и мюоны — нет. Тот факт, что электроны не ощущают ядерных сил, невероятно важен — вместе с малой массой электрона это обстоятельство приводит к тому, что облако электронов в атоме или молекуле примерно в 100 000 раз больше, чем атомное ядро, а также к тому, что химические силы, удерживающие вместе атомы в молекулах, в миллионы раз слабее, чем силы, удерживающие протоны и нейтроны в ядрах. Если бы электроны в атомах и молекулах ощущали действие ядерных сил, то не существовало бы химии, кристаллографии или биологии — была бы одна ядерная физика.

Температура 100 миллиардов градусов Кельвина, с которой мы начали в главе V, была предусмотрительно выбрана ниже пороговой температуры для всех адронов. (Согласно табл. 1 на с. 150 легчайший адрон пи-мезон имеет пороговую температуру, равную примерно 1 600 миллиардов градусов Кельвина). Таким образом, в течение всей истории, рассказанной в главе V, единственными частицами, присутствовавшими в больших количествах, были лептоны и фотоны и взаимодействиями между ними можно было спокойно пренебречь.

Как же быть с более высокими температурами, когда в больших количествах имелись адроны и антиадроны? Есть два совершенно различных ответа, отражающих существование двух весьма различающихся научных школ в отношении природы адронов.

Согласно одной школе, на самом деле не существует такой вещи, как «элементарный» адрон. Каждый адрон столь же фундаментален, как и любой другой, — имеются в виду не только стабильные или почти стабильные адроны вроде протона или нейтрона и не только умеренно нестабильные частицы вроде пи-мезонов, *K*-мезона, эта-мезона и гиперонов, живу-

шие достаточно долго для того, чтобы оставить измеримые треки в фотопленках или в пузырьковых камерах, но даже полностью нестабильные «частицы» вроде ро-мезонов, живущие лишь столько времени, что со скоростью почти равной скорости света они едва успевают пересечь атомное ядро. Такую доктрину развивали в конце 50-х и начале 60-х годов, особенно Джеффри Чу из Беркли, и иногда ее называют «ядерной демократией».

При таком вольном определении адрона имеются буквально сотни адронов, чья пороговая температура меньше 100 тысяч миллиардов градусов Кельвина, и вполне возможно, что еще сотни будут открыты. В некоторых теориях число разновидностей частиц бесконечно, и оно будет расти все быстрее и быстрее, если мы будем исследовать все большие и большие массы. Может показаться безнадежной попытка осмыслить такой мир, но крайняя сложность спектра частиц может привести, в определенном смысле, к простоте. Например, ро-мезон — это адрон, который можно представлять себе как нестабильную частицу, состоящую из двух пи-мезонов; когда мы явно включаем ро-мезоны в наши вычисления, мы уже до некоторой степени принимаем во внимание сильное взаимодействие между пи-мезонами; возможно, что включив *все* адроны явно в наши термодинамические вычисления, мы сможем игнорировать *все* остальные эффекты сильных взаимодействий.

Далее, если действительно имеется неограниченное число разновидностей адронов, то, когда мы заключаем в данный объем все больше и больше энергии, она идет не на увеличение случайных скоростей частиц, а на увеличение числа типов частиц, находящихся в объеме. Тогда температура не растет так быстро с ростом плотности энергии, как она росла бы, если бы число разновидностей адронов было фиксировано. В действительности, в подобных теориях может существовать *максимальная* температура, т. е. то значение температуры, при котором плотность энергии становится бесконечной. Это такой же непреодолимый верхний предел температуры, как абсолютный нуль в качестве нижнего предела. Идея о максимальной температуре в физике адронов принад-

лежит Р. Хагедорну из лаборатории ЦЕРНа* в Женеве, а затем она развивалась другими теоретиками, включая Керзона Хуанга из МТИ и меня самого. Имеется даже довольно точная оценка того, какой может быть максимальная температура, — она оказывается неожиданно низкой, около двух тысяч миллиардов градусов Кельвина ($2 \cdot 10^{12}$ К). Когда мы подходим все ближе и ближе к началу, температура все больше и больше приближается к этому максимуму и разнообразие адронов становится все богаче и богаче. Однако даже при таких экзотических условиях все же есть начало, момент бесконечной плотности энергии, примерно на сотую долю секунды раньше первого кадра главы V.

Имеется другая научная школа, значительно более традиционная, более близкая к обычной интуиции, чем «ядерная демократия», и, на мой взгляд, более близкая к истине. Согласно этой школе не все частицы одинаковы; некоторые действительно элементарны, а все остальные состоят из простых комбинаций элементарных частиц. Считается, что в разряд элементарных частиц входят фотон и все известные лептоны, но не входит ни один из известных адронов. Вместо этого предполагается, что адроны состоят из более фундаментальных частиц, известных как «кварки».

Первоначальный вариант теории кварков принадлежит Мюррею Гелл-Манну и (независимо) Джорджу Цвейгу (оба из Калтеха**). Поэтическое воображение физиков-теоретиков действительно разыгралось вовсю в названии различных сортов кварков. Имеются кварки разных типов, или «ароматов», которые носят имена вроде «верхний», «нижний», «странный» и «очарованный»*. Более того, каждый «аромат» кварка бывает трех различных «цветов», которые теоретики США обычно называют красным, белым и голубым. Небольшая группа физиков-теоретиков в Пекине давно питает пристрастие к некое-

* ЦЕРН — Европейский Центр Ядерных Исследований (Женева). — *Прим. пер.*

** Калтех — Калифорнийский технологический институт, США. — *Прим. пер.*

* В настоящее время убедительно доказано существование пятого сорта кварков — «красивых», и по соображениям симметрии считается весьма вероятным существование шестого сорта. — *Прим. ред.*

му варианту кварковой теории, но они называют эти частицы «стратонами», а не кварками, так как эти частицы соответствуют более глубокому пласту физической реальности, чем обычные адроны.

Если идея кварков правильна, тогда физика очень ранней Вселенной может оказаться проще, чем думали. Можно сделать ряд выводов о силах, действующих между кварками, из их пространственного распределения внутри ядерной частицы, а это распределение можно, в свою очередь, определить (если кварковая модель верна) из наблюдений столкновений электронов с ядерными частицами при высоких энергиях. Таким способом несколько лет назад в совместной работе МТИ и Станфордского ускорительного центра было найдено, что сила между кварками оказывается исчезающе малой, когда кварки находятся очень близко друг к другу. Это наводит на мысль, что при некоторой температуре, около нескольких тысяч миллиардов градусов Кельвина, адроны просто разобьются на составляющие их кварки, так же как атомы разбиваются на электроны и ядра при нескольких тысячах градусов, а ядра разбиваются на протоны и нейтроны при нескольких тысячах миллионов градусов. Согласно такой картине в очень ранние времена Вселенную можно рассматривать как состоящую из фотонов, лептонов, антилептонов, кварков и антикварков, причем все они движутся как свободные частицы, и поэтому каждая разновидность частиц представляет собой просто еще один тип излучения черного тела. Тогда легко вычислить, что должно было быть начало, состояние бесконечной плотности и бесконечной температуры, примерно на сотую долю секунды раньше первого кадра.

Эти более или менее интуитивные идеи были недавно поставлены на значительно более солидную математическую основу. В 1973 году три молодых теоретика Хью Дэвид Политцер из Гарварда, Дэвид Гросс и Франк Вилчек из Принстона показали, что в специальном классе квантовых теорий поля силы между кварками действительно становятся слабее, если кварки прижимаются ближе друг к другу. (Такой класс теорий называется «неабелевы калибровочные теории» по причинам, слишком техническим для того, чтобы их здесь объяснять.)

Эти теории обладают примечательным свойством «асимптотической свободы»; асимптотически на малых расстояниях или при высоких энергиях кварки ведут себя как свободные частицы. Дж. К. Коллинз и М. Дж. Перри из университета в Кембридже показали даже, что в любой асимптотически свободной теории свойства среды при достаточно высоких температуре и плотности такие же, как если бы среда состояла только из свободных частиц. Таким образом, асимптотическая свобода подобных неабелевых калибровочных теорий дает солидное математическое подтверждение очень простой картине первой сотой доли секунды — тому, что Вселенная была сделана из свободных элементарных частиц.

Кварковая модель с большим успехом используется во множестве приложений. Протоны и нейтроны действительно ведут себя так, как если бы они состояли из трех кварков, ро-мезоны ведут себя так, как если бы они состояли из кварка и антикварка, и так далее. Но, несмотря на этот успех, кварковая модель преподносит нам большую загадку: проверено, что до сих пор невозможно разбить любой адрон на составляющие его кварки, даже с помощью самых высоких энергий, доступных на существующих ускорителях.

Эта же невозможность изолировать свободные кварки возникает и в космологии. Если адроны действительно разбились на свободные кварки в условиях, господствовавших в ранней Вселенной, тогда можно ожидать, что некоторое количество свободных кварков осталось до настоящего времени. Советский астрофизик Я. Б. Зельдович* оценил, что оставшиеся свободными кварки должны встречаться в теперешней Вселенной примерно так же часто, как атомы золота. Нет нужды говорить, что золото не слишком распространено, но унцию золота добыть значительно легче, чем унцию кварков.

Загадка несуществования изолированных свободных кварков есть одна из самых важных проблем, с которыми в настоящее время сталкивается теоретическая физика. Гросс, Вилчек и я предположили, что возможное объяснение этому дает

* Речь идет о работе Я. Б. Зельдовича, Л. Б. Окуня и С. Б. Пикельнера, опубликованной в журнале «Успехи физических наук» (1965, т. 87, вып. 1, с. 113). — *Прим. ред.*

«асимптотическая свобода». Если сила взаимодействия между двумя кварками уменьшается, когда они близко прижимаются друг к другу, то эта сила увеличивается, когда кварки отрываются друг от друга. Поэтому энергия, необходимая на то, чтобы оторвать один кварк от других в обычном адроне, увеличивается с ростом расстояния, и в конце концов оказывается достаточно большой, чтобы породить из вакуума новую кварк-антикварковую пару. В результате все кончается не несколькими свободными кварками, а несколькими обычными адронами. Это в точности напоминает попытку изолировать один конец струны: если мы очень сильно ее растянем, то струна разорвется, но конечным результатом будут два куска струны, каждый с двумя концами! Кварки в ранней Вселенной были достаточно близки друг к другу, так что они не чувствовали этих сил и могли вести себя как свободные частицы. Однако *каждый* свободный кварк, существовавший в очень ранней Вселенной, должен был в процессе расширения и охлаждения Вселенной либо аннигилировать с антикварком, либо найти свою могилу внутри протона или нейтрона.

Но достаточно о сильных взаимодействиях. У нас в запасе есть еще проблемы, когда мы поворачиваем стрелку часов к самому началу.

Одним из поистине поразительных следствий современных теорий элементарных частиц является то, что Вселенная могла испытать *фазовый переход*, похожий на замерзание воды при падении температуры ниже 273 К (0° С). Этот фазовый переход связан не с сильными взаимодействиями, а с другим классом короткодействующих взаимодействий — со слабыми взаимодействиями.

Слабые взаимодействия — это те, которые ответственны за определенные процессы радиоактивного распада вроде распада свободного нейтрона (см. с. 98) или вообще за любую реакцию, включающую нейтрино (см. с. 108). Как указывает их название, слабые взаимодействия значительно слабее электромагнитных или сильных взаимодействий. Например, при столкновении нейтрино с электроном при энергии один миллион электронвольт эта сила составляет примерно одну десятимиллионную (10^{-7}) часть электромагнитной силы между

двумя электронами, сталкивающимися при той же энергии.

Несмотря на слабость слабых взаимодействий, уже давно считается, что должна существовать глубокая связь между слабыми и электромагнитными силами. В 1967 году мною и независимо в 1968 году Абдусом Саламом была предложена теория поля, объединяющая эти две силы*. Эта теория предсказывает существование нового класса слабых взаимодействий, так называемых нейтральных токов, что было экспериментально подтверждено в 1973 году. Теория получила дальнейшую поддержку в результате открытия в 1974 году целого семейства новых адронов. Ключевая идея теории состоит в том, что природа имеет очень высокую степень симметрии, которая связывает различные частицы и силы друг с другом, но затемняется в обычных физических явлениях. Теории поля, используемые с 1973 года для описания сильных взаимодействий, принадлежат к тому же математическому типу (неабелевы калибровочные теории), и сейчас многие физики верят, что калибровочные теории могут обеспечить единую основу для понимания всех сил в природе: слабых, электромагнитных, сильных и, возможно, гравитационных. Эта точка зрения подтверждается свойством единых калибровочных теорий, о котором догадывались Салам и я, но которые впервые доказали в 1971 году Герард Тофт и Бенжамен Ли: вклады сложных фейнмановских диаграмм, хотя и кажутся бесконечными, дают конечные результаты для вероятностей всех физических процессов.

Как отметили в 1972 году Д. А. Киржниц и А. Д. Линде из Физического института им. Лебедева в Москве, важным моментом в калибровочных теориях, относящимся к изучению ранней Вселенной, является то, что в таких теориях возникает фазовый переход, нечто вроде замерзания, при «критической температуре» 3000 миллионов миллионов градусов ($3 \cdot 10^{15}$ К). При температуре ниже критической Вселенная была такая же, как сейчас: слабые взаимодействия были слабыми и короткодействующими. При температуре выше критической стало явным существенное единство слабых и электромагнитных вза-

* За создание этой теории С. Вайнберг (а также А. Салам и Ш. Глешоу) был удостоен в 1979 году Нобелевской премии по физике. — *Прим. ред.*

имодействий: слабые взаимодействия подчинялись тому же закону обратных квадратов, что и электромагнитные взаимодействия, и имели примерно ту же интенсивность.

Здесь полезна аналогия с замерзающей в стакане водой. Выше точки замерзания жидкая вода проявляет высокую степень однородности: вероятность обнаружить молекулу воды в одной точке внутри стакана такая же, как в любой другой точке. Однако, когда вода замерзает, эта симметрия между различными точками в пространстве частично теряется: лед образует кристаллическую решетку, причем молекулы воды занимают определенные, регулярно расположенные в пространстве положения, и вероятность обнаружения молекул воды где-нибудь в другом месте почти равна нулю. Подобным образом, когда Вселенная «замерзает», как только температура падает ниже 3000 миллионов миллионов градусов, теряется симметрия, но не пространственная однородность, как в нашем стакане со льдом, а симметрия между слабыми и электромагнитными взаимодействиями.

Оказывается, можно провести аналогию еще дальше. Как знает каждый, когда вода замерзает, она обычно образует не идеальный кристалл льда, а нечто значительно более сложное: огромную путаницу кристаллических областей, разделенных разными типами кристаллических нерегулярностей. Не образовались ли подобные области и при замерзании Вселенной? Живем ли мы в одной из таких областей, где симметрия между слабыми и электромагнитными взаимодействиями нарушилась определенным образом, и обнаружим ли мы когда-нибудь другие области*?

До сих пор наше воображение довело нас до температуры 3000 миллионов миллионов градусов, и мы имели дело с сильными, слабыми и электромагнитными взаимодействиями. Что можно сказать о другом известном в физике важном классе взаимодействий — о гравитационном взаимодействии? Гравитация, конечно, играет в нашей истории важную роль, так как она контролирует связь между плотностью Вселенной и скоростью ее расширения. Однако до сих пор не обнаружено, что тяготение имело какое-то влияние на *внутренние* свойст-

* По этому поводу см. дополнение редактора 10, с. 208. — *Прим. ред.*

ва любой части ранней Вселенной. Это объясняется чрезвычайной слабостью силы тяготения; к примеру, сила тяготения между электроном и протоном в атоме водорода слабее электрической силы на множитель 10 в 39-й степени.

(Одной из иллюстраций слабости гравитации является процесс образования частиц в гравитационных полях. Леонард Паркер из университета в Висконсине отметил, что «приливные» эффекты гравитационного поля Вселенной были достаточно велики в момент времени около одной миллионной миллионной миллионной доли секунды (10^{-24} с) после начала, чтобы породить из пустого пространства пары частица-античастица. Однако при тех температурах гравитация была все же так слаба, что число частиц, образованных таким способом, составило пренебрежимо малую добавку к частицам, уже находившимся в тепловом равновесии.)

Тем не менее мы можем, по крайней мере, вообразить момент времени, когда гравитационные силы были столь же велики, как и сильные ядерные взаимодействия, обсуждавшиеся выше. Гравитационные поля порождаются не только массой частиц, но и всеми формами энергии. Земля вращается вокруг Солнца несколько быстрее, чем она вращалась бы, если бы Солнце было не таким горячим, так как энергия солнечного тепла дает небольшой вклад в источник тяготения. При сверхвысоких температурах энергия частиц в тепловом равновесии может стать так велика, что силы тяготения между ними станут такими же большими, как и любые другие силы. Можно оценить, что такое положение будет достигнуто при температуре около 100 миллионов миллионов миллионов миллионов градусов (10^{32} K).

При этой температуре должны происходить всевозможные странные вещи. Не только гравитационные силы будут большими и образование частиц гравитационными полями обильным — сама идея «частицы» не будет еще иметь какого-то смысла. «Горизонт», т.е. то расстояние, из-за которого невозможно принять никакого сигнала (см. с. 51), будет в этот момент времени ближе, чем одна средняя длина волны частицы в тепловом равновесии. Вольно выражаясь, каждая частица будет почти такой же большой, как вся наблюдаемая

Вселенная!

Мы слишком мало знаем о квантовой природе гравитации даже для того, чтобы делать разумные предположения об истории Вселенной до этого времени. Можно сделать грубую оценку, что температура 10^{32} К была достигнута где-то через 10^{-43} секунды после начала, но, на самом деле, неясно, имеет ли эта оценка какой-то смысл. Таким образом, хотя мы, быть может, и приподняли другие завесы, остается все же одна завеса при температуре 10^{32} К, все еще заслоняющая от нашего взора более ранние времена.

Однако ни одна из этих неопределенностей не является существенной для астрономии в году от Рождества Христова тысяча девятьсот семьдесят шестом. Дело в том, что в течение всей первой секунды Вселенная, по-видимому, находилась в состоянии теплового равновесия, в котором количество и распределение всех частиц, даже нейтрино, определялись законами статистической механики, а не деталями их предыдущей истории. Когда мы сегодня измеряем распространенность гелия, или фон микроволнового излучения, или даже количество нейтрино, мы наблюдаем реликты состояния теплового равновесия, закончившегося в конце первой секунды. Насколько мы знаем, ничто из того, что мы можем наблюдать, не зависит от истории Вселенной до этого времени. (В частности, ничто из того, что мы сейчас наблюдаем, не зависит от того, была ли Вселенная изотропна и однородна до первой секунды, за исключением, возможно, самого отношения числа фотонов к числу ядерных частиц.) Это напоминает то, как если бы с большим старанием приготовили обед — свежайшие продукты, весьма заботливо выбранные специи, нежнейшие вина, — а затем все свалили в огромный котел, где это несколько часов кипело. Даже самому разборчивому едоку трудно было бы узнать, что ему подали.

Есть одно возможное исключение. Явление гравитации, как и явление электромагнетизма, может проявляться в форме волн, так же как и в более привычной форме статического действия на расстоянии. Два электрона в состоянии покоя отталкиваются друг от друга со статической электрической

силой, зависящей от расстояния между ними, но если мы начнем дергать один электрон туда-сюда, то другой не будет чувствовать никакого изменения действующей на него силы до тех пор, пока новости об изменении расстояния не донесутся до него на электромагнитной волне. Едва ли нужно говорить, что эти волны движутся со скоростью света — они и *есть* свет, хотя и не обязательно видимый. Таким же образом, если бы какой-то неблагоразумный великан стал дергать туда-сюда Солнце, мы на Земле не чувствовали бы никакого эффекта в течение восьми минут, т.е. того времени, которое требуется волне, чтобы пробежать со скоростью света от Солнца к Земле. Это *не* световая волна, т.е. не волна колеблющихся электрического и магнитного полей, а гравитационная волна, когда колебания происходят в гравитационных полях. Как и в случае электромагнитных волн, мы объединяем гравитационные волны всех длин термином «гравитационное излучение».

Гравитационное излучение взаимодействует с веществом значительно слабее электромагнитного излучения или даже нейтрино. (Поэтому, хотя мы достаточно уверены в теоретическом обосновании существования гравитационного излучения, по-видимому, провалились самые энергичные попытки детектировать гравитационные волны от любого источника*.) По этой причине гравитационное излучение вышло из теплового равновесия с другим содержимым Вселенной очень рано, когда температура была около 10^{32} К. С тех пор эффективная температура гравитационного излучения падала просто обратно пропорционально размеру Вселенной. Это в точности такой же закон уменьшения, какому подчиняется температура оставшейся части содержимого Вселенной, с той лишь разницей, что аннигиляция кварк-антикварковых и лептон-антилептонных пар нагревала все остальное содержимое Вселенной, кроме гравитационного излучения. Поэтому сегодня Вселенная должна быть заполнена гравитационным излучением при температуре, чуть меньше той, которую имеют нейтрино или фотоны, — возможно, около 1 К. Детектирование этого из-

* О попытках обнаружения гравитационных волн и о последних достижениях в этой области см. дополнение редактора 11, с. 210. — *Прим. ред.*

лучения явилось бы прямым наблюдением самого раннего момента истории Вселенной, который только может рассматривать сегодняшняя теоретическая физика. К сожалению, представляется, что в предвидимом будущем нет ни малейшего шанса детектировать одноградусный фон гравитационного излучения.

С помощью хорошей порции весьма спекулятивной теории мы смогли экстраполировать историю Вселенной назад по времени к моменту бесконечной плотности. Но это оставляет нас неудовлетворенными. Мы, естественно, хотим знать, что было перед этим моментом, прежде, чем Вселенная начала расширяться и охлаждаться.

Одна возможность заключается в том, что на самом деле никогда не было состояния бесконечной плотности. Теперешнее расширение Вселенной могло начаться в конце предыдущей эры сжатия, когда плотность Вселенной достигала какого-то очень большого, но конечного значения. Я хочу немного сказать об этой возможности в следующей главе.

Однако, хотя мы и не знаем, правильно ли это, по крайней мере, логически возможно, что начало *было* и что само время до этого момента не имеет смысла. Мы все привыкли к идее абсолютного нуля температуры. Невозможно охладить что-то ниже $-273,16^{\circ}\text{C}$, и не потому, что это чересчур сложно или никто не придумал достаточно умного холодильника, а потому, что температура ниже абсолютного нуля просто не имеет смысла — мы не можем иметь меньше тепла, чем полное отсутствие тепла. Подобным образом мы можем прийти к идее абсолютного нуля времени — момента в прошлом, раньше которого в принципе невозможно проследить любую цепь причин и следствий. Вопрос открыт и может остаться открытым всегда.

По моему мнению, наиболее удовлетворительным итогом этих гипотез об очень ранней Вселенной является возможная параллель между историей Вселенной и ее логической структурой. Сейчас природа демонстрирует великое многообразие типов частиц и типов взаимодействий. Несмотря на это, мы научились видеть то, что скрывается за этим многообразием, пытаемся представить различные частицы и взаимодей-

ствия как разные аспекты простой единой калибровочной теории поля. Нынешняя Вселенная так холодна, что симметрии между различными частицами и взаимодействиями заслонены чем-то вроде замерзания; они не проявляются в обычных явлениях, но должны выражаться математически в наших калибровочных теориях поля. То, что мы сейчас делаем с помощью математики, было сделано в очень ранней Вселенной с помощью тепла — физические явления непосредственно демонстрировали существенную простоту природы. Но там не было никого, кто бы это увидел.

VIII. ЭПИЛОГ: ПЕРСПЕКТИВЫ

Еще некоторое время Вселенная безусловно будет продолжать расширяться. Что же касается ее судьбы после этого, то стандартная модель дает двусмысленное предсказание: все зависит от того, меньше или больше космическая плотность определенного критического значения.

Как мы видели в главе II, если космическая плотность *меньше* критической плотности, то Вселенная имеет бесконечную протяженность и будет продолжать расширяться всегда. Наши потомки, если они у нас тогда будут, увидят, как медленно подходят к концу термоядерные реакции во всех звездах, оставляя после себя различные сорта шлака: черные карликовые звезды, нейтронные звезды, возможно, черные дыры. Планеты могут продолжать свое движение по орбитам, немного замедляясь за счет излучения гравитационных волн, но никогда не приходя в состояние покоя за любое конечное время. Температура космического фона излучения и нейтрино будет продолжать падать обратно пропорционально размеру Вселенной, но этот фон не исчезнет; даже сейчас мы едва можем детектировать трехградусный фон микроволнового излучения*.

В то же время, если космическая плотность больше критического значения, то Вселенная конечна и ее расширение

* О будущем Вселенной см. дополнение редактора 12, с. 210. — *Прим. ред.*

в конце концов прекратится, уступив место все ускоряющемуся сжатию. Если, например, космическая плотность вдвое больше критического значения и популярное в настоящее время значение постоянной Хаббла (15 км/с на миллион световых лет) правильно, то сейчас Вселенной 10 миллиардов лет; она будет продолжать расширяться еще 50 миллиардов лет, а затем начнет сжиматься (см. рис. 4, с. 49). Сжатие — это в точности расширение, но идущее назад по времени; через 50 миллиардов лет Вселенная вернется к теперешним размерам, а еще через 10 миллиардов лет она достигнет сингулярного состояния бесконечной плотности.

В течение, по крайней мере, начальной стадии фазы сжатия астрономы (если они тогда будут) смогут забавляться, наблюдая одновременно красные и голубые смещения. Свет от ближайших галактик, испущенный в то время, когда Вселенная была больше, чем в момент наблюдения света, будет казаться сдвинутым в сторону коротковолнового конца спектра, т. е. в голубую сторону. В то же время свет от чрезвычайно далеких объектов, испущенный в то время, когда Вселенная все еще находилась на ранних стадиях своего расширения и была даже меньше, чем в тот момент, когда свет наблюдается, будет казаться сдвинутым в сторону длинноволнового конца спектра, т. е. в красную сторону.

Пока Вселенная будет расширяться, а затем сжиматься, температура космического фона фотонов и нейтрино будет сначала падать, а затем расти, причем всегда обратно пропорционально размеру Вселенной. Если сейчас космическая плотность вдвое больше своего критического значения, тогда наши вычисления показывают, что Вселенная в момент максимального расширения будет точно вдвое больше, чем сейчас, так что температура микроволнового фона будет, следовательно, ровно вдвое меньше теперешнего значения 3 К, т. е. около 1,5 К. Затем, как только Вселенная начнет сжиматься, температура станет расти.

Поначалу не будет никаких тревожных сигналов — в течение тысяч миллионов лет фон излучения будет так холоден, что нужны будут большие усилия, чтобы вообще его обнаружить. Однако, когда Вселенная сократится до одной со-

той теперешнего размера, фон излучения начнет преобладать в небе: ночное небо станет таким же теплым (300 K), как наше теперешнее небо днем. Семьдесят миллионов лет спустя Вселенная сократится еще в десять раз, и наши наследники и преемники (если они будут) увидят небо невыносимо ярким. Молекулы в атмосферах планет и звезд и в межзвездном пространстве начнут диссоциировать на составляющие их атомы, а атомы начнут разбиваться на свободные электроны и атомные ядра. Еще после 700 000 лет космическая температура достигнет десяти миллионов градусов; тогда сами звезды и планеты начнут диссоциировать в космический суп из излучения, электронов и ядер. В последующие 22 дня температура поднимется до десяти миллиардов градусов. Тогда ядра начнут разбиваться на составляющие их протоны и нейтроны, уничтожая всю работу как звездного, так и космологического нуклеосинтеза. Вскоре после этого электроны и позитроны станут в больших количествах рождаться в фотон-фотонных столкновениях, а космический фон нейтрино и антинейтрино снова достигнет теплового союза с остальным содержимым Вселенной.

Можем ли мы действительно проследить всю эту печальную историю до самого конца, до состояния бесконечных температуры и плотности? Действительно ли время останавливается где-то через три минуты после того, как температура достигает миллиарда градусов? Очевидно, мы не можем быть в этом уверены. Все те неопределенности, с которыми мы столкнулись в предыдущей главе, пытаясь изучить первую сотую долю секунды, вернутся, чтобы смутить нас, когда мы посмотрим на последнюю сотую долю секунды. Кроме всего прочего, Вселенная в целом при температуре выше 100 миллионов миллионов миллионов миллионов миллионов градусов (10^{32} K) должна описываться на языке квантовой механики, и никто не имеет понятия, что при этом случится. Наконец, если Вселенная на самом деле неизотропна и неоднородна (см. конец главы V), то вся рассказанная нами история может оказаться неправильной задолго до того, как мы столкнемся с проблемами квантовой космологии.

Некоторые космологи видят в этих неопределенностях

луч надежды. Может быть так, что Вселенная испытает нечто вроде космического «скачка» и начнет вновь расширяться. В «Эдде» после заключительной битвы богов и великанов в Рагнораке Земля была уничтожена огнем и водой, но воды сошли, сыны Тора вышли из Ада, неся молот своего отца, и весь мир начался снова. Но если Вселенная начнет вновь расширяться, ее расширение будет опять замедляться до остановки, затем последует другое сжатие, которое закончится другим космическим Рагнораком, после чего последует новый скачок, и так всегда.

Таблица 1. Свойства некоторых элементарных частиц

Частица	Символ	Энергия покоя, 10^6 эВ	Пороговая температура, 10^9 К	Эффективное число разновидностей	Среднее время жизни, с
Фотон	γ	0	0	$1 \times 2 \times 1 = 2$	Стабилен
Лептоны					
Нейтрино	$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	0	$2 \times 1 \times 7/8 = 7/4$	Стабильно
	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	0	0	$2 \times 1 \times 7/8 = 7/4$	Стабилен
Электрон	e^-, e^+	0,511	5,930	$2 \times 2 \times 7/8 = 7/2$	Стабилен
Мюон	μ^-, μ^+	105,66	1226,2	$2 \times 2 \times 7/8 = 7/2$	$2,197 \cdot 10^{-6}$
Адроны					
Пи-мезоны	π^0, π^+, π^-	134,96 139,57	1566,2 1619,7	$1 \times 1 \times 1 = 1$ $2 \times 1 \times 1 = 2$	$0,8 \cdot 10^{-16}$ $2,60 \cdot 10^{-8}$
Протон	$p, \bar{p}$	938,26	10,888	$2 \times 2 \times 7/8 = 7/2$	Стабилен
Нейтрон	$n, \bar{n}$	939,55	10,903	$2 \times 2 \times 7/8 = 7/2$	920

ПРИМЕЧАНИЕ. *Энергия покоя* — это та энергия, которая высвободилась бы, если бы вся масса частицы превратилась в энергию. *Пороговая температура* равна энергии покоя, деленной на постоянную Больцмана; это та температура, выше которой частица может свободно рождаться из теплового излучения. «Эффективное число разновидностей» дает относительный вклад каждого типа частиц в полные энергии, давление и энтропию при температуре много выше пороговой. Это число написано как произведение трех множителей: первый множитель равен 2 или 1, соответственно тому, имеет ли данная частица отличную от себя античастицу или нет; второй множитель есть число возможных ориентации спина частицы; последний множитель равен 7/8 или 1, соответственно тому, подчиняется частица принципу исключения Паули или нет. *Среднее время жизни* есть средний интервал времени, который живет частица прежде, чем она испытает радиоактивный распад на другие частицы.

Если таково наше будущее, то, вероятно, таково же и на-

ше прошлое. И теперешняя расширяющаяся Вселенная представляет собой только фазу, следующую за последним сжатием и скачком. (Действительно, в своей работе 1965 года о фоне космического микроволнового излучения Дикке, Пиблз, Ролл и Уилкинсон предполагали, что существовала предыдущая полная фаза космического расширения и сжатия, и показали, что Вселенная должна была достаточно сжаться, чтобы поднять температуру, по меньшей мере, до десяти миллиардов градусов для того, чтобы разбить тяжелые элементы, образованные в предыдущей фазе.) Глядя все дальше и дальше назад, мы можем представить себе бесконечный цикл расширений и сжатий, простирающийся в бесконечно далекое прошлое и никогда не имеющий начала.

Осциллирующая модель привлекает некоторых космологов с философской точки зрения, особенно потому, что она, как и стационарная модель, деликатно избегает проблемы Генезиса. Однако эта модель сталкивается с серьезной теоретической трудностью. В каждом цикле, когда Вселенная расширяется и сжимается, отношение числа фотонов к числу ядерных частиц (или, более точно, энтропия на ядерную частицу) несколько увеличивается благодаря определенного типа трению (известному как «объемная вязкость»). Насколько мы знаем, Вселенная должна тогда начинать каждый новый цикл с новым, слегка бóльшим отношением фотонов к ядерным частицам. Сейчас это отношение велико, но не бесконечно, так что трудно увидеть, каким образом могла Вселенная испытать перед этим бесконечное число циклов.

Как бы ни разрешились все эти проблемы, и какая бы космологическая модель ни оказалась правильной, ни в одной из них мы не находим утешения. Для человеческих существ почти неизбежна вера в то, что мы имеем какое-то особое отношение к Вселенной, и что человеческая жизнь есть не просто более или менее нелепое завершение цепочки случайностей, ведущей начало от первых трех минут, а что наше существование было каким-то образом предопределено с самого начала. Случилось так, что, когда я писал это, я находился в самолете по дороге домой из Сан-Франциско в Бостон и летел на высоте 30 000 футов над Вайомингом. Земля подо мной выглядела

Таблица 2. Свойства некоторых типов излучения

Излучение	Длина волны, см	Энергия фотонов, эВ	Температура черного тела, К
Радио (до УВЧ)	> 10	$< 0,00001$	$< 0,03$
Микроволновое	$0,01-10$	$0,00001-0,01$	$0,03-30$
Инфракрасное	$0,0001-0,01$	$0,01-1$	$30-3000$
Видимое	$1 \cdot 10^{-5}-10^{-4}$	$1-6$	$3000-15\,000$
Ультрафиолетовое	$10^{-7}-2 \cdot 10^{-5}$	$6-1000$	$15\,000-3 \cdot 10^6$
Рентгеновское	$10^{-9}-10^{-7}$	$1000-100\,000$	$3 \cdot 10^6-3 \cdot 10^8$
Гамма-излучение	$< 10^{-9}$	$> 100\,000$	$> 3 \cdot 10^8$

ПРИМЕЧАНИЕ. Каждый тип излучения характеризуется определенным интервалом длин волн, которые даны здесь в сантиметрах. Этому интервалу длин волн соответствует интервал энергий фотонов, которые даны здесь в электронвольтах. *Температура черного тела* есть та температура, при которой излучение черного тела будет иметь максимум по энергии, сконцентрированной вблизи данной длины волны; эта температура дана здесь в градусах Кельвина. (Например, длина волны, на которую настроились Пензиас и Вилсон в своих наблюдениях космического фона излучения, равнялась 7,35 см, так что это — микроволновое излучение; энергия фотонов, испускаемых при радиоактивных превращениях ядер, обычно порядка миллиона электронвольт, так что это — гамма-излучение; поверхность Солнца имеет температуру 5800 К, так что Солнце испускает видимый свет.) Конечно, нет резких границ между отдельными типами излучения и не существует единого соглашения по поводу различных интервалов длин волн.

очень нежной и уютной — легкие облачка здесь и там, снег, ставший ярко-розовым, когда садилось Солнце, дороги, лентами протянувшиеся по всей стране от одного города к другому. Очень трудно осознать, что все это — лишь крошечная часть ошеломляюще враждебной Вселенной. Еще труднее представить, что эта сегодняшняя Вселенная развилась из невыразимо незнакомых начальных условий, и что ей предстоит будущее угасание в бескрайнем холоде или невыносимой жаре. Чем более постижимой представляется Вселенная, тем более она кажется бессмысленной.

Но если и нет утешения в плодах нашего исследования,

есть, по крайней мере, какое-то утешение в самом исследовании. Мужчины и женщины не склонны убаюкивать себя сказками о богах и великанах или замыкаться мыслями в повседневных делах; они строят телескопы, спутники и ускорители и нескончаемые часы сидят за своими столами, осмысливая собранные данные. Попытка понять Вселенную — одна из очень немногих вещей, которые чуть приподнимают человеческую жизнь над уровнем фарса и придают ей черты высокой трагедии.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Абсолютная светимость. Полная энергия, излучаемая любым астрономическим телом за единицу времени.

Адрон. Любая частица, принимающая участие в сильных взаимодействиях. Адроны делятся на барионы (такие, как нейтрон и протон), которые подчиняются принципу исключения Паули, и мезоны, которые не подчиняются этому принципу.

Ангстрем (единица длины). Одна стомиллионная доля сантиметра (10^{-8} см). Обозначается Å. Типичные атомные размеры составляют несколько ангстрем, типичные длины волн видимого света — несколько тысяч ангстрем.

Античастица. Частица с теми же массой и спином, как и другая частица, но с равными по величине и противоположными по знаку электрическим зарядом, барионным числом, лептонным числом и т. п. Для каждой частицы имеется соответствующая античастица, за исключением нескольких чисто нейтральных частиц вроде фотона и π^0 -мезона, которые сами являются своими античастицами. Антинейтрино есть античастица для нейтрино; антипротон есть античастица для протона и т. д. Антивещество состоит из антипротонов, антинейтронов и антиэлектронов, или позитронов.

Асимптотическая свобода. Свойство ряда полевых теорий сильных взаимодействий, заключающееся в том, что силы становятся все более слабыми на малых расстояниях.

Барионы. Класс сильновзаимодействующих частиц, включающий нейтроны, протоны и нестабильные адроны, известные как гипероны. *Барионное число* есть полное число, имеющихся в системе, барионов минус полное число антибарионов.

Водород. Легчайший и самый распространенный химический элемент. Ядро обычного водорода состоит из одного протона. Существуют также два более тяжелых изотопа — дейтерий и тритий. Атомы любого типа водорода состоят из ядра и одного электрона; в положительно заряженных *ионах водорода* электрон отсутствует.

Видимая светимость. Полная энергия, принимаемая от любого астрономического тела за единицу времени на единицу площади поверхности.

Галактика. Большое связанное силами тяготения скопление звезд, содержащее до 10^{12} солнечных масс. Нашу галактику иногда называют Галактикой. Обычно галактики классифицируют в соответствии с формой и делят на эллиптические, спиральные, спиральные с перемычкой и иррегулярные.

Гелий. Второй (в таблице Менделеева) легчайший и второй по распространенности химический элемент. Существуют два стабильных изотопа гелия, ядро ${}^4\text{He}$ содержит два протона и два нейтрона, а ядро ${}^3\text{He}$ содержит два протона и один нейтрон. Атомы гелия имеют вокруг ядра два электрона.

Гидроксила ион. Ион OH^- , образованный из атома кислорода, атома водорода и одного лишнего электрона.

Голубое смещение. Смещение спектральных линий в сторону более коротких длин волн, вызванное эффектом Доплера для приближающегося источника.

Горизонт. В космологии — это такое расстояние, что никакой световой сигнал, испущенный с большего расстояния, не мог еще успеть достичь нас. Если Вселенная имеет конечный возраст, тогда расстояние до горизонта порядка возраста, умноженного на скорость света.

Гравитационные волны. Волны гравитационного поля, аналогичные световым волнам в электромагнитном поле.

Гравитационные волны распространяются с той же скоростью 299 792 км/с, что и световые волны. Нет общепризнанного экспериментального свидетельства существования гравитационных волн, но их существование требуется общей теорией относительности и не вызывает серьезных сомнений. Квант гравитационного излучения, аналогичный фотону, называется *гравитоном*.

Девы скопление. Гигантское скопление более 1000 галактик в созвездии Девы. Это скопление удаляется от нас со скоростью около 1000 км/с и, как считается, находится на расстоянии в 60 миллионов световых лет.

Дейтерий. Тяжелый изотоп водорода ^2H . Ядро дейтерия, называемое *дейтоном*, состоит из одного протона и одного нейтрона.

Джинса масса. Минимальная масса, для которой гравитационное притяжение может преодолеть внутреннее давление и образовать гравитационно-связанную систему. Обозначается M_D .

Диаграммы Фейнмана. Диаграммы, символически изображающие различные вклады в вероятности реакций между элементарными частицами.

Длина волны. Для любого типа волн расстояние между волновыми гребнями. Для электромагнитных волн длина волны может быть определена как расстояние между точками, в которых любая компонента вектора электрического или магнитного поля достигает максимального значения. Обозначается λ .

Доплера эффект. Изменение частоты любого сигнала, вызванное относительным движением источника и приемника.

Закон Рэлея–Джинса. Простое соотношение между плотностью энергии (в единичном интервале длин волн)

и длиной волны, справедливое в длинноволновом пределе планковского распределения. В этом пределе плотность энергии обратно пропорциональна четвертой степени длины волны*.

Закон сохранения. Закон, утверждающий, что полное значение какой-то величины не меняется в любой реакции.

Закон Стефана–Больцмана. Пропорциональность плотности энергии излучения черного тела четвертой степени температуры.

Закон Хаббла. Соотношение пропорциональности между скоростью удаления умеренно далеких галактик и расстоянием до них. *Постоянная Хаббла* есть отношение скорости к расстоянию в этом соотношении; она обозначается H или H_0 .

Излучение черного тела. Излучение с той же плотностью энергии в каждом интервале длин волн, как и у излучения, испускаемого полностью поглощающим нагретым телом. Излучение в любом состоянии теплового равновесия является излучением черного тела.

Изотропия. Предполагаемое свойство Вселенной, заключающееся в том, что для типичного наблюдателя она выглядит одинаково во всех направлениях.

Инфракрасное излучение. Электромагнитные волны с длинами волн между 0,0001 и 0,01 см (от десяти тысяч до одного миллиона ангстрем), промежуточные между видимым светом и микроволновым излучением. Тела при комнатной температуре излучают главным образом в инфракрасном диапазоне.

Калибровочные теории. Класс теории поля, интенсивно изучаемых в настоящее время в качестве возможных

* Автор имеет в виду плотность энергии на единицу длины волны. Обычно радиоастрономы относят плотность энергии к интервалу частот $d\nu$, и тогда плотность пропорциональна λ^{-2} . — *Прим. ред.*

теорий слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий. Такие теории инвариантны относительно преобразований симметрии, действие которых меняется от точки к точке в пространстве — времени. Термин «калибровочная» происходит от обычного английского слова, означающего «мера», но используется главным образом по историческим причинам.

Квазизвездные объекты. Класс астрономических объектов, имеющих вид звезд и очень малые угловые размеры, но обладающих большим красным смещением. Иногда, если они являются сильными радиоисточниками, называются *квазизвездными источниками* (квазарами). Их истинная природа неизвестна.

Квантовая механика. Фундаментальная физическая теория, развитая в 20-е годы как замена классической механики. В квантовой механике волны и частицы представляют собой два аспекта одной и той же сущности, лежащей в их основе. Частица, связанная данной волной, есть *квант* этой волны. Кроме того, состояния связанных систем, вроде атомов или молекул, занимают лишь некоторые определенные уровни энергии; тогда говорят, что энергия *квантована*.

Кварки. Гипотетические фундаментальные частицы, из которых, по предположению, состоят все адроны. Изолированные кварки никогда не наблюдались, и имеются теоретические основания подозревать, что кварки, хотя они в определенном смысле реальны, никогда *не могут* наблюдаться как изолированные частицы.

Кельвин. Температурная шкала, аналогичная шкале Цельсия, но с нулем температуры, выбранным в точке абсолютного нуля, а не в точке таяния льда. Точка таяния льда при давлении одна атмосфера равна 273,15 К.

Космическое излучение. Заряженные частицы больших энергий, проникающие в атмосферу Земли из окружающего пространства.

Космологическая постоянная. Член, добавленный в 1917 году Эйнштейном в его уравнения гравитационного поля. Такой член приводил бы к отталкиванию на очень больших расстояниях и был бы необходим в статической Вселенной для уравнивания притяжения, обусловленного тяготением. В настоящее время нет причин предполагать существование космологической постоянной.

Космологический принцип. Гипотеза, согласно которой Вселенная изотропна и однородна.

Космология «большого взрыва». Теория, согласно которой расширение Вселенной началось конечное время тому назад из состояния колоссальных плотности и давления.

Красное смещение. Смещение спектральных линий в сторону больших длин волн, вызванное эффектом Доплера для удаляющегося источника. В космологии относится к наблюдаемому смещению спектральных линий удаленных астрономических тел в сторону больших длин волн. Красное смещение, выраженное через отношение увеличения длины волны к испущенной длине волны, обозначается z .

Критическая плотность. Минимальное значение космической плотности массы в настоящее время, требуемое для того, чтобы расширение Вселенной в конце концов прекратилось и сменилось сжатием. Если космическая плотность превышает критическую плотность, то Вселенная пространственно конечна.

Критическая температура. Температура, при которой возникает фазовый переход.

Лептоны. Класс частиц, не принимающих участия в сильных взаимодействиях и включающий электрон, мюон и нейтрино. *Лептонное число* есть полное число имеющихся в системе лептонов минус полное число антилептонов.

Максимальная температура. Верхний предел температуры, возникающий в некоторых теориях сильных взаимодействий. Оценен в этих теориях в две тысячи миллиардов градусов Кельвина.

Мезоны. Класс сильновзаимодействующих частиц, включающий пи-мезоны, K -мезоны, ро-мезоны и другие частицы, имеющие нулевое барионное число.

Микроволновое излучение. Электромагнитные волны с длинами от 0,01 до 10 см, промежуточные между радиоволнами сверхвысоких частот и инфракрасным излучением. Тела с температурой несколько градусов Кельвина излучают главным образом в микроволновом диапазоне.

Млечный Путь. Древнее название полосы звезд, отмечающих плоскость нашей Галактики. Иногда употребляется как название самой нашей Галактики.

Модель Фридмана. Математическая модель пространственно-временной структуры Вселенной, основанная на общей теории относительности (без космологической постоянной) и Космологическом Принципе.

Мюон. Нестабильная элементарная частица с отрицательным зарядом, похожая на электрон, но в 207 раз более тяжелая. Обозначается μ^- . Иногда называется мю-мезон, но не взаимодействует сильно, как настоящие мезоны.

Нейтрино. Безмассовая электрически нейтральная частица, способная только к слабым и гравитационным взаимодействиям. Обозначается ν . Существуют, по крайней мере, две разновидности нейтрино, известные как электронное (ν_e) и мюонное (ν_μ).

Нейтрон. Нейтральная частица, найденная наряду с протонами в обычных атомных ядрах. Обозначается n .

Номера по Мессье. Каталогные номера различных туманностей и звездных скоплений в списке Шарля Мессье. Обычно указывается сокращенно как М . . . ; так, туманность Андромеды есть М 31.

Общая теория относительности. Теория тяготения, развитая Альбертом Эйнштейном в течение десятилетия с 1906 по 1916 год. Как сформулировал Эйнштейн, основная идея общей теории относительности заключается в том, что тяготение есть эффект искривления пространственно-временного континуума.

Однородность. Предполагаемое свойство Вселенной, заключающееся в том, что в любой данный момент времени она выглядит одинаково для всех типичных наблюдателей, где бы они ни находились.

Параметр замедления. Число, характеризующее скорость, с которой замедляется разбегание далеких галактик.

Парсек. Астрономическая единица расстояния. Определяется как расстояние до объекта, *параллакс* которого (годовое смещение на небе, обязанное движению Земли вокруг Солнца) равен одной дуговой секунде. Сокращенно пк. Равен $3,0956 \cdot 10^{13}$ километров, или 3,2615 светового года. Обычная для космологии единица — один миллион парсеков, или *мегапарсек*, сокращенно Мпк. Постоянная Хаббла обычно дается в километрах в секунду на мегапарсек.

Пи-мезон. Адрон с наименьшей массой. Существует в трех разновидностях: положительно заряженная частица (π^+), ее отрицательно заряженная античастица (π^-) и несколько более легкая нейтральная частица (π^0). Все эти частицы иногда называют пионами.

Плотность. Количество любой величины, содержащееся в единичном объеме. *Плотность массы* есть масса в единице объема; часто эта величина называется просто плотностью. *Плотность энергии* есть энергия в единице объема; *плотность числа частиц*, или *плотность частиц*, есть число частиц в единице объема.

Позитрон. Положительно заряженная античастица электрона. Обозначается e^+ .

Постоянная Больцмана. Фундаментальная постоянная статистической механики, связывающая температурную шкалу с единицами энергии. Обычно обозначается как k или k_B . Равна $1,3806 \cdot 10^{-16}$ эрг на градус Кельвина или 0,00008617 электронвольт на 1 К.

Постоянная Планка. Фундаментальная постоянная квантовой механики. Обозначается h . Равна $6,625 \cdot 10^{-27}$ эрг·с. Постоянная Планка была впервые введена в 1900 году в планковской теории излучения черного тела. Затем она появилась в 1905 году в эйнштейновской теории фотонов: энергия фотона равна постоянной Планка, умноженной на скорость света и деленной на длину волны. В наши дни более принято использовать постоянную $\hbar$, определяемую как постоянная Планка, деленная на 2π .

Постоянная Ньютона. Фундаментальная постоянная ньютоновой и эйнштейновской теорий тяготения. Обозначается G . В ньютоновой теории тяготения сила, действующая между двумя телами, равна G , умноженной на произведение масс тел и деленной на квадрат расстояния между ними. В метрических единицах равна $6,67 \cdot 10^{-8}$ см³/(г·с²).

Постоянная тонкой структуры. Фундаментальная постоянная атомной физики и квантовой электродинамики, определяемая как квадрат заряда электрона, деленный на произведение постоянной Планка и скорости света. Обозначается α , равна $1/137,036$.

Пороговая температура. Температура, выше которой данный тип частиц может в изобилии рождаться излучением черного тела. Равна массе частицы, умноженной на квадрат скорости света и деленной на постоянную Больцмана.

Принцип исключения Паули. Принцип, согласно которому никакие две частицы одного типа не могут занимать в точности одно и то же квантовое состояние. Этому принципу подчиняются барионы и лептоны, но не фотоны и мезоны.

Протон. Положительно заряженная частица, обнаруженная наряду с нейтронами в обычных атомных ядрах. Обозначается *p*. Ядро водорода состоит из одного протона.

Распределение Планка. Распределение энергии по различным длинам волн для излучения в тепловом равновесии, т. е. для излучения черного тела.

Рекомбинация. Соединение атомных ядер и электронов в обычные атомы. В космологии термин «рекомбинация» часто используется специально для обозначения образования атомов гелия и водорода при температуре около 3000 К.

Ро-мезон. Один из многих чрезвычайно нестабильных адронов. Распадается на два пи-мезона со средним временем жизни $4,4 \cdot 10^{-24}$ с.

Сверхновые. Грандиозные звездные взрывы, в которых все вещество звезды, кроме внутреннего ядра, выбрасывается в межзвездное пространство. Сверхновая за несколько дней рождает столько же энергии, сколько Солнце излучает за несколько миллионов лет. Последнюю сверхновую, наблюдавшуюся в нашей Галактике, видел в 1604 году Кеплер (а также корейские и китайские придворные астрономы) в созвездии Змееносца, но считается, что радиисточник Кассиопея А связан с более поздней сверхновой.

Световой год. Расстояние, которое свет проходит за год, и равное 9,4605 тысячи миллиардов километров.

Сильные взаимодействия. Наиболее сильное из четырех общих типов взаимодействия элементарных частиц. Ответственно за ядерные силы, удерживающие протоны и нейтроны в атомных ядрах. Сильным взаимодействиям подвержены только адроны, но не фотоны и лептоны.

Слабые взаимодействия. Один из четырех общих типов взаимодействий элементарных частиц. При обычных энергиях слабые взаимодействия значительно слабее

электромагнитных или сильных взаимодействий, хотя и много сильнее гравитационного взаимодействия. Слабые взаимодействия ответственны за относительно медленные распады частиц вроде распадов нейтрона и мюона, а также за все реакции с участием нейтрино. В настоящее время широко распространено мнение, что слабые, электромагнитные и, возможно, сильные взаимодействия суть проявления лежащей в их основе простой единой калибровочной теории поля.

Скорость света. Фундаментальная постоянная специальной теории относительности, равная 299 792 км/с. Обозначается c . Любая частица нулевой массы, такая, как фотон, нейтрино или гравитон, распространяется со скоростью света. Скорости материальных частиц приближаются к скорости света, когда их энергии становятся очень большими по сравнению с энергией покоя mc^2 , заключенной в их массе.

Собственное движение. Смещение положения астрономических тел на небе, вызванное их движением под углами к лучу зрения. Обычно измеряется в дуговых секундах за год.

Специальная теория относительности. Новый взгляд на пространство и время, предложенный в 1905 году Альбертом Эйнштейном. Как и в ньютоновой механике, имеется совокупность математических преобразований, связывающих пространственно-временные координаты, используемые различными наблюдателями, таким образом, что законы природы оказываются для этих наблюдателей одинаковыми. Однако в специальной теории относительности пространственно-временные преобразования имеют то существенное свойство, что они оставляют скорость света неизменной независимо от скорости наблюдателя. Говорят, что любая система, содержащая частицы со скоростями, близкими к скорости света, является релятивистской, и такая система должна изучаться в соответствии с законами специальной теории относительности, а не ньютоновой механики.

Спин. Фундаментальное свойство элементарных частиц, описывающее состояние вращения частицы. Согласно законам квантовой механики спин может принимать только некоторые определенные значения, равные целому или полуцелому числу, умноженному на постоянную Планка.

Средний свободный пробег. Среднее расстояние, проходимое данной частицей между столкновениями со средой, в которой она движется. *Среднее свободное время* есть среднее время между столкновениями.

Теория стационарного состояния. Космологическая теория, развивавшаяся Бонди, Голдом и Хойлом, в которой средние свойства Вселенной никогда не меняются со временем; согласно этой теории, чтобы плотность удерживалась постоянной в процессе расширения Вселенной, должна непрерывно порождаться новая материя.

Тепловое равновесие. Такое состояние, когда скорости, с которыми частицы попадают в любой заданный интервал скоростей, спинов и т. п., в точности уравниваются скоростями, с которыми они покидают этот интервал. Любая физическая система, не возмущаемая достаточно долгое время, достигает в конце концов состояния теплового равновесия.

Типичные галактики. Это понятие используется в данной книге для обозначения галактик, не имеющих никаких необычных скоростей и поэтому движущихся только вместе с общим движением вещества, порожденным расширением Вселенной. Тот же смысл придается терминам *типичная частица* и *типичный наблюдатель*.

Третий. Нестабильный тяжелый изотоп водорода ^3H . Ядро трития состоит из протона и двух нейтронов.

Туманности. Удаленные астрономические объекты, имеющие вид облаков. Некоторые туманности являются галактиками, другие на самом деле представляют собой облака пыли и газа внутри нашей Галактики.

Туманность Андромеды. Большая галактика, ближайшая к нашей. Спиральная, с массой, приблизительно равной $3 \cdot 10^{11}$ солнечных масс. В каталоге Мессье имеет номер М 31, в «Новом общем каталоге» — номер NGC 224.

Ультрафиолетовое излучение. Электромагнитные волны с длинами в интервале от 10 до 2000 ангстрем (от 10^{-7} до $2 \cdot 10^{-5}$ см), промежуточные между видимым светом и рентгеновским излучением.

Фазовый переход. Резкий переход системы из одной конфигурации в другую обычно с изменением симметрии. Примерами могут служить плавление, кипение и переход от обычной проводимости к сверхпроводимости.

Фотон. В квантовой теории излучения частица, связанная со световой волной. Обозначается γ .

Характерное время расширения. Величина, обратная постоянной Хаббла. Грубо, в 100 раз больше того времени, за которое Вселенная расширится на 1 процент.

Цефеиды. Яркие переменные звезды с хорошо установленным соотношением между абсолютной светимостью, периодом изменения и цветом. Названы по звезде δ Цефея в созвездии Цефея. Используются как индикаторы расстояния до относительно близких галактик.

Циан. Химическое соединение CN, образованное из углерода и азота. Найдено в межзвездном пространстве по поглощению видимого света.

Частота. Быстрота, с которой состояние волны любого сорта изменяется в данной точке. Равна скорости волны, деленной на длину волны. Измеряется в циклах в секунду или в герцах.

Электрон. Легчайшая из массивных элементарных частиц. Все химические свойства атомов и молекул определяются электрическим взаимодействием электронов друг с другом и с атомными ядрами.

Электронвольт. Принятая в атомной физике единица энергии, равная энергии, приобретаемой электроном при прохождении разности потенциалов в один вольт. Равен $1,60219 \cdot 10^{-12}$ эрг.

Энергия покоя. Энергия частицы в состоянии покоя, которая выделилась бы, если бы вся масса частицы смогла аннигилировать. Дается формулой Эйнштейна $E = mc^2$.

Энтропия. Фундаментальная величина статистической механики, связанная со степенью беспорядка в физической системе. Энтропия сохраняется в любом процессе, в котором непрерывно поддерживается тепловое равновесие. Второе начало термодинамики утверждает, что полная энтропия в *любой* реакции никогда не уменьшается.

Эрг. Единица энергии в системе единиц сантиметр-грамм-секунда (СГС). Кинетическая энергия массы один грамм, движущейся со скоростью один сантиметр в секунду, равна половине эрга.

Ядерная демократия. Доктрина, согласно которой все адроны в равной степени фундаментальны.

Ядерные частицы. Частицы, протоны и нейтроны, обнаруженные в ядрах обычных атомов. Обычно сокращенно называются нуклонами.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ДОПОЛНЕНИЕ

Эти замечания предназначены для тех читателей, которые хотят познакомиться с кое-какой математикой, на которой базируется нематематическое изложение в основной части этой книги. Для того чтобы уследить за ходом обсуждений в большей части книги, совершенно не обязательно изучать эти замечания.

ДОПОЛНЕНИЕ 1. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Предположим, что гребни волн покидают световой источник в регулярные моменты времени, разделенные периодом T . Если источник движется от наблюдателя со скоростью v , тогда за время между испусканием двух последовательных гребней источник проходит расстояние vT . Это увеличивает время, необходимое на то, чтобы гребень волны дошел от источника до наблюдателя, на величину vT/c , где c — скорость света. Отсюда время, прошедшее между появлением двух последовательных волновых гребней в точке наблюдения, равно

$$T' = T + vT/c;$$

длина волны света после испускания*

$$\lambda = cT;$$

длина волны света в момент приема

$$\lambda' = cT'.$$

Поэтому отношение этих длин волн

$$\lambda'/\lambda = T'/T = 1 + v/c.$$

*С точки зрения наблюдателя, движущегося с источником. — *Прим. ред.*

Эти же аргументы применимы и тогда, когда источник приближается к наблюдателю, с той разницей, что v заменяется на $-v$. (Подобные рассуждения применимы не только к световым волнам, но и к любому типу волнового сигнала.)

Например, галактики в скоплении Девы движутся от нашей Галактики со скоростью примерно 1000 км/с. Скорость света равна 300 000 км/с. Поэтому длина волны любой спектральной линии от скопления в Деве больше своего нормального значения λ в отношении

$$\lambda'/\lambda = 1 + 1000 \text{ км/с} : 300\,000 \text{ км/с} = 1,0033.$$

ДОПОЛНЕНИЕ 2. КРИТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ

Рассмотрим сферу радиуса R , внутри которой содержатся галактики. (Для целей данного вычисления мы должны выбрать R больше, чем расстояние между скоплениями галактик, но меньше любого расстояния, характеризующего Вселенную в целом.) Масса такой сферы равна ее объему, умноженному на космическую плотность массы ρ :

$$M = \frac{4\pi R^3 \rho}{3}.$$

Из ньютоновой теории тяготения следует, что потенциальная энергия любой типичной галактики на поверхности этой сферы

$$\text{П. Э.} = -\frac{mMG}{R} = -\frac{4\pi mR^2 \rho G}{3},$$

где m — масса галактики; G — ньютонова постоянная тяготения, $G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$. Скорость этой галактики определяется законом Хаббла в виде

$$v = HR,$$

где H — постоянная Хаббла. Следовательно, кинетическая энергия галактики равна

$$\text{К. Э.} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mH^2 R^2}{2}.$$

Полная энергия галактики есть сумма кинетической и потенциальной энергий:

$$E = \text{П. Э.} + \text{К. Э.} = mR^2 \left[\frac{1}{2} H^2 - \frac{4}{3} \pi \rho G \right].$$

Эта величина должна оставаться постоянной в процессе расширения Вселенной.

Если полная энергия E отрицательна, галактика никогда не может удалиться в бесконечность, так как на очень больших расстояниях потенциальная энергия становится пренебрежимо малой, и в этом случае полная энергия просто равна кинетической энергии, которая всегда положительна. Если же полная энергия E положительна, галактика может достичь бесконечности, имея остаточную кинетическую энергию. Таким образом, условие того, что галактика имеет скорость, как раз равную скорости отрыва, заключается в том, что E обращается в нуль, что дает

$$\frac{1}{2} H^2 = \frac{4}{3} \pi \rho G.$$

Другими словами, плотность должна иметь значение

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{(8\pi G)}.$$

Это и есть критическая плотность. (Хотя этот результат получен здесь с использованием принципов ньютоновой физики, он на самом деле справедлив даже тогда, когда содержимое Вселенной является ультрарелятивистским, если только иметь в виду, что ρ интерпретируется как полная плотность энергии, деленная на c^2 .)

Например, если H равна популярному в настоящее время значению 15 км/с на миллион световых лет, то, вспоминая, что световой год соответствует $9,46 \cdot 10^{12}$ километров, мы получаем

$$\begin{aligned} \rho_{\text{кр}} &= \frac{3}{8\pi(6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/(\text{г} \cdot \text{с}^2))} \times \\ &\times \left(\frac{15 \text{ км/с}/10^6 \text{ св. лет}}{9,46 \cdot 10^{12} \text{ км/св. год}} \right)^2 = 4,5 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3. \end{aligned}$$

В одном грамме содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ ядерных частиц; такое значение теперешней критической плотности соответствует примерно $2,7 \cdot 10^{-6}$ ядерных частиц в 1 см^3 , или 0,0027 частицы в одном литре.

ДОПОЛНЕНИЕ 3. МАСШТАБЫ ВРЕМЕНИ РАСШИРЕНИЯ

Рассмотрим теперь, как меняются параметры Вселенной с течением времени. Предположим, что в момент времени t типичная галактика массы m находится на расстоянии $R(t)$ от некоторой произвольно выбранной центральной галактики, например нашей собственной. Мы видели в предыдущем математическом дополнении, что полная (кинетическая плюс потенциальная) энергия этой галактики равна

$$E = mR^2(t) \left[\frac{1}{2} H^2(t) - \frac{4}{3} \pi \rho(t) G \right],$$

где $H(t)$ и $\rho(t)$ — значения постоянной Хаббла и космической плотности массы в момент времени t . Энергия должна быть всегда постоянной. Однако мы увидим ниже, что при $R(t) \rightarrow 0$ $\rho(t)$ увеличивается, по меньшей мере, как $1/R^3(t)$, так что $\rho(t)R^2(t)$ растет как $1/R(t)$ при $R(t)$, стремящемся к нулю. Чтобы сохранить энергию E постоянной, два члена в скобках должны почти сокращаться, так что при $R(t) \rightarrow 0$ мы имеем

$$\frac{1}{2} H^2(t) \rightarrow \frac{4}{3} \pi \rho(t) G.$$

Характерное время расширения — просто обратная величина постоянной Хаббла, т. е.

$$t_{\text{расш}}(t) = \frac{1}{H(t)} = \sqrt{\frac{3}{(8\pi\rho(t)G)}}.$$

Например, в момент времени первого кадра (см. гл. V) плотность массы равнялась 3,8 тысячи миллионов грамм на кубический сантиметр. Отсюда, время расширения равнялось

тогда

$$t_{\text{расш}} = \sqrt{\frac{3}{8\pi(3,8 \cdot 10^9 \text{ г/см}^3)[6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)]}} = 0,022 \text{ с.}$$

Далее, как меняется $\rho(t)$ с изменением $R(t)$? Если плотность массы определяется массами ядерных частиц (эра преобладания вещества), тогда полная масса внутри сопутствующей сферы радиуса $R(t)$ просто пропорциональна массе ядерных частиц внутри этой сферы и, следовательно, должна оставаться постоянной:

$$\frac{4\pi}{3}\rho(t)R^3(t) = \text{const.}$$

Отсюда $\rho(t)$ обратно пропорциональна $R^3(t)$:

$$\rho(t) \sim \frac{1}{R^3(t)}$$

(знак $\sim$ означает «пропорционально».) В то же время если плотность массы определяется массой, эквивалентной энергии излучения (эра преобладания излучения), тогда $\rho(t)$ пропорциональна четвертой степени температуры. Но температура меняется как $1/R(t)$, так что $\rho(t)$ в этом случае обратно пропорциональна $R^4(t)$:

$$\rho(t) \sim \frac{1}{R^4(t)}.$$

Чтобы иметь возможность одновременно рассматривать эры преобладания вещества и излучения, мы запишем эти результаты в виде

$$\rho(t) \sim \left[\frac{1}{R(t)} \right]^n,$$

где

$$n = \begin{cases} 3 & (\text{эра преобладания вещества}); \\ 4 & (\text{эра преобладания излучения}). \end{cases}$$

Кстати, заметим, что при $R(t) \rightarrow 0$ $\rho(t)$ растет, по меньшей мере, так же быстро, как $1/R^3(t)$, что и было указано выше.

Постоянная Хаббла пропорциональна $\sqrt{\rho}$, и поэтому

$$H(t) \sim \left[\frac{1}{R(t)} \right]^{\frac{n}{2}}.$$

Но тогда скорость типичной галактики

$$v(t) = H(t)R(t) \sim [R(t)]^{1-\frac{n}{2}}.$$

Элементарным результатом дифференциального исчисления является то, что если скорость пропорциональна какой-то степени расстояния, тогда промежуток времени, необходимый для того, чтобы попасть из одной точки в другую, пропорционален изменению отношения расстояния к скорости. Более точно, если v пропорциональна $R^{1-n/2}$, это соотношение имеет вид

$$t_1 - t_2 = \frac{2}{n} \left[\frac{R(t_1)}{v(t_1)} - \frac{R(t_2)}{v(t_2)} \right],$$

или

$$t_1 - t_2 = \frac{2}{n} \left[\frac{1}{H(t_1)} - \frac{1}{H(t_2)} \right].$$

Можно выразить $H(t)$ через $\rho(t)$, после чего получим

$$t_1 - t_2 = \frac{2}{n} \sqrt{\frac{3}{8\pi G}} \left[\frac{1}{\sqrt{\rho(t_1)}} - \frac{1}{\sqrt{\rho(t_2)}} \right].$$

Таким образом, независимо от величины n пройденное время пропорционально изменению квадратного корня из обратной величины плотности.

Например, в течение всей эры преобладания излучения после аннигиляции электронов и позитронов плотность энергии равнялась

$$\rho = 1,22 \cdot 10^{-35} \cdot [T(K)]^4 \text{ г/см}^3$$

(см. мат. доп. 6, с. 179). Кроме того, в этом случае $n = 4$. Таким образом, время, необходимое, чтобы Вселенная охладилась от 100 миллионов градусов до 10 миллионов градусов,

составляет

$$t = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{8\pi[6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)]}} \times \\ \times \left[\frac{1}{\sqrt{1,22 \cdot 10^{-35} \cdot 10^{28} \text{ г/см}^3}} - \frac{1}{\sqrt{1,22 \cdot 10^{-35} \cdot 10^{32} \text{ г/см}^3}} \right] = \\ = 1,90 \cdot 10^6 \text{ с} = 0,06 \text{ года.}$$

Наш общий результат можно также выразить более просто, записав, что время, необходимое, чтобы плотность упала до значения ρ от некоторого значения, много большего, чем ρ , равно

$$t = \frac{2}{n} \sqrt{\frac{3}{8\pi G \rho}} = \begin{cases} 1/2 t_{\text{расш}} & (\text{преобладание излучения}), \\ 2/3 t_{\text{расш}} & (\text{преобладание вещества}). \end{cases}$$

(Если $\rho(t_2) \gg \rho(t_1)$, мы можем пренебречь вторым членом в нашей формуле для $t_1 - t_2$.) Например, при температуре 3000 К плотность массы фотонов и нейтрино равнялась

$$\rho = 1,22 \cdot 10^{-35} \cdot 3000^4 \text{ г/см}^3 = 9,9 \cdot 10^{-22} \text{ г/см}^3.$$

Это настолько меньше, чем плотность при температуре 10^8 К (или 10^7 К, или 10^6 К), что время, требуемое на то, чтобы Вселенная охладилась от очень высоких температур на ранней стадии до 3000 К, можно рассчитать (полагая $n = 4$) просто как

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{8\pi[6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)](9,9 \cdot 10^{-22} \text{ г/см}^3)}} = \\ = 2,1 \cdot 10^{13} \text{ с} = 680 \text{ 000 лет.}$$

Мы показали, что время, необходимое, чтобы плотность Вселенной упала до значения ρ от значительно больших ранних значений, пропорционально $1/\sqrt{\rho}$, в то время как плотность ρ пропорциональна $1/R^n$. Поэтому время пропорционально $R^{n/2}$ или, другими словами,

$$R \sim t^{2/n} = \begin{cases} t^{1/2} & (\text{эра преобладания вещества}), \\ t^{2/3} & (\text{эра преобладания излучения}). \end{cases}$$

Это остается справедливым до тех пор, пока кинетическая и потенциальная энергии не уменьшатся настолько, что станут сравнимы с их суммой — полной энергией.

Как отмечено в гл. II, в каждый момент времени t после начала имеется горизонт на расстоянии порядка ct , из-за которого никакая информация все еще не может нас достичь. Теперь мы видим, что при $t \rightarrow 0$ $R(t)$ уменьшается менее быстро, чем расстояние до горизонта, так что в достаточно ранние моменты времени любая данная «типичная» частица была за горизонтом.

ДОПОЛНЕНИЕ 4. ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА

Распределение Планка дает энергию du излучения черного тела в единице объема, приходящуюся на узкий интервал длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, в виде

$$du = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} d\lambda \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right)} - 1}.$$

Здесь T — температура; $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К — постоянная Больцмана; $c = 299\,792$ км/с — скорость света; $e = 2,718\dots$ — числовая постоянная; $h = 6,625 \cdot 10^{-27}$ эрг · с — постоянная Планка, впервые введенная Максом Планком в качестве составной части этой формулы.

Для *больших* длин волн знаменатель в распределении Планка можно приближенно записать в виде

$$e^{\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right)} - 1 \approx \frac{hc}{kT\lambda}.$$

Следовательно, в этой области длин волн распределение Планка дает

$$du = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} d\lambda.$$

Это — *формула Рэлея–Джинса*. Если ее применить для произвольно малых длин волн, то $du/d\lambda$ станет бесконечной

при $\lambda \rightarrow 0$ и полная плотность энергии излучения черного тела будет бесконечной.

К счастью, du в формуле Планка достигает максимума при длине волны

$$\lambda = 0,2014052 \, hc/kT$$

и затем плавно спадает с уменьшением длины волны. Полная плотность энергии излучения черного тела равна интегралу

$$u = \int_0^{\infty} \frac{8\pi hc}{\lambda^5} d\lambda / \left[e^{\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right)} - 1 \right].$$

Подобные интегралы можно найти в стандартных таблицах определенных интегралов; в результате

$$\mu = \frac{8\pi^5 (kT)^4}{15(hc)^3} = 7,56464 \cdot 10^{-15} \cdot [T(K)]^4 \text{ эрг/см}^3.$$

Это — закон Стефана – Больцмана.

Мы можем легко интерпретировать распределение Планка в терминах квантов света или фотонов. Каждый фотон имеет энергию, определяемую формулой

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Отсюда, число фотонов dN в единице объема излучения черного тела, приходящееся на узкий интервал длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, равно

$$dN = \frac{du}{hc/\lambda} = \frac{8\pi}{\lambda^4} d\lambda / \left[e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right].$$

Полное число фотонов в единице объема 1 см^3 равно тогда

$$N = \int_0^{\infty} dN = 60,42198 \left(\frac{kT}{hc} \right)^3 = 20,28 [T(K)]^3 \text{ фотонов/см}^3,$$

а средняя энергия фотона:

$$E_{\text{ср}} = u/N = 3,73 \cdot 10^{-16} [T(K)] \text{ эрг.}$$

Рассмотрим теперь, что происходит с излучением черного тела в расширяющейся Вселенной. Предположим, что размер Вселенной изменился в f раз; например, если Вселенная удваивается в размере, то $f = 2$.

Как мы видели в главе II, длины волн изменяются пропорционально размеру Вселенной и будут иметь новое значение

$$\lambda' = f\lambda.$$

После расширения плотность энергии du' в новом интервале длин волн от λ' до $\lambda' + d\lambda'$ меньше первоначальной плотности энергии du в старом интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ по двум различным причинам.

1. Так как объем Вселенной увеличился в f^3 раз, то до тех пор, пока не рождалось и не уничтожалось никаких фотонов, их число в единице объема уменьшилось в f^3 раз, т.е. изменилось на множитель $1/f^3$.

2. Энергия каждого фотона обратно пропорциональна его длине волны и поэтому уменьшилась на множитель $1/f$. Отсюда следует, что плотность энергии уменьшилась на общий множитель $1/f^3$, умноженный на $1/f$, то есть на множитель $1/f^4$:

$$du' = \frac{1}{f^4} du = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 f^4} d\lambda \left/ \left[e^{\left(\frac{hc}{kT\lambda'} \right)} - 1 \right] \right.$$

Если мы теперь перепишем эту формулу, введя новую длину волны λ' , то она примет вид

$$du' = \frac{8\pi hc}{\lambda'^5} d\lambda' \left/ \left[e^{\left(\frac{hcf}{kT\lambda'} \right)} - 1 \right] \right.$$

Но это в точности та же формула, что и старая формула для du , выраженная через λ и $d\lambda$, за исключением того, что T заменяется новой температурой

$$T' = T/f.$$

Следовательно, мы заключаем, что свободно расширяющееся излучение черного тела продолжает описываться формулой Планка, но с температурой, падающей обратно пропорционально масштабу расширения.

ДОПОЛНЕНИЕ 5. МАССА ДЖИНСА

Для того чтобы сгусток вещества образовал гравитационно связанную систему, необходимо, чтобы его гравитационная потенциальная энергия превысила внутреннюю тепловую энергию. Гравитационная потенциальная энергия сгустка радиуса r и массы M порядка

$$\text{П.Э.} \approx -GM^2/r.$$

Внутренняя энергия в единице объема пропорциональна давлению p , так что полная внутренняя энергия порядка

$$\text{В.Э.} \approx pr^3.$$

Следовательно, гравитационное сжатие будет преобладать, если

$$GM^2/r \gg pr^3.$$

Но для заданной плотности ρ мы можем выразить r через M с помощью соотношения

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho r^3.$$

Условие гравитационного стягивания можно поэтому переписать в виде

$$GM^2 \gg p \left(\frac{M}{\rho} \right)^{4/3}.$$

или, иными словами,

$$M \gg M_D,$$

где M_D (с точностью до несущественного численного множителя) — величина, известная как масса Джинса:

$$M_D = p^{3/2} / (G^{3/2} \rho^2).$$

Например, как раз перед рекомбинацией водорода плотность массы равнялась $9,9 \cdot 10^{-22}$ г/см³ (см. математическое дополнение 3, с. 171), а давление равнялось*:

$$p \approx \frac{1}{3} c^2 \rho = 0,3 \text{ г}/(\text{см} \cdot \text{с}^2).$$

*Здесь включено давление излучения. — *Прим. ред.*

Поэтому масса Джинса была равна

$$M_D \left(\frac{0,3 \text{ Г}/(\text{см} \cdot \text{с}^2)}{6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{Г} \cdot \text{с}^2)} \right)^{3/2} \times \\ \times \left(\frac{1}{9,9 \cdot 10^{-22} \text{ Г}/\text{см}^3} \right)^2 = 9,7 \cdot 10^{51} \text{ Г} = 5 \cdot 10^{18} M_\odot,$$

где $M_\odot$ — масса Солнца. (Для сравнения масса нашей Галактики равна примерно $10^{11} M_\odot$.) После рекомбинации давление* упало в 10^9 раз, так что масса Джинса уменьшилась до

$$M_D = (10^{-9})^{3/2} \cdot 5 \cdot 10^{18} M_\odot = 1,6 \cdot 10^5 M_\odot.$$

Интересно, что это примерно равно массе больших шаровых скоплений внутри нашей Галактики.

ДОПОЛНЕНИЕ 6. ПЛОТНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРА НЕЙТРИНО

До тех пор, пока сохраняется тепловое равновесие, полное значение величины, называемой «энтропией», остается фиксированным. В достаточном для наших целей приближении энтропия S в единице объема при температуре T дается формулой

$$S \sim N_T T^3,$$

где N_T — эффективное число разновидностей частиц, находящихся в тепловом равновесии, пороговая температура которых ниже T . Для того чтобы удержать полную энтропию постоянной, S должна быть пропорциональна обратному кубу размера Вселенной. Это значит, что если R есть расстояние между любой парой типичных частиц, то

$$SR^3 \sim N_T T^3 R^3 = \text{const.}$$

Как раз перед аннигиляцией электронов и позитронов (при температуре около $5 \cdot 10^9 \text{ К}$) нейтрино и антинейтрино

*Рассматривается только давление вещества (см. примечание редактора на с. 82). — *Прим. ред.*

уже вышли из теплового равновесия с остальным содержащим Вселенной, так что единственными частицами, имевшимися в больших количествах в равновесии, были электрон, позитрон и фотон. Мы видим, что согласно табл. 1 полное эффективное число разновидностей частиц перед аннигиляцией составляло*

$$N_{\text{до}} = 7/2 + 2 = 11/2.$$

После аннигиляции электронов и позитронов в четвертом кадре единственными частицами, которые остались в равновесии в большом количестве, были фотоны. Эффективное число разновидностей частиц равнялось поэтому просто

$$N_{\text{после}} = 2.$$

Из закона сохранения энтропии следует, что

$$\frac{11}{2}(TR)_{\text{до}}^3 = 2(TR)_{\text{после}}^3.$$

Это значит, что тепло, выделившееся при аннигиляции электронов и позитронов, увеличило величину TR на множитель

$$\frac{(TR)_{\text{после}}}{(TR)_{\text{до}}} = (11/4)^{1/3} = 1,401.$$

Перед аннигиляцией электронов и позитронов температура нейтрино T_ν была такой же, как и температура фотонов T . Но после этого T просто падала как $1/R$, так что для всех последующих моментов времени произведение $T_\nu R$ равнялось значению TR перед аннигиляцией.

$$(T_\nu R)_{\text{после}} = (T_\nu R)_{\text{до}} = (TR)_{\text{до}}.$$

Отсюда заключаем, что после окончания процесса аннигиляции температура фотонов оказалась выше температуры нейтрино в

$$(T/T_\nu)_{\text{после}} = (TR)_{\text{после}}/(T_\nu R)_{\text{после}} = (11/4)^{1/3} = 1,401 \text{ раза.}$$

* Речь идет о находящихся в равновесии и взаимодействующих частицах e^+ , e^- и γ . — *Прим. ред.*

Нейтрино и антинейтрино, даже хотя они и не находятся в тепловом равновесии, дают важный вклад в космическую плотность энергии. Эффективное число разновидностей нейтрино и антинейтрино равно* $7/2$, или $7/4$ от эффективного числа разновидностей фотонов. (Имеются два спиновых состояния фотона.) В то же время четвертая степень температуры нейтрино меньше, чем четвертая степень температуры фотонов, на множитель $(4/11)^{4/3}$. Следовательно, отношение плотности энергии нейтрино и антинейтрино к плотности энергии фотонов

$$u_\nu/u_\gamma = 7/4 \cdot (4/11)^{4/3} = 0,4542.$$

Закон Стефана–Больцмана (см. главу III) утверждает, что при температуре фотонов T плотность энергии фотонов

$$u_\gamma = 7,5641 \cdot 10^{-15} \text{ эрг/см}^3 [T(K)]^4.$$

Следовательно, полная плотность энергии после электрон-позитронной аннигиляции равна

$$u = u_\nu + u_\gamma = 1,4542u_\gamma = 1,100 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/см}^3 [T(K)]^4.$$

Мы можем перевести это в эквивалентную плотность массы, разделив на квадрат скорости света, и найдем тогда

$$\rho = u/c^2 = 1,22 \cdot 10^{-35} \text{ г/см}^3 [T(K)]^4.$$

*Здесь учтены два сорта нейтрино ν_e и ν_μ и их античастицы. Вероятно, существует еще один сорт ν_τ и $\bar{\nu}_\tau$. — *Прим. ред.*

ДОПОЛНЕНИЯ РЕДАКТОРА РУССКОГО ПЕРЕВОДА

ДОПОЛНЕНИЕ 1. КЛАССИЧЕСКАЯ НЕРЕЛЯТИВИСТСКАЯ КОСМОЛОГИЯ

В предлагаемой книге Вайнберг для определения закона расширения Вселенной рассматривает шар, выделенный из безграничной среды. Гравитационное поле среды, окружающей шар, при этом не рассматривается: как известно, поле внутри сферически-симметричной оболочки равно нулю. Вывод Вайнберга правилен. Однако у читателя могут возникнуть сомнения, нет ли произвола в операции мысленного выделения шара*. Поэтому полезно дать вывод, также основанный на ньютоновой теории тяготения, в котором искусственное выделение шара не используется. Логическая простота при этом покупается ценой некоторого математического усложнения решения. Приводимый ниже вывод оказывается также весьма полезным в теории образования галактик при рассмотрении возмущений идеального решения. Однако в этом дополнении мы не касаемся вопроса о возмущениях.

Итак, для определения закона расширения будем непосредственно рассматривать безграничную среду, ее гравитационный потенциал и движение.

Уравнение тяготения запишем в форме уравнения Пуассона:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 4\pi G\rho, \quad (1)$$

* Если бы мы мысленно выделили эллипсоид вместо шара, то действительно результат оказался бы иным. Это обстоятельство можно считать проявлением так называемого гравитационного парадокса, т. е. трудности, возникающей при применении ньютоновой теории тяготения к безграничной среде с постоянной плотностью вещества.

где φ — потенциал гравитационного поля; G — гравитационная постоянная; ρ — плотность. Будем искать сферически-симметричное решение с φ , зависящим только от $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Тогда

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = 4\pi G \rho. \quad (2)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\varphi = 2\pi G \rho r^2 / 3. \quad (3)$$

Мы привыкли к тому, что потенциал равен нулю на бесконечности; для ограниченной совокупности масс это так и есть. В безграничной Вселенной, равномерно заполненной веществом, это не так, однако нет никаких причин отказываться от приведенного решения.

Давление, так же как и плотность, считаем не зависящим от координат. В уравнение движения сплошной среды входит градиент давления, но в данном случае эта величина равна нулю.

Общий вид уравнения движения сплошной среды:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = -\text{grad } \varphi - \frac{1}{\rho} \text{grad } p. \quad (4)$$

Подставим сюда выражение закона Хаббла

$$\mathbf{u} = H(t) \mathbf{r} \quad (5)$$

и используем выражение (3) для $\varphi(r)$ и то, что $\text{grad } p = 0$. Сократив $\mathbf{r}$, получим:

$$\frac{dH}{dt} + H^2 = -\frac{4\pi}{3} G \rho. \quad (6)$$

Наконец, составим уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\rho \mathbf{u}). \quad (7)$$

Подставив сюда хаббловское выражение скорости (5), найдем, что не зависящая от координат (но зависящая от времени) плотность удовлетворяет уравнению

$$\frac{d\rho}{dt} = -3H\rho. \quad (8)$$

Система уравнений (6) и (8) полностью эквивалентна тем уравнениям, которые выписаны автором книги в дополнении 2. Для ее решения удобно поделить одно уравнение на другое. Тогда

$$\frac{dH}{d\rho} = \frac{H^2 + (8\pi/3)G\rho}{3H\rho}. \quad (9)$$

Это уравнение легко представить в виде линейного уравнения относительно величины H^2 :

$$\frac{d(H^2)}{d\rho} = \frac{2H^2}{3\rho} + \frac{16\pi}{9}G, \quad (10)$$

решение которого с заданными (измеренными в настоящее время) значениями H_0 и ρ_0 нетрудно записать. Общее решение имеет вид (A — константа интегрирования):

$$H^2 = A\rho^{2/3} + \frac{8\pi}{3}G\rho. \quad (11)$$

Подставляя сегодняшние значения H_0 и ρ_0 , получаем окончательно

$$H^2 = \left(H_0^2 - \frac{8\pi}{3}G\rho_0\right) \frac{\rho^{2/3}}{\rho_0^{2/3}} + \frac{8\pi}{3}G\rho, \quad (12)$$

что полностью описывает и прошлое (при $\rho > \rho_0$) и будущее Вселенной. Еще одним интегрированием можно найти $t(\rho)$ и тем самым связать H и ρ с t .

Однако мы не останавливаемся на этом. Нашей целью была демонстрация того, что не нужно искусственно выделять какой-то шар, рассматривать находящуюся на краю точку,

делать правдоподобные, но не строгие предположения о том, что внешняя (бесконечная!) область не влияет на движение.

Выше были применены регулярные методы рассмотрения движения сплошной среды и ясные предположения о том, что ищется решение изотропное и однородное, т. е. такое, в котором равноценны все направления и все точки пространства. Изотропия следует из сферически-симметричного вида функции φ и симметрии закона Хаббла. В однородности решения легко убедиться, меняя начало координат и переходя к новой системе, ускоренно движущейся относительно старой. Безграничность среды, так же как и обращение потенциала в бесконечность на пространственной бесконечности, не создает никаких трудностей при расчете*.

Все расчеты могли бы быть проделаны не только в девятнадцатом, но и в восемнадцатом веке. Тщательный логический анализ понятий однородности и изотропии в ньютоновой механике — вот что могло бы привести к сверххраненному открытию теории расширяющейся Вселенной. Парадокс — один из тех, которыми избилует наука, — заключается в том, что ньютонова теория космологического расширения была создана лишь после научного подвига Фридмана. Вспоминаются слова Пастернака: «Хоть простота нужнее людям, но сложное доступней им».

За всем сказанным выше не следует, однако, забывать, что релятивистская теория богаче и содержательнее ньютоновой; в общей теории относительности выясняется еще и глобальная геометрия мира.

Наконец заметим, что на ранней стадии мы имеем дело с веществом, давление которого того же порядка, что и плотность энергии покоя ρc^2 . Газ, состоящий из частиц, движущихся со скоростью света, имеет давление $p = \rho c^2/3$. В этом случае, как нас учит общая и специальная теория относительности, уравнения несколько меняются. Уравнение Пуассона

* Вид функции φ закона Хаббла непосредственно доказывает изотропию, т. е. равноценность всех направлений, и сферическую симметрию относительно начала координат. Только после следующего шага — доказательства однородности решения — можно доказать также изотропию относительно любой точки среды.

имеет вид:

$$\Delta\varphi = 4\pi G(\rho + 3p/c^2). \quad (13)$$

Поэтому можно сказать, что давление тоже «весит».

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\begin{aligned} \partial\rho/\partial t &= -\operatorname{div}(\rho + p/c^2); \\ \partial\rho/\partial t &= -3H(\rho + p/c^2), \end{aligned} \quad (14)$$

так как плотность в данном объеме уменьшается не только вследствие вытекания части вещества из данного объема, но и за счет работы расширения, в силу закона эквивалентности массы и энергии.

ДОПОЛНЕНИЕ 2. А. А. ФРИДМАН И ЕГО КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Советскому читателю должны быть интересны сведения о нашем соотечественнике, внесшем крупнейший вклад в теоретическую космологию. Александр Александрович Фридман родился 17 июля 1888 года в Петербурге в семье музыкантов. Его математические способности проявились очень рано, еще в гимназии. Он учился в университете, был учеником академика Стеклова. Во время первой мировой войны служил в авиационных частях, организовал аэронавигационную службу. Сделал весьма важные работы по динамической метеорологии и гидромеханике. В июле 1925 года участвовал в рекордном полете на аэростате. Умер 16 сентября 1925 года в Ленинграде от брюшного тифа в возрасте 37 лет.

Его первая космологическая работа была напечатана в ведущем журнале того времени в Германии в 1922 году и в русском «Журнале физико-химического общества». В этой работе впервые было найдено решение уравнений общей теории относительности для замкнутого нестационарного расширяющегося мира. Эта работа не осталась незамеченной. Эйнштейн опубликовал в том же году «Замечание», в котором, настаивая на стационарности Вселенной, опровергал работу

Фридмана. За этим последовало письмо Фридмана, и в следующем 1923 году Эйнштейн опубликовал краткую заметку, в которой писал: «Я считаю результаты г. Фридмана правильными и проливающими новый свет. Оказывается, что уравнения ... допускают ... также и переменные относительно времени ... решения».

Наконец в 1924 году Фридман опубликовал решение для пространства отрицательной кривизны, т. е. для открытого мира. Эти два типа решений исчерпывают все возможности для однородной изотропной Вселенной*. Но до смерти Фридмана оставался только один год, и он не успел узнать об астрономическом подтверждении своей теории.

В 1963 году Академия наук СССР отметила 75-летие со дня рождения Фридмана. Был издан посвященный ему выпуск журнала «Успехи физических наук» (т. 80, вып. 3). В этом выпуске воспроизведены статьи Фридмана 1922 и 1924 годов и заметки Эйнштейна. Выпуск содержит также воспоминания о Фридмане и обзоры по космологии и общей теории относительности. Несколько позже появились «Избранные труды» Фридмана (М., Наука, 1966). В эти труды вошли книга Фридмана «Мир как пространство и время», впервые изданная в 1923 году, и статьи советских ученых о его жизни и творчестве.

ДОПОЛНЕНИЕ 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ВЕЩЕСТВА

Автор правильно отмечает, что при температуре выше 3000 К атомы диссоциированы и имеет место рассеяние фотонов свободными электронами. Однако не совсем точно высказывание относительно того, что это рассеяние поддерживает тепловое равновесие между веществом и излучением.

Дело в том, что в процессе рассеяния на движущихся электронах фотоны меняют направление и энергию. Однако чис-

* Решение, в котором трехмерное пространство является плоским, можно рассматривать как предельный случай пространства отрицательной кривизны при кривизне, стремящейся к нулю.

ло фотонов при этом, как правило, не меняется. Таким образом, рассеяние перераспределяет фотоны по спектру в соответствии с температурой электронов, но оставляет постоянным общее число фотонов в единице объема.

Для установления полного термодинамического равновесия обязательно должны происходить процессы поглощения и испускания фотонов. Благодаря этим процессам и устанавливается при каждой температуре определенное число фотонов каждой энергии и определенное общее число фотонов в единице объема.

Но свободный электрон не может поглотить или испустить фотон. Этот процесс происходит лишь в тот момент, когда электрон пролетает мимо ядра. Если при этом испускается фотон, то электрон теряет часть энергии и тормозится, летит дальше с меньшей энергией. Поэтому говорят о «тормозном» излучении.

Плотность плазмы (т.е. вещества во Вселенной до рекомбинации) очень мала, поэтому установление полного термодинамического равновесия происходит только тогда, когда температура плазмы выше 30 000 000 К и, соответственно, плотность плазмы выше, чем при рекомбинации (при 3000 К), в 10^{12} раз. В последнее время итальянец Децотти и советский астрофизик Р. А. Сюняев отметили, что при рассеянии, хотя и редко, число фотонов может изменяться: иногда один фотон, падая на электрон, вызывает появление двух фотонов после рассеяния (так называемый двойной комптон-эффект). Иногда происходит и обратный процесс. В связи с этим примерно в 10 раз снижается температура, при которой имеет место установление термодинамического равновесия. После этого спектр излучения остается равновесным, планковским, с температурой, понижающейся в ходе общего расширения.

Однако это справедливо лишь в случае идеального равномерного расширения, без каких-либо возмущений. Если при температуре ниже 30 000 000 К в плазме выделяется энергия, то теория предсказывает своеобразный спектр, отличающийся от планковского. Теория этого явления разработана Р. А. Сюняевым и автором дополнения. Некоторое искажение спектра, особенно в его коротковолновой части, возможно и за

счет дополнительного излучения межзвездного газа и пыли на поздней стадии в очень далеких галактиках. При большом их числе и малом угловом расстоянии между ними такое излучение трудно отличить от первичного реликтового излучения. В настоящее время активно ведется изучение спектра, но еще нельзя сказать с определенностью, есть ли отклонения от формулы Планка (в пределах, не превышающих 20%).

ДОПОЛНЕНИЕ 4. МАЛЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Существование в настоящее время определенной структуры и неравномерного распределения вещества в пространстве (существование скоплений галактик) свидетельствует о возмущениях строгой модели, построенной А. А. Фридманом. Эти возмущения должны сопровождаться и возмущениями равномерности излучения. Возмущения эти могут быть сравнительно малыми, так же, как и начальная неоднородность плот-

блюденного содержания дейтерия, считают убедительными, в отличие от того, что пишет Вайнберг.

Необходимы дальнейшие более точные опыты и развитие теории для того, чтобы количественно разобраться в теории образования структуры галактик.

В последнее время многие астрофизики, в том числе и редактор этой книги, отмечают, что без учета массы покоя нейтрино (см. подробнее ниже, в дополнении 7) трудно согласовать значительную неоднородность в распределении плотности вещества и малую плотность вещества с малостью возмущений микроволнового излучения.

ДОПОЛНЕНИЕ 5. АНИЗОТРОПИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Тщательные измерения, проведенные с помощью аппаратуры, установленной на высотном самолете (для уменьшения излучения атмосферы, попадающего в прибор), позволили обнаружить определенную малую анизотропию микроволнового фона излучения. Антенна, направленная на созвездие Льва, дает температуру излучения на 0,13 процента выше средней. В противоположном направлении температура на 0,13 процента ниже средней. Температура плавно меняется между этими двумя значениями.

Такую зависимость микроволнового фона от направления можно объяснить, принимая, что температура строго одинакова во всех направлениях. Однако такая «одинаковость», или, выражаясь научно, «изотропия», имеет место лишь для некоторого воображаемого наблюдателя. Солнечная система, Земля и аппаратура, находящаяся на самолете, движутся относительно этого наблюдателя со скоростью 390 ± 60 км/с в направлении созвездия Льва. Вследствие этого движения, т. е. за счет эффекта Доплера, излучение, идущее навстречу, кажется нам более горячим — на 0,13%, или на 0,004 градуса, а излучение, догоняющее нас, представляется нам более холодным на те же 0,004 градуса. Точность измерения такова, что выделить вклад от движения Земли вокруг Солнца (30 км/с) и тем более

от движения самолета относительно Земли (0,5 км/с) в настоящее время не удастся. Однако уже при увеличении точности в 10 раз движение Земли, меняющееся на протяжении года, можно будет заметить. Зная, как движется Солнечная система в Галактике, можно определить скорость, с которой движется относительно воображаемого наблюдателя (см. выше) центральная область нашей Галактики: эта скорость оказалась приблизительно равной 600 км/с.

На этом примере выясняется, что в каждой точке Вселенной существует наблюдатель, относительно которого микроволновое излучение изотропно. Этого наблюдателя и связанную с ним систему координат можно назвать выделенными. Движение другого наблюдателя, находящегося в той же точке, относительно выделенной системы координат приводит к тому, что этот «другой» наблюдатель обнаружит анизотропию микроволнового излучения. Именно это фактически и произошло с земным наблюдателем (анизотропия равна $\pm 0,13\%$).

Наличие в каждой точке выделенной системы координат напоминает взгляды физиков до создания теории относительности, когда предполагалось, что свет — это колебания особого вещества — эфира, заполняющего всю Вселенную. Предполагалось далее, что система координат, связанная с эфиром, является преимущественной, выделенной, и ставились опыты по обнаружению движения Земли относительно эфира. Мы знаем, что эти опыты (Майкельсона и других) дали отрицательный результат — светоносный эфир не существует. Однако эволюция Вселенной приводит к тому, что в наблюдениях космического микроволнового излучения (но только в этих астрономических наблюдениях!) выделенная система появляется, и ее иногда называют «новый эфир». Описанные выше наблюдения позволили определить скорость Земли и Солнечной системы, а также Галактики относительно нового эфира — соответственно 390 и 600 км/с.

Однако в расширяющейся Вселенной новый эфир в одном месте движется относительно нового эфира в другом месте. Именно новый эфир или, другими словами, микроволновое излучение с наибольшей точностью осуществляет движение по закону Хаббла. Движение отдельных небесных тел отличает-

ся от хаббловского за счет сил тяготения соседних тел. На излучение силы тяготения действуют гораздо слабее, что и позволяет считать, что излучение и связанная с ним система координат движутся по невозмущенному закону Хаббла.

Я. Б. Зельдович и Р. А. Сюняев поставили вопрос: можно ли определить, как движутся относительно «нового эфира» сверхдалние небесные тела? Если смещение спектральных линий соответствует, например, скорости удаления некоего скопления галактик, равной 100 000 км/с, то какая часть этой скорости есть хаббловская скорость, а какая часть — добавочная случайная скорость, связанная с отклонением движения данного скопления галактик от хаббловского закона? Более того, был поставлен вопрос о том, с какой точностью выполняется закон Хаббла в его векторной форме: действительно ли скорость далекого скопления галактик относительно нас (Земли, Солнечной системы, нашей Галактики) направлена по вектору, соединяющему нас с этим далеким скоплением? Нет ли у далекого скопления поперечной (тангенциальной, касательной) скорости, хотя бы и меньшей, чем его хаббловская скорость удаления?

Смещение спектральных линий не позволяет отличить случайную скорость от хаббловской, поскольку независимое определение расстояния до далеких галактик очень неточно (не лучше $\pm 30\%$). Поперечная скорость дает малое смещение спектральных линий, которое к тому же принципиально нельзя отделить от смещения, связанного с продольной скоростью.

Однако авторы показали, что скорость скоплений, которые содержат большое количество ионизованного газа, может быть измерена. Такой газ содержит свободные электроны, рассеивающие микроволновое излучение. Если этот газ движется относительно нового эфира, т. е. относительно микроволнового излучения, то свойства излучения изменяются. Продольное движение вызывает повышение или понижение температуры микроволнового излучения при антенне, направленной на облако газа. Поперечное движение дает небольшую поляризацию рассеянного излучения. Тепловое движение электронов несколько меняет спектр излучения. Этот эффект в настоящее время обнаружен путем радиоастрономи-

ческих наблюдений гигантских облаков горячего газа, являющихся одновременно источником рентгеновского излучения. Из этих наблюдений можно определить также температуру и концентрацию электронов. Таким образом, в принципе можно определить движение облака и вместе с ним всего скопления или, по крайней мере, сказать, что эта скорость не превышает величины порядка 2 000–3 000 км/с для продольного и 5 000–10 000 км/с для поперечного движения.

ДОПОЛНЕНИЕ 6. О СОХРАНЕНИИ БАРИОНОВ

Вайнберг упоминает о законе сохранения барионного числа, или, другими словами, о законе сохранения барионов как о несомненном факте.

Действительно, все экспериментальные данные ядерной физики подтверждают этот закон. Специальные поиски распада обыкновенных, не радиоактивных ядер показали, что вероятность распада протона меньше 10^{-37} с^{-1} , что соответствует времени полураспада больше $3 \cdot 10^{29}$ лет.

Однако сам Вайнберг еще в 1964 году отметил, что закон сохранения барионов может быть лишь приближенным в отличие от точного закона сохранения электрического заряда. Дело в том, что электрический заряд взаимодействует с электромагнитным полем, подчиняющимся уравнениям Максвелла, а эти уравнения требуют сохранения заряда. Грубо говоря, сохранение электрического заряда вытекает из существования радиоволн. Однако нет другого аналогичного поля, которое требовало бы сохранения барионного заряда (это то же самое, что и барионное число) и запрещало бы превращение протона, например, в позитрон и нейтральный пион. Сохранение барионного заряда установлено лишь прямыми опытами и с той точностью, которую дает опыт*.

*Тот факт, что нет «барионного» поля, связанного с барионным зарядом (как электрическое поле связано с электрическим зарядом), отмечали еще Ли и Янг в 1956 году. Такое «барионное» поле изменяло бы законы небесной механики, проверенные с огромной точностью. Изменение связано в первую очередь с тем, что различные вещества имеют различный барионный заряд на единицу массы.

Поэтому Вайнберг в 1964 году предположил, что барионный заряд не сохраняется. Однако в то время Вайнберг имел в виду теорию стационарной Вселенной Хойла (см. с. 19) и писал о возможности преимущественного рождения в вакууме барионов по сравнению с антибарионами. Теорию горячей Вселенной он тогда не рассматривал. В 1973–1976 гг. в предлагаемой книге Вайнберг не указывает на возможность несохранения барионов и, как сказано выше, причисляет сохранение барионов к фундаментальным законам природы (с. 97).

Процессы, медленно идущие при низкой температуре, могут идти быстро при высокой температуре. А. Д. Сахаров в 1967 году первый поставил вопрос о несохранении барионов в горячей модели Вселенной. По современным взглядам, нейтроны, протоны и другие сильновзаимодействующие частицы (адроны) состоят из кварков; при высокой температуре кварки свободны и достаточно быстро распадаются и рождаются, спонтанно и при столкновениях с другими частицами (подробнее о кварках см. главу VII). Между свойствами частиц и античастиц существует определенное различие — на это указывают лабораторные эксперименты. Теория показывает, что это различие не нарушает равенства числа частиц и античастиц в термодинамическом равновесии (о понятии термодинамического равновесия см. главу III). Однако в ходе расширения равновесие может нарушиться, и возможно закономерное появление всюду одинакового избытка барионов над антибарионами. После охлаждения Вселенная везде будет состоять из барионов («вещества») и фотонов. Антибарионы, «антивещество», практически полностью аннигилируют, оставляя избыток вещества, задолго до того, как начнется нуклеосинтез. Аналогичные идеи развивал В. А. Кузьмин в 1969 году.

Позже, в 1974 году, С. Хоукинг и вслед за ним Я. Б. Зельдович отметили возможность появления избытка вещества при испарении черных дыр.

Новая ситуация возникла уже после выхода в свет предлагаемой книги Вайнберга. Сейчас развивается новая теория элементарных частиц, объединяющая теорию электромагнетизма, теорию слабого взаимодействия (в частности, процессов испускания электронов и нейтрино при распаде нейтро-

на) и теорию сильного взаимодействия (ядерных сил и кварков). В этой теории естественным образом получается, что протон должен распадаться с временем жизни около 10^{32} лет. Это предсказание не противоречит существующим опытам.

В настоящее время (конец 1980 года) начинается необычайно трудный, но и важнейший «эксперимент века» — поиски распада протона, предсказанного теорией. Применительно к космологии и, в частности, к теории горячей Вселенной возможно, что теория объясняет соотношение между количеством вещества (протонов) и фотонов, т. е. значение числа $B/\gamma = 10^{-8} \div 10^{-9}$ (отношение числа протонов к числу фотонов в единице объема), которое в настоящее время известно только из наблюдений. Единственным предположением при этом будет однородное и изотропное расширение Вселенной «по Фридману», начиная с сингулярного состояния. В развитии теории активное участие принимает Вайнберг.

Конкретно наиболее вероятным считается следующий механизм распада протона, связанный с предположением о существовании очень тяжелых дробнозаряженных скалярных (т. е. со спином нуль) X -частиц. Их масса в 10^{14} раз больше массы протона, а заряд равен $+4/3e$ или $-4/3e$, где e — элементарный заряд (заряд протона). Эти частицы могут распадаться по двум каналам каждая:

$$\begin{aligned} X^+ &\rightarrow 2q & X^+ &\rightarrow \bar{q} + \bar{l}; \\ X^- &\rightarrow 2q & X^- &\rightarrow q + l. \end{aligned}$$

Здесь q — кварки; $\bar{q}$ — антикварки; l — лептоны (заряженные!); $\bar{l}$ — антилептоны. В первом канале для X^+ фигурируют два кварка с зарядом $+2/3e$ каждый, во втором канале античастица кварка, имеющего заряд $-1/3e$. Следовательно, заряд $\bar{q}$ во втором канале равен $+1/3e$, а заряд $\bar{l}$ равен $+e$. Таким образом, электрический заряд сохраняется точно. Однако барионный заряд, получающийся в двух каналах, различен. Напомним, что барион состоит из трех кварков и барионный заряд кварка равен $1/3$; барионный заряд протона равен 1 по определению.

При высокой температуре (выше пороговой температуры для рождения X -частиц) частицы X находятся в равнове-

сии. Однако при расширении и охлаждении распад X -частиц отстает и на определенной стадии X^+ и X^- распадаются в неравновесных условиях. При этом из-за асимметрии частиц и античастиц образуется несколько больше кварков по сравнению с количеством антикварков. При дальнейшем охлаждении кварки и антикварки соединяются в барионы, антибарионы и мезоны, и возникает избыток барионов.

С другой стороны, распад протонов в настоящее время происходит через промежуточное образование частицы X :

$$P = 3q \rightarrow q + X \rightarrow q + \bar{q} + e^+ = \pi^0 + e^+.$$

Первый шаг процесса есть обращение того процесса ($X \rightarrow 2q$), который написан выше. Так как X — очень тяжелая частица, то образоваться она может лишь на краткое мгновение (как говорят физики — «виртуально»), наблюдать можно лишь конечные продукты распада

$$P \rightarrow \pi^0 + e^+.$$

Вероятность процесса мала именно потому, что велика масса X , образующая энергетический барьер на пути реакции. В ближайшие 20–30 лет прямое наблюдение X -частицы исключено, однако мы надеемся, что распад протона будет наблюден значительно раньше.

ДОПОЛНЕНИЕ 7. О КОНЦЕНТРАЦИИ И ПЛОТНОСТИ НЕЙТРИНО ВО ВСЕЛЕННОЙ

При высокой температуре, выше 10^{10} К, нейтрино находятся в термодинамическом равновесии с электронами, позитронами и фотонами. Равновесная концентрация нейтрино убывает с понижением температуры пропорционально кубу температуры. Этот закон убывания такой же, как и у фотонов, так как нейтрино либо вовсе не имеют массы покоя, как фотоны, либо масса их мала по сравнению с энергией при высокой температуре. Поэтому соотношение между числом нейтрино

и фотонов в этот период не зависит от силы взаимодействия и, таким образом, неверно, что нейтрино сохраняются вследствие того, что они слабо взаимодействуют и сечение их аннигиляции мало. Если бы нейтрино взаимодействовали сильнее (что в действительности имеет место при температуре выше 10^{10} К), то аннигиляция нейтрино и антинейтрино с превращением их, например, в фотоны происходила бы чаще. Однако одновременно усилился бы и обратный процесс превращения фотонов в пары нейтрино и антинейтрино. Концентрация нейтрино в термодинамическом равновесии, приблизительно равная концентрации фотонов, при этом не изменилась бы. Имея в виду, что позже, после аннигиляции электронов и позитронов, температура нейтрино на самом деле будет даже несколько ниже температуры излучения, усиление взаимодействия привело бы даже к некоторому увеличению концентрации нейтрино за счет уменьшения концентрации фотонов. Сказанное выше относится к нейтрино, относительно которых предполагается, что масса покоя равна нулю, скорость равна скорости света и энергия равна импульсу, умноженному на скорость света. Термодинамические свойства таких безмассовых нейтрино мало отличаются от свойств фотонов.

Современная теория не исключает возможного существования тяжелых нейтрино с отличной от нуля массой покоя. Надо сказать, что из лабораторных опытов определить массы нейтрино удастся с трудом и неточно. До недавнего времени, до 1980 года, известны были лишь верхние пределы массы нейтрино различного типа. Лабораторные опыты по распаду трития давали для массы покоя электронного нейтрино верхний предел $mc^2 < 60$ или 40 эВ, т.е. $m < 10^{-4}m_e \approx 10^{-31}$ г. Для мюонных нейтрино можно утверждать только, что их масса покоя меньше 2 миллионов электронвольт, т.е. меньше учетверенной массы электрона. Недавно (Перл, 1975 год) открыта заряженная тау-частица, тяжелый аналог электрона и мюона. Масса тау-частицы около 1800 миллионов электронвольт, т.е. она почти вдвое тяжелее протона. Естественно полагать, что при распаде этой заряженной частицы образуются соответствующие ей тау-нейтрино. Лабораторные опыты не исключают того, что масса покоя тау-нейтрино отлична от

нуля, и дают только, что эта масса меньше 500 миллионов электронвольт.

С. С. Герштейн и Я. Б. Зельдович (1966 год) показали, что космологические соображения ограничивают массу покоя электронного и мюонного нейтрино значением меньше 100–200 эВ. Последующие авторы уточняли эти соображения и утверждали, что масса нейтрино меньше 10 эВ. К тем же выводам для тау-нейтрино пришли независимо Бенжамен Ли и Вайнберг в США и М. И. Весоцкий, А. Д. Долгов и Я. Б. Зельдович в СССР.

В последнее время в Москве, в Институте теоретической и экспериментальной физики В. А. Любимов, Е. Г. Новиков, В. З. Нозик, Е. Ф. Третьяков и В. С. Козик провели новое более точное исследование распада трития и пришли к выводу, что электронное нейтрино с большой вероятностью имеет массу покоя в пределах между 15 и 45 эВ. За рубежом появились указания на так называемые нейтринные осцилляции, т. е. на взаимные превращения электронных нейтрино в мюонные и тау-нейтрино во время пролета нейтрино от источника (ядерного реактора или ускорителя) до мишени, т. е. детектора. Такие осцилляции интересны для астрономии сами по себе, так как они объясняют дефицит солнечных нейтрино в соответствии с идеей, давно высказанной Б. М. Понтекорво. Но эти осцилляции важны еще и потому, что они были бы невозможны, если бы все нейтрино имели нулевую массу покоя.

Наличие у нейтрино небольшой массы покоя, скажем, между 5 и 50 эВ, имеет огромное значение для космологии. Процессы при высокой температуре, в течение тех «первых минут», которым посвящена книга Вайнберга, практически не изменяются, поскольку энергия покоя нейтрино мала по сравнению с температурой (см. выше в этом дополнении). Однако еще до рекомбинации водорода (происходящей при температуре $3000\text{ К} \approx 0,3\text{ эВ}$) тепловая энергия становится меньше массы покоя нейтрино. В термодинамическом равновесии нейтрино и антинейтрино должны были бы аннигилировать, превращаясь в фотоны. Однако вероятность такого процесса при температуре ниже 10^{10} К ничтожна, аннигиляция нейтрино практически не имеет места.

К сегодняшнему дню Вселенная пришла с неизменным соотношением между концентрацией фотонов (~ 400 штук в 1 см^3) и концентрацией нейтрино (около 360 штук нейтрино и антинейтрино всех трех сортов в 1 см^3).

Средняя энергия одного фотона при температуре 2,7 или 3 К около 0,001 эВ, что соответствует массе $2 \cdot 10^{-36}$ г; плотность фотонного газа составляет при этом около 10^{-33} г/см³.

Плотность же нейтринного газа при средней массе покоя 10 эВ для нейтрино всех видов равна 10^{-29} г/см³. Это в 10 000 раз больше плотности излучения! Плотность излучения в настоящее время мала по сравнению с плотностью обычного вещества, т.е. барионов ($\sim 10^{-30}$ – 10^{-31} г/см³), и мала по сравнению с критической плотностью ($5 \cdot 10^{-30}$ – 10^{-29} г/см³). Но плотность нейтрино, если они обладают массой покоя порядка 10 эВ, оказывается очень большой! Возникает принципиально новая картина Вселенной, в которой главную часть плотности составляет плотность нейтрино.

Более того, не исключено, что именно за счет плотности нейтрино мир оказывается замкнутым, а не открытым. Напомним, что при плотности, превышающей критическую, общая теория относительности предсказывает: 1) что кривизна пространства соответствует замкнутому миру без границ, но с конечным полным объемом, наподобие поверхности шара; 2) что наблюдаемое в настоящее время расширение Вселенной через некоторое время, порядка 10 миллиардов лет, сменится неограниченным сжатием. Произойдет ли это? Ответ на этот вопрос зависит от результатов очень трудных опытов по определению массы нейтрино.

Во Вселенной с тяжелыми нейтрино рост возмущений плотности также происходит совершенно иначе: сперва возникают и усиливаются возмущения плотности нейтрино (это первыми отметили в 1975 году венгерские физики Маркс и Салаи) и лишь позднее, после рекомбинации водорода, к ним подстраиваются возмущения плотности нейтрального газа. В частности, образование скоплений галактик оказывается возможным совместить с малой амплитудой возмущений микроволнового излучения. Эта картина развивается в нескольких заметках Я. Б. Зельдовича, Р. А. Сюняева,

А. Г. Дорошкевича и М. Ю. Хлопова в «Письмах в Астрономический журнал» (август 1980 года).

Есть указания, что масса гигантских скоплений галактик больше суммы масс галактик, входящих в эти скопления. Наиболее убедительные данные по проблеме скрытой массы дал эстонский астроном Эйнасто. Возможно, что скрытая масса представляет собой облако тяжелых нейтрино, в которое погружены галактики.

В настоящее время (декабрь 1980 года) мир с нетерпением ожидает новых экспериментальных данных по массам нейтрино различных сортов.

Наконец, возникает естественный вопрос — ограничивается ли число сортов нейтрино тремя (соответствующим электрону, мюону и тау-лептону). В. Ф. Шварцман (СССР, 1969 год) показал, что слишком большое число сортов нейтрино изменило бы результаты нуклеосинтеза, так что космология позволяет высказать суждение о частицах, еще не открытых в лаборатории, позволяет бороться с демографическим взрывом среди частиц. Эти соображения уточняли американские астрофизики. Сейчас считается, что число сортов нейтрино не превышает 4–6.

ДОПОЛНЕНИЕ 8. НАЧАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

В настоящее время Вселенная с хорошей точностью однородна в большом масштабе. Но определенные отклонения от однородности в масштабе, соответствующем скоплениям галактик, т. е. порядка 10–100 мегапарсек, несомненно имели место, иначе не могла бы возникнуть наблюдаемая структура Вселенной.

Амплитуду этих возмущений в начальном состоянии при большом сжатии можно характеризовать безразмерной величиной — локальным отклонением метрики пространства от метрики однородного пространства. На классическом языке можно говорить о возмущении ньютонового гравитационно-

го потенциала, причем за единицу принят квадрат скорости света. Раньше предполагалось, что безразмерное возмущение имеет порядок 10^{-3} . Если у нейтрино масса покоя около 10 эВ, то для образования структуры Вселенной достаточно, чтобы начальные возмущения были порядка 10^{-5} в безразмерных единицах.

При этом астрономические наблюдения дают сведения о возмущениях в указанном выше большом масштабе и на начальном этапе эволюции; отдельные галактики, облака газа и звезды в галактиках появились позже! Они возникли при дроблении возмущений плотности большого масштаба и не характеризуют начальные малые возмущения метрики.

Наиболее вероятной представляется картина, в которой возмущения во всех масштабах имеют одинаковый порядок величины (около 10^{-5} в безразмерных единицах). Начальные возмущения определенного масштаба, порядка 10–100 мегапарсек, оказываются при этом единственно важными для сегодняшней картины Вселенной в силу физических законов развития возмущений во время эволюции от начального до сегодняшнего состояния.

В принципе, однако, эти же законы не исключают возможности больших отклонений от однородности в малом масштабе, например в масштабе, который сегодня равен одному парсеку, или $3 \cdot 10^{18}$ см. В ходе расширения длина волны возмущения также растет; эта длина волны была меньше $3 \cdot 10^{15}$ см в момент рекомбинации (температура 3000 К), $3 \cdot 10^{12}$ см в момент, когда температура равнялась $3 \cdot 10^6$ К, и т. д. В частности, при красном смещении $z = 10^{11}$, температуре порядка $3 \cdot 10^{11}$ К и плотности $5 \cdot 10^{11}$ г/см³ в момент $t = 10^{-3}$ с длина волны такого возмущения имела порядок $3 \cdot 10^7$ см, т. е. примерно равнялась произведению скорости света на время, истекшее с момента начала расширения. В период между $t = 10^{-3}$ с и моментом рекомбинации возмущение плотности с такой длиной волны превратится в акустическую волну, которая вскоре затухает под действием вязкости, не оставляя следа ни в распределении вещества, ни в спектре излучения. Точно так же сгладятся и возмущения в распределении нейтрино и вещества. Таков вывод, который можно сделать из

теории возмущений малой амплитуды, наложенных на фридмановское решение.

Однако, если амплитуда возмущения велика, то возможен и другой вариант развития событий. Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков (1967 год) отметили, что большой избыток плотности в какой-то области может остановить расширение. В этой области оно сменится сжатием и образуется черная дыра, которая уже не выпустит находящиеся внутри нее вещество и излучение. Получающееся тело было названо первичной черной дырой в отличие от тех черных дыр, которые образуются в настоящее время или образовались в недалеком прошлом в результате эволюции звезд или звездных скоплений.

Так как и в книге, и в наших дополнениях уже употреблялся термин «черная дыра», скажем несколько слов о том, что это такое. Основной идеей общей теории относительности является связь между полем тяготения и геометрией пространства-времени. Вблизи массивного тела кривизна пространства, характеризующая отличие его свойств от свойств евклидова пространства, становится более заметной, чем вдали от него. Если данную массу тела M сосредоточить в объеме с линейным размером меньше некоторого критического размера, называемого гравитационным радиусом тела, то искривление пространства, вызванное гравитационным полем тела, будет настолько велико, что ни один луч света и ни одна материальная частица не смогут вырваться за пределы тела на расстояние, большее гравитационного радиуса. На языке ньютоновой теории можно сказать, что вторая космическая скорость, т. е. начальная скорость, необходимая для ухода частицы с поверхности тела, может стать равной скорости света. Именно в такой форме существование черных дыр предсказал Лаплас 200 лет тому назад.

Конечно, предсказания Лапласа были только гениальной догадкой. При скорости, близкой к скорости света, меняются законы механики (специальная теория относительности), при большом потенциале тяготения меняются сами законы тяготения (общая теория относительности). Однако, как это ни удивительно, эти изменения компенсируют друг друга и связь

массы и радиуса, при которой свет не покидает тело, дается ньютоновой формулой:

$$GM/R_g = c^2/2$$

(потенциальная энергия тела единичной массы на поверхности массивного тела массы M приравнена кинетической энергии тела единичной массы, скорость которого равна скорости света).

Гравитационный радиус $R_g = 2GM/c^2$ пропорционален массе тела M ; например, для Солнца он равен 2,94 км, а для Земли 0,88 см. Подобный объект и называется черной дырой.

Из сказанного выше ясно, что внешний наблюдатель не может получить от черной дыры никакого сигнала, она как бы исчезает из пространства. Это не означает, что невозможно определить наличие черной дыры в каком-то месте пространства. Межзвездный газ, окружающий черную дыру, может втягиваться в нее силами тяготения; при этом газ, падая на дыру, ускоряется, разогревается и начинает излучать. Сильное излучение можно ожидать в том случае, если черная дыра образует двойную систему с обычной звездой. В таком случае обычная звезда поставляет тот газ, который попадает затем в поле тяготения черной дыры.

В настоящее время во всех деталях изучены аналогичные системы, состоящие из нейтронной звезды и обычной звезды. Такие системы являются источниками рентгеновского излучения. Однако в одном случае есть основания считать, что мы имеем дело именно с черной дырой, а не с нейтронной звездой. Речь идет о рентгеновском источнике в созвездии Лебедя («Лебедь X-1»). Анализ движения обычной звезды, находящейся рядом с рентгеновским источником, приводит к выводу, что масса рентгеновского источника около 10 солнечных масс. Нейтронная звезда не может быть такой тяжелой. Есть и другие аргументы в пользу того, что в источнике Лебедь X-1 находится тяжелая черная дыра.

При этом предполагается, что весьма массивная черная дыра образовалась в ходе эволюции и сжатия из обычной звезды с массой около 30 солнечных масс или больше. Такие звезды (с массами до 100 масс Солнца) в небольшом числе на-

блюдаются в нашей Галактике. Широко распространено предположение, что в ядрах галактик и в особо ярких источниках излучения — квазарах — также находятся гигантские черные дыры. Падение вещества в гравитационном поле этих черных дыр является источником энергии. Такие черные дыры также возникли сперва из звезд, а затем увеличили свою массу захватом окружающего вещества.

Вернемся теперь к вопросу о первичных черных дырах. Такие первичные черные дыры до сих пор не наблюдались. Предположительно, первичная черная дыра образуется в тот момент, когда размер возмущенной области порядка произведения скорости света на время, прошедшее с начала расширения. Она образуется в том случае, если локальная масса в несколько раз больше средней. Ожидаемая масса черной дыры в примере, приведенном выше, равна $\rho(ct)^3 = 5 \cdot 10^{11} (3 \cdot 10^7)^3 = 10^{33}$ г, т. е. порядка массы Солнца. Но масса первичной черной дыры может быть и гораздо меньше, если размер возмущения меньше и первичная черная дыра образуется раньше. В этом и заключается главное отличие предполагаемых первичных черных дыр от «вторичных», звездных: звезда малой массы вообще не превращается в черную дыру, она в конце эволюции превращается в карлик или пульсар. Масса звездной черной дыры не может быть меньше $(4 - 6) \cdot 10^{33}$ г (меньше двух-трех масс Солнца). Масса первичной черной дыры может быть любой малой величиной, например 10^{20} г, или 10^6 г (1 тонна), или 1 г, если образование черной дыры происходит соответственно в момент 10^{-18} с, или 10^{-32} с, или 10^{-38} с от начала расширения. Чем раньше образуется первичная черная дыра, тем больше плотность вещества.

В действительности, как уже сказано, ни одна первичная черная дыра не наблюдается. Значит, количество их во всяком случае невелико. Отсюда можно сделать вывод, что нет сильных возмущений, способных вызвать образование черных дыр, притом даже в малых масштабах.

В 1974 году английский теоретик Хокинг доказал, что черные дыры «испаряются», испуская частицы, энергия которых обратно пропорциональна массе черной дыры. Время полного испарения равно приблизительно $10^{-28} \cdot M^3$ с, где M —

начальная масса черной дыры в граммах. Таким образом, к настоящему времени могли бы уцелеть только сравнительно тяжелые черные дыры с массой больше 10^{15} г (так как время жизни Вселенной $\sim 10^{17}$ с). Соображения Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова о том, что первичные черные дыры практически отсутствуют, остаются справедливыми только для этих тяжелых черных дыр. Однако черные дыры с массой в интервале значений $10^9 < M < 10^{15}$ г, испаряясь, давали бы рентгеновские кванты и меняли бы спектр микроволнового излучения. Наблюдения показывают, что и такие черные дыры не рождались. Таким образом, могли рождаться, а затем испаряться лишь черные дыры с массой меньше 10^9 г. Их гравитационный радиус меньше 10^{-19} см, они могли бы рождаться лишь при плотности вещества больше 10^{67} г/см³.

Таким образом, удастся сделать вывод, что даже на очень ранних стадиях Вселенная была более или менее однородна, не было сильных (по амплитуде) коротковолновых возмущений, которые могли бы рождать первичные черные дыры. Косвенно получается дополнительное подтверждение предположения о малости безразмерных возмущений во всех масштабах. Удастся заглянуть в прошлое Вселенной еще глубже, чем это было возможно несколько лет назад.

ДОПОЛНЕНИЕ 9. К ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ ФОНА МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СОЗДАНИЯ ТЕОРИИ ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

В создании современной космологии огромную роль сыграл Георгий Гамов. Он первый высказал идею, что Вселенная была горячей (1948 год) и дал оценку сегодняшней температуры 6 К (1956 год), несильно отличающуюся от истинного значения около 3 К. Отдавая должное интуиции Гамова, интересно проследить тот сложный и противоречивый путь, по которому шло развитие науки.

В конце 40-х годов считали, что постоянная Хаббла равна приблизительно 200 км/с на мегапарсек. Заметим, что пер-

воначальное число самого Хаббла было 560 км/с на мегапарсек. Соответствующий возраст Вселенной был несуразно мал: 1–2 миллиарда лет. На эту трудность обращал внимание Альберт Эйнштейн. Значение 200 км/с на мегапарсек, принятое в конце 40-х годов, дающее возраст Вселенной до 5 миллиардов лет, буквально не противоречило геологическим данным о возрасте Земли (4,5 миллиарда лет). Однако близость возраста Земли и Солнца и возраста всей Вселенной естественно вела к мысли, что все химические элементы, из которых состоит Земля и которые мы находим на Солнце, имеют первичное, космологическое, происхождение.

Вайнберг отмечает, что предполагалось наличие первичных нейтронов в горячем и плотном веществе. Более того, предполагалось, что первоначально все вещество состояло только из нейтронов и затем, в ходе расширения и охлаждения, превращалось в ту смесь элементов и изотопов, которую мы наблюдаем в нашей Галактике. Казалось естественным, что легкие элементы, образующиеся с выделением энергии (от водорода до железа), как-то образуются при распаде нейтронов, соединении нейтронов и протонов и в термоядерных реакциях. Тяжелые элементы при этом образовывались бы путем последовательного захвата нейтронов. Для того чтобы полностью не сгорели элементы с большим сечением захвата медленных нейтронов (бор, кадмий и другие), приходилось предполагать, что нейтроны горячие, и отсюда следовала оценка температуры излучения.

Цепь аргументов содержит много слабых мест: 1) отмеченное Хаяши быстрое превращение нейтронов в протоны и обратно при высокой температуре, раньше, чем в момент $t = 1$ с, исключает начальное нейтронное состояние; 2) невозможность получения элементов тяжелее $A = 5$ (и второй барьер при $A = 8$) при последовательном присоединении нейтронов, а также малая плотность барионов исключают получение элементов тяжелее ${}^4\text{He}$ в сколько-нибудь заметных количествах.

Следовательно, аргументы Гамова, приведшие к предсказанию $T = 6$ К, неверны, а само предсказание, тем не менее, очень близко к истине!

В настоящее время мы уверены, что элементы тяжелее ${}^4\text{He}$ (и, может быть, следов лития) образуются в звездах. Солнце — это звезда второго поколения, образовавшаяся из газа, побывавшего ранее в составе звезды первого поколения и выброшенного при взрыве этой звезды. Современный возраст Вселенной (10–18 миллиардов лет) вполне согласуется с этими представлениями.

Несмотря на все эти недостатки, именно концепция Гамова и его энтузиазм привлекли внимание теоретиков к физической космологии и инициировали те последующие работы, теоретические и экспериментальные, которые завершились созданием современной картины происхождения Вселенной.

Любопытную деталь сообщает советский академик Б. М. Понтекорво, начинавший путь в физике учеником Энрико Ферми. Первые правильные расчеты ядерных реакций были сделаны Ферми и Туркевичем в конце 40-х годов. Однако эта работа никогда не была опубликована. Альфер и Херман тоже приводят лишь результаты расчетов Ферми и Туркевича. Причина заключается в том, что сечение реакции трития с дейтерием было в то время классифицированным, т. е. секретным. Только знаменитое выступление И. В. Курчатова в английском атомном центре в Харуэлле (1956 год) сорвало железный занавес секретности с работ по термоядерному синтезу.

Обратимся к советским работам начала 60-х годов. Автору дополнения было ясно, что горячая модель Вселенной приводит к 25–30-процентной распространенности ${}^4\text{He}$ в первичном газе. Ядро ${}^4\text{He}$ чрезвычайно прочное. Поэтому как догма был принят тезис, что если где-либо найден газ с содержанием ${}^4\text{He}$, меньшим 25%, то теория горячей Вселенной неправильна. В то время были и работы, в которых утверждалось, что содержание гелия в некоторых объектах порядка 10% или меньше.

К началу 60-х годов были выполнены теоретические работы по эволюции чисто водородных звезд, с неплохим совпадением вычисленных и наблюдаемых свойств звезд. Поэтому была поставлена и решена задача — нельзя ли построить космологическую модель, приводящую к Вселенной, состоящей

вначале из чистого водорода? Оказалось, что холодная модель с определенным количеством нейтрино (равным числу электронов), но без антинейтрино, удовлетворяет этому условию (1962 год). Вместе с тем было ясно, что выбор между горячей и холодной моделями зависит также от измерения теплового излучения.

По предложению автора дополнения в работе А. Г. Дорошкевича и И. Д. Новикова (1964 год) был рассмотрен совокупный спектр радиоизлучения и видимого света звезд. С этим спектром сравнивалось планковское равновесное излучение различной температуры. Была построена характерная двугорбая кривая. Даже при планковской температуре 1 К, когда полная энергия микроволнового излучения меньше энергии света звезд, существует область длин волн, в которой планковское излучение доминирует. Было отмечено, что измерения именно в этой области спектра позволяют однозначно сделать выбор между горячей и холодной моделями.

Однако опубликованная в «Докладах Академии наук СССР» заметка А. Г. Дорошкевича и И. Д. Новикова стала известной только малому числу советских радиоастрономов, и лишь значительно позже, после работ Пензиаса и Вилсона (отмеченных в 1978 году Нобелевской премией по физике) и теоретической работы Дикке, Пиблза, Парtridge и Уилкинсона, зарубежные радиоастрономы нашли заметку Дорошкевича и Новикова и — в лице Пензиаса — отдали ей должное.

ДОПОЛНЕНИЕ 10. О ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ ПРИ СВЕРХВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Как правильно отмечено Вайнбергом, основная идея, что при высокой температуре мир находится в максимально симметричном состоянии, принадлежит Д. А. Киржницу и А. Д. Линде. При охлаждении происходит фазовый переход в современное несимметричное состояние.

В теории фазовых переходов и доменов (областей с различными свойствами, возникающих после фазового перехода

в ранней Вселенной) в настоящее время есть значительный произвол, и поэтому можно представить себе различные варианты.

В одном варианте возникают домены двух типов, которые условно назовем $+$ и $-$. В этих доменах некоторые тонкие эффекты имеют разный знак. Физики, живущие в разных доменах и обменивающиеся информацией, могли бы это обнаружить. Важнее, однако, тот факт, отмеченный Я. Б. Зельдовичем, И. Ю. Кобzareвым и Л. Б. Окунем (1974 год), что домены $+$ и $-$ разделены тяжелой стенкой. Оценки ее массы дают значение около 1 кг на квадратный сантиметр. Такие стенки создали бы грандиозные возмущения в распределении галактик и в микроволновом излучении. Можно с уверенностью сказать, что таких стенок нет, а следовательно, нужно обратиться к другому варианту теории.

Действительно, существуют теории, согласно которым после понижения температуры физические условия и законы во всем пространстве становятся одинаковыми, но иными по сравнению с условиями при высокой температуре. При этом есть такие разновидности теории, которые предсказывают образование тяжелых изолированных нитей. Возникает вопрос, нельзя ли начало Вселенной до перехода представить в виде идеального однородного мира. Образование нитей при охлаждении могло бы дать возмущения, необходимые для образования современной структуры.

Наконец, возможны и такие теории, в которых фазовый переход из горячего в холодное состояние почти не оставляет заметных следов. В таком случае мы возвращаемся к предположению об изначально возмущенной Вселенной (см. дополнение редактора 11 о гравитационных волнах).

Наличие различных возможностей указывает на недостаточный уровень наших знаний в настоящее время. Принципиально важно, что в ряде случаев космология становится арбитром в выборе между теориями явлений в микромире — в том выборе, который бы должен был быть сделан путем опытов на ускорителях, но для которого мощность ускорителей еще долго будет недостаточной.

ДОПОЛНЕНИЕ 11. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

Вайнберг пишет о гравитационных волнах, которые находились в термодинамическом равновесии при сверхвысокой температуре, а в настоящее время имеют температуру около 1 К. Их типичная длина волны около 1 см, а частота 30 миллиардов герц (колебаний в секунду).

Однако можно предполагать, что существуют также чрезвычайно длинные гравитационные волны другого происхождения.

Теория Фридмана несомненно является лишь хорошим приближением к действительности. Существование структуры — галактик и скоплений галактик — свидетельствует о том, что в начальном состоянии были определенные возмущения плотности и возмущения метрики пространства. В этом случае естественно предположить, что возмущения разного типа (и в том числе те, которые превращаются в гравитационные волны) имели примерно одинаковую амплитуду. Эту гипотезу «равнораспределения» выдвинули в 1968 году Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков.

Общая плотность порожденного таким образом гравитационного излучения меньше плотности теплового гравитационного излучения, но именно в области сверхдлинных волн от парсеков до мегапарсеков гравитационные волны, связанные с начальными возмущениями, неизмеримо сильнее тепловых. Обнаружение сверхдлинных волн принципиально не исключено. Интересные соображения о квантовом рождении гравитационных волн высказывают советские теоретики Л. И. Гришук и А. А. Старобинский.

ДОПОЛНЕНИЕ 12. ДАЛЕКОЕ БУДУЩЕЕ ОТКРЫТОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Вайнберг говорит о превращении горячих звезд в карликовые звезды, или нейтронные звезды, или черные дыры — в зависимости от начальной массы звезды и особенностей ее

эволюции. Эти процессы происходят за время, сравнимое с сегодняшним возрастом Вселенной (10–18 миллиардов лет).

Предположим, что Вселенная открытая или плоская, т. е. суммарная плотность всех видов вещества (излучения, нейтрино и «обычной» материи — барионов) меньше или равна критической. Такая Вселенная как целое неограниченно расширяется.

Известный теоретик Ф. Дайсон поставил вопрос об очень отдаленном будущем такой Вселенной. При этом он учитывал явление квантового испарения черных дыр, масса которых полностью превращается в излучение за время 10^{62} лет для $M = M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ — масса Солнца). Это время пропорционально кубу массы (см. дополнение редактора 8).

Относительно карликов и нейтронных звезд Дайсон замечает, что квантовомеханическим подбарьерным механизмом они также превращаются в черные дыры (за еще большее время) и затем испаряются.

Таким образом, конечная судьба открытой Вселенной — неограниченное расширение совокупности фотонов и нейтрино и исчезновение всякой структуры и организации.

По замечанию Я. Б. Зельдовича и Р. А. Сюняева, нестабильность протонов, т. е. несохранение барионного числа (см. дополнение редактора 6), резко ускорит исчезновение карликов и нейтронных звезд: вместо 10^{70} лет у Дайсона время исчезновения окажется всего в несколько раз больше времени распада протона, по современной оценке 10^{33} лет. Любопытно, что нейтронные звезды на определенном этапе распада будут взрываться.

Конечный вывод о мире, в котором останутся лишь фотоны и нейтрино, почти не меняется — небольшое количество избежавших аннигиляции электронов и позитронов не делает картину далекого будущего более привлекательной.

Возможно, однако, что суммарная плотность вещества Вселенной превышает критическую (в частности, за счет массивных нейтрино?). Тогда Вселенная замкнута и через время порядка $5 \cdot 10^{10}$ – 10^{11} лет предстоит общее сжатие Вселенной. Теоретическое исследование этого процесса еще не продвинулось достаточно далеко.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЧТЕНИЯ

А. КОСМОЛОГИЯ И ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Нижеследующие руководства дают введение в различные разделы космологии и те части общей теории относительности, которые относятся к космологии, на уровне, в целом более техническом, чем использованный в данной книге.

Bondi H. *Cosmology*. England, Cambridge. Cambridge University Press, 1960.

Бонди Г. *Космология*. В настоящее время несколько устарела, но содержит интересные обсуждения Космологического Принципа, космологии стационарного состояния, парадокса Ольберса и т. п. Очень легко читается.

Eddington A. S. *The Mathematical Theory of Relativity*. 2nd ed. England, Cambridge. Cambridge University Press, 1924.

Рус. пер.: Эддингтон А. С. *Математическая теория относительности*. М., Гос. науч.-техн. изд-во, 1933.

В течение многих лет ведущая книга по общей теории относительности. С исторической точки зрения интересно раннее обсуждение красных смещений, модели де Ситтера и т. п.

Einstein A. e. a. *The Principle of Relativity*, London, Methuen and Co., Ltd., 1923; reprinted by Dover Publ., Inc., N. Y.

Рус. пер. в книгах: Эйнштейн А. *Собрание научных трудов*. Т. I. М., Наука, 1965, с. 452; *Принцип относительности. Сб. статей*. М., Атомиздат, 1973; *Альберт Эйнштейн и теория гравитации*. Сб. статей. М., Мир, 1979.

Бесценные перепечатки оригинальных статей по частной и общей теории относительности Эйнштейна, Минковского,

Вейля, в переводе на английский. Включает перепечатку статьи Эйнштейна 1917 года, посвященной космологии.

Field G. B., Arp H., Bahcall J. N. *The Redshift Controversy*. Reading, Mass., W. A. Benjamin, Inc., 1973.

Филд Г. Б., Арп Г. и Бакалл Дж. Н. *Спор о красном смещении*. Интересная дискуссия об интерпретации красных смещений в терминах космологического разбегания, кроме того, полезные перепечатки оригинальных работ.

Hawking S. W., Ellis G. F. R. *The Large Scale Structure of Space-Time*. England, Cambridge, Cambridge University Press, 1973.

Рус. пер.: Хокинг С., Эллис Г. *Крупномасштабная структура пространства-времени*. М., Мир, 1977.

Строгое математическое рассмотрение проблемы сингулярностей в космологии и гравитационного коллапса.

Hoyle Fred. *Astronomy and Cosmology — A Modern Course*. San Francisco, W. H. Freeman & Co., 1975.

Хойл Фред. *Астрономия и космология — современный курс*. Элементарный учебник астрономии с большим, чем обычно, акцентом на космологию. Использует очень мало математики.

Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A. *Gravitation*. San Francisco, W. H. Freeman and Co., 1973.

Рус. пер.: Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. *Гравитация*. Т. 1–3. М., Мир, 1977.

Современное исчерпывающее введение в общую теорию относительности, написанное тремя ведущими специалистами. Обсуждается также и космология.

O'Hanian Hans C. *Gravitation and Space-Time*. N. Y., Norton and Company, 1976.

О'Ханьян Г. *Гравитация и пространство-время*. Учебник по теории относительности для младшекурсников.

Peebles P. J. E. *Physical Cosmology*. Princeton, Princeton University Press, 1971.

Рус. пер.: Пиблс П. *Физическая космология*. М., Мир, 1975.

Авторитетное общее введение в предмет с сильным упором на данные наблюдений.

Sciama D. W. *Modern Cosmology*. Englang, Cambridge, Cambridge University Press, 1971.

Рус. пер.: Шама Д. *Современная космология*. М., Мир, 1973.

Очень легко читаемое широкое введение в космологию и другие разделы астрофизики. Написано на уровне, «доступном читателям лишь с очень скромными знаниями математики и физики», с количеством уравнений, сведенным до минимума.

Segal I. E. *Mathematical Cosmology and Extragalactic Astronomy*. N. Y., Academic Press, 1976.

Сегал И. *Математическая космология и внегалактическая астрономия*. В качестве примера неортодоксального, но побуждающего к размышлениям взгляда на современную космологию.

Tolman R. C. *Relativity, Thermodynamics abd Cosmology*. Oxford, Clarendon Press, 1934.

Рус. пер.: Толмен Р. *Относительность, термодинамика и космология*. М., Наука, 1974.

В течение многих лет стандартное руководство по космологии.

Weinberg Steven. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. N. Y., John Wiley and Sons, Inc., 1972.

Рус. пер.: Вейнберг С. *Гравитация и космология*. М., Мир, 1975.

Обширное введение в общую теорию относительности. Около трети книги посвящено космологии. Скромность не позволяет делать дальнейшие комментарии.

Б. ИСТОРИЯ СОВРЕМЕННОЙ КОСМОЛОГИИ

Нижеследующие книги включают как первоисточники, так и вторичные источники по истории современной космо-

гии. В большинстве этих книг используется мало математики, но в ряде из них предполагается некоторая степень знакомства с физикой и астрономией.

Baade W. *Evolution of Stars and Galaxies*. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1968.

Бааде В. *Эволюция звезд и галактик*. Лекции, прочитанные Бааде в 1958 году и изданные с магнитофонных записей К. Пейном – Гапошкиным. Весьма субъективная оценка развития астрономии в нашем веке, содержащая рассказ об эволюции шкалы внегалактических расстояний.

Dickson F. P. *The Bowl of Night. Cosmology from Phales to Gamow*. Cambridge, Mass., M. I. T. Press, 1968.

Диксон Ф. *Чаша ночи. Космология от Фалеса до Гамова*. Содержит факсимиле оригинальных работ де Шезо и Ольберса о темноте ночного неба.

Gamow George. *The Creation of the Universe*. N. Y., Viking Press, 1952.

Гамов Георгий. *Рождение Вселенной*. Не очень современная книга, но ценная как подтверждение точки зрения Гамова в 50-е годы. Написана для широкой публики с обычным для Гамова обаянием.

Hubble E. *The Realm of the Nebulae*. New Haven, Yale University Press, 1936; reprinted by Dover Publications, Inc., N. Y., 1969.

Хаббл Э. *Сфера туманностей*. Классический доклад Хаббла об астрономическом изучении галактик, включая открытие связи между красным смещением и расстоянием. Первоначально был прочитан как Силлимановская лекция 1935 года в Йеле.

Jones Kenneth Glyn. *Messier Nebulae and Star Clusters*. N. Y., American — Elsevier Publishing Co., 1969.

Джонс К. *Туманности и звездные скопления Мессье*. Исторические замечания по поводу каталога Мессье и наблюдений содержащихся в нем объектов.

Kant Immanuel. *Universal Natural History and Theory of the Heavens*. Translated by W. Hasties Ann Arbor, University of Michigan Press, 1969.

Рус. пер.: Кант И. *Универсальная естественная история и теория неба*. Соч., т. I. М., Мысль, 1963.

Знаменитая работа Канта, в которой дана интерпретация туманностей как галактик, похожих на нашу. В книге имеются также полезное предисловие М. К. Мюница и оценка Канта теории Млечного Пути Томаса Райта.

Koyré Alexandre. *From the Closed World to the Infinite Universe*. Baltimore, Johns Hopkins Press, 1957; reprinted by Harper and Row, N. Y., 1957.

Койре А. *От закрытого мира к бесконечной Вселенной*. Космология от Николая Кузанского до Ньютона. Содержит интересную оценку переписки Ньютона с Бентли, касающуюся абсолютного пространства и происхождения звезд, а также полезные выдержки.

North J. D. *The Measure of the Universe*. Oxsford, Clarendon Press, 1965.

Норт Дж. *Масштаб Вселенной*. Космология от девятнадцатого века до 40-х годов двадцатого. Очень детальный отчет о зарождении релятивистской космологии.

Reines F., ed. *Cosmology, Fusion, and Other Matters: George Gamow Memorial Volume*. Colorado Associated University Press, 1972.

Космология, синтез и другие проблемы. Сборник в честь Г. Гамова. Под ред. Ф. Райнеса. Весьма ценный, идущий из первых рук, доклад Пензиаса об открытии микроволнового фона и статья Альфера и Хермана о развитии теории нуклеосинтеза в модели «большого взрыва».

Schlipp P. A., ed. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Library of Living Philosophers, Inc., 1951; reprinted by Harper and Row, N. Y., 1959.

Альберт Эйнштейн — философ-ученый. Под ред. П. Шлиппа. Т. 2 содержит статьи Леметра о введении Эйнштейном

«космологической постоянной» и Инфельда о релятивистской космологии.

Shapley H., ed. *Source Book in Astronomy 1900–1950*. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1960.

Шепли Г. *Книга источников по астрономии за 1900–1950 гг.* Перепечатки оригинальных статей по космологии и другим разделам астрономии, к сожалению, многие в сокращенном виде.

В. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

До сих пор нет книг, в которых бы на нематематическом уровне обсуждалось большинство недавних достижений в физике элементарных частиц, о которых шла речь в главе VII. Следующая статья может служить чем-то вроде введения:

Weinberg Steven. *Unified Theories of Elementary Particle Interactions*. — *Scientific American*, July 1974, p. 50–59.

Вайнберг С. Единые теории взаимодействий элементарных частиц.

Более обширное введение в физику элементарных частиц, которое вскоре должно выйти из печати:

Feinberg G. *What is the World Made of? The Achievements of Twentieth Century Physics*. Garden City. Anchor Press/Doubleday, 1977.

Рус. пер.: Фейнберг Г. *Из чего сделан мир? Достижения физики XX века*. М., Мир, 1981.

Введение, написанное для специалистов, со ссылками на оригинальную литературу, — см. любую из книг:

Taylor J. C. *Gauge Theories of Weak Interactions*. England, Cambridge, Cambridge University Press, 1976.

Рус. пер.: Тейлор Дж. *Калибровочные теории слабых взаимодействий*. М., Мир, 1978.

Weinberg S. *Recent Progress in Gauge Theories of the Weak, Electromagnetic and Strong Interactions*. — *Rev. Mod. Phys.*, 1974, v. 46, p. 255–277.

Рус. пер.: Вейнберг С. *Недавние достижения в калибровочных теориях слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий*. — Успехи физ. наук, 1976, т. 118, с. 505.

Г. РАЗНОЕ

Allen C. W. *Astrophysical Quantities*. 3rd ed. London, The Athlone Press, 1973.

Рус. пер.: Аллен К. У. *Астрофизические величины*. М., Мир, 1977.

Настольное собрание астрофизических данных и формул.

Sandage A. *The Hubble Atlas of Galaxies*. Washington, D. C., Carnegie Institute of Washington, 1961.

Сендейдж А. Хаббловский атлас галактик. Большое число великолепных фотографий галактик, собранных для иллюстрации хаббловской схемы классификации.

Sturleson Snorri. *The Yonger Edda*. Translated by R. E. Anderson. Chicago, Scott, Foresman and Co., 1901.

Рус. пер.: *Младшая Эдда*. Сер. Литературные памятники. Л., Наука, 1970.

Для знакомства с другим взглядом на начало и конец Вселенной.

ЛИТЕРАТУРА, РЕКОМЕНДУЕМАЯ РЕДАКТОРОМ ПЕРЕВОДА

Фридман А. А. *Избранные труды*. М., Наука, 1966.

Читатель может познакомиться в этой книге с работами Фридмана, заложившими основу современной космологии, а также с написанной для широкой публики книгой «Мир как пространство и время», впервые изданной в 1923 году.

Зельдович Я. Б. *Горячая Вселенная*. — Успехи физ. наук, 1975, т. 115, с. 169.

Обзор теории горячей Вселенной, в котором освещено состояние вопроса на 1975 год.

Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. *Строение и эволюция Вселенной*. М., Наука, 1975.

Фундаментальная работа, посвященная подробному изложению классических основ и новейших проблем космологии. Содержит обширный список литературы по космологии.

Сопоставление теории и наблюдений в космологии. Материалы симпозиума 1973 г. в Кракове. М., Мир, 1978.

Содержатся последние данные о связи теории и наблюдений в космологии.

Энциклопедия космоса. М., Сов. энциклопедия, 1976.

Среди прочего содержит ясно и доступно написанные статьи по космологии.

Долгов А. Д., Зельдович Я. Б. *Космология и элементарные частицы*. — Успехи физ. наук, 1980, т. 130, вып. 4, с. 559.

Зельдович Я. Б. *Теория вакуума, быть может, решает загадку космологии*. — Успехи физ. наук, 1981, т. 133, вып. 3, с. 479.

Окунь Л. Б. *Лептоны и кварки*. М., Наука, 1981.

Прекрасное изложение современной теории частиц и полей для подготовленного читателя.

Крупномасштабная структура Вселенной. Материалы симпозиума 1977 г. в Таллине. М., Мир, 1981.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИДЕЙНЫЕ ОСНОВЫ ЕДИНОЙ ТЕОРИИ СЛАБЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ*

Нобелевская лекция по физике, 8 декабря 1979 года

Задача физика — выработать простой взгляд на явления природы, объяснить огромное количество сложных процессов с единой точки зрения на основе нескольких простых принципов. Временами наши усилия вознаграждаются результатами прекрасных экспериментов такими, например, как открытие нейтральных токов в нейтринных реакциях. Но даже в «смутное время» между блестящими «прорывами» на экспериментальном фронте идет непрерывная эволюция теоретических идей, которая постоянно меняет сложившиеся ранее представления. В этой лекции я хочу обсудить развитие двух направлений исследований в теоретической физике. Одно из них связано с медленным прогрессом в нашем понимании симметрии и, в частности, нарушенной, или скрытой, симметрии. Другое определяется давней борьбой с бесконечностями в квантовых теориях поля. Кратко я опишу и то, как сближение этих направлений исследований привело к моему участию в работе по объединению слабых и электромагнитных взаимодействий. В основной своей части моя лекция будет посвящена моему постепенному образованию в этих направлениях, потому что именно об этом я могу говорить с достаточной уверенностью.

*Weinberg Steven. Conceptual Foundation of the Unified Theory of Weak and Electromagnetic Interactions: Nobel Lecture. December 8, 1979. — Перевод И. М. Дремина.

Я также попытаюсь заглянуть вперед и показать ту роль, которую могла бы сыграть в физике будущего разработка этих идей, хотя здесь моя уверенность заметно поубавится.

В физике XX века принципы симметрии появились в 1905 г., вместе с эйнштейновским пониманием группы инвариантности пространства-времени. После этого прецедента симметрии заняли в умах физиков место априорных принципов, с универсальной справедливостью выражающих простоту природы на самом ее глубоком уровне. Именно поэтому в 30-х годах оказалось до боли трудным воспринять наличие внутренних симметрий, таких, как сохранение изоспина [1], которые не имели никакого отношения к обычному пространству и времени. Эти симметрии отнюдь не были самоочевидны и при этом оказались связанными только с тем, что сейчас называется сильными взаимодействиями. В 50-е годы мы стали свидетелями открытия другой внутренней симметрии — сохранения странности [2], которой не подчиняются слабые взаимодействия. Было обнаружено, что даже одна из, вероятно, наиболее сокровенных симметрий пространства-времени, — четность, — нарушается при слабых взаимодействиях [3]. Вместо движения к единству физикам пришлось учиться тому, что разные взаимодействия, очевидно, управляются совершенно различными симметриями. Состояние дел стало еще более удручающим в начале 60-х годов с признанием роли новой группы симметрии — «восьмеричного пути», которая не является точной симметрией даже в сильных взаимодействиях [4].

Все это — «глобальные» симметрии, в которых преобразования симметрии не зависят от положения в пространстве и времени. Вместе с тем еще в 20-е годы было понято [5], что квантовая электродинамика обладает другой, намного более мощной симметрией — «локальной» симметрией относительно преобразований, при которых поле электрона приобретает некоторую добавку к фазе, меняющуюся свободно от точки к точке в пространстве и времени, а векторный потенциал электромагнитного поля претерпевает соответствующее калибровочное преобразование. Сейчас это называли бы калибровочной симметрией $U(1)$, потому что простое изменение фазы

можно рассматривать как умножение на унитарную матрицу 1×1 . Расширение на более сложные группы было проведено Янгом и Миллсом [6] в 1954 г. в известной статье, где они показали, как можно построить $SU(2)$ -калибровочную теорию сильных взаимодействий. (Название « $SU(2)$ » означает, что группа преобразований симметрии задается унитарными матрицами 2×2 , которые являются «специальными», поскольку их детерминанты равняются единице.) Но и здесь опять казалось, что если эта симметрия вообще имеет отношение к действительности, то она должна быть лишь приближенной, поскольку калибровочная инвариантность требует (по крайней мере, на наивном уровне), чтобы векторные бозоны, подобно фотону, были безмассовыми, а представлялось очевидным, что переносчиками сильных взаимодействий должны быть массивные частицы. Оставалась нерешенной и старая проблема: если принципы симметрии служат проявлением простоты природы на ее глубочайшем уровне, то каким образом может возникать такое понятие, как приближенная симметрия? Неужели природа только приближенно проста?

Как-то в 1960 г. или в начале 1961 г. я познакомился с идеей, которая вначале появилась в физике твердого тела, а затем была привнесена в физику частиц теми, кто подобно Гейзенбергу, Намбу и Голдстоуну работал в обеих областях физики. Это была идея о «нарушенной симметрии», заключавшаяся в том, что гамильтониан и коммутационные соотношения квантовой теории могут обладать точной симметрией и тем не менее физические состояния могут не отвечать представлениям этой симметрии. В частности, может оказаться, что симметрия гамильтониана не является симметрией вакуума.

Как иногда случается с теоретиками, я «влюбился» в эту идею. Но, как часто бывает в любовных делах, вначале меня смущали возможные последствия. Я думал (как оказалось потом, неверно), что приближенные симметрии — четность, изоспин, странность и восьмеричный путь — действительно, могли бы быть точными априорными принципами симметрии, а наблюдаемые на опыте нарушения этих симметрий могли бы каким-то образом быть привнесены спонтанным нарушением симметрии. Поэтому на меня сильное впечатление произвел

результат, полученный Голдстоуном [7], о том, что (по крайней мере, в одном простейшем случае) спонтанное нарушение непрерывной симметрии, подобной изоспину, обязательно влечет за собой появление безмассовой частицы с нулевым спином, которую сегодня мы назвали бы «голдстоуновским бозоном».

Казалось очевидным, что не может существовать никаких безмассовых частиц такого типа, которые не удалось бы уже обнаружить на опыте.

У меня были длительные обсуждения этой проблемы с Голдстоуном в Медисоне летом 1961 г., а затем с Саламом, когда я был его гостем в Империял-колледж в 1961–1962 гг. Вскоре мы вдвоем смогли показать, что голдстоуновские бозоны действительно должны появляться и в том случае, когда спонтанно нарушаются такие симметрии, как изоспин или странность, и притом их массы остаются равными нулю во всех порядках теории возмущений. Насколько помню, я был столь разочарован этими нулевыми массами, что при написании нашей совместной статьи по этому вопросу [8] я добавил эпиграф к статье, чтобы показать бессмысленность попыток объяснить что-либо в терминах неинвариантного состояния вакуума: это были слова Лира к Корделии: «Из ничего не выйдет ничего. Так объяснись». Конечно, в «Физикл Ревью» защитили пуританскую чистоту физической литературы и не стали печатать цитату. С точки зрения последующего развития идеи о неинвариантном вакууме в теоретической физике это оказалось правильным. На самом деле было исключение из этого правила, указанное вскоре Хиггсом, Кибблом и другими [9]. Они показали, что если нарушенная симметрия является локальной калибровочной симметрией, подобной калибровочной инвариантности в электродинамике, то, хотя голдстоуновские бозоны формально существуют и, в каком-то смысле, реальны, они могут быть устранены калибровочным преобразованием, так что они не появляются в виде настоящих физических частиц. Вместо этого пропавшие голдстоуновские бозоны проявляются как обладающие нулевой спиральностью*

* Проекция спина на направление движения. — *Прим. перев.*

состояния векторных частиц, приобретающих таким образом массу.

Я думаю, что в то время физики, которые прослышали об этом исключительном случае, рассматривали его как чисто методическую возможность. По-видимому, такое отношение было обусловлено новым достижением в теоретической физике, которое, как казалось, внезапно изменило роль голдстоуновских бозонов, превратив их из нежелательных пришельцев в долгожданных друзей.

В 1964 г. Адлер и Вайсбергер [10] независимо друг от друга вывели правила сумм, которые позволяли выразить отношение g_A/g_V аксиально-векторной и векторной констант связи в бета-распаде через полные сечения взаимодействия пионов с нуклонами. Одна из возможностей трактовки этих вычислений (видимо, наиболее обычная в то время) состояла в том, чтобы рассматривать эти правила сумм как аналог давно известных дипольных правил сумм в атомной физике: полный набор адронных состояний подставляется в коммутационные соотношения аксиально-векторных токов. Именно такой подход и зафиксирован названием «алгебра токов» [11]. Но был также другой путь интерпретации правил сумм Адлера–Вайсбергера. Можно было бы предположить, что сильные взаимодействия обладают приближенной симметрией, основанной на группе $SU(2) \times SU(2)$, и что эта симметрия спонтанно нарушена, в результате чего (помимо других следствий) нуклоны приобретают массы. При этом пион отождествляется (приближенно) с голдстоуновским бозоном, обладающим малой, но отличной от нуля массой — эта идея восходит к Намбу [12].

Хотя $SU(2) \times SU(2)$ -симметрия спонтанно нарушена, она все еще обладает значительной предсказательной силой, но ее предсказания выражаются в виде приближенных формул, с помощью которых можно вычислять матричные элементы для пионных реакций при низких энергиях. При таком подходе правила сумм Адлера–Вайсбергера получаются при совместном применении предсказываемых длин рассеяния в пион-нуклонных взаимодействиях и хорошо известных правил сумм [13], которые несколькими годами ранее были вы-

ведены из дисперсионных соотношений для пион-нуклонного рассеяния.

В этих вычислениях, в действительности, используется не только тот факт, что сильные взаимодействия обладают спонтанно нарушенной приближенной $SU(2) \times SU(2)$ -симметрией, но также и то, что токи в этой группе симметрии должны быть отождествлены (с точностью до постоянного множителя) с векторным и аксиально-векторным токами в бета-распаде. (При таком предположении отношение g_A/g_V вписывается в общую картину с помощью соотношения Голдбергера–Треймана [14], которое дает g_A/g_V в терминах константы распада пиона и пион-нуклонной связи.) Итак, в этом соответствии токов с симметрией сильных взаимодействий и физических токов бета-распада скрывался вдохновляющий путь к пониманию глубокой связи между слабыми взаимодействиями и сильными взаимодействиями. Однако в течение почти десятилетия эта взаимосвязь оставалась непонятой.

В 1965–1967 гг. мне доставила большую радость работа по разработке следствий из спонтанного нарушения симметрии для сильных взаимодействий [15].

Именно эта деятельность привела к моей статье 1967 г. об объединении слабых и электромагнитных взаимодействий. Но прежде чем перейти к рассказу о ней, я должен вернуться назад по времени и показать еще одно направление исследований, связанное с проблемой бесконечностей в квантовой теории поля.

Как я полагаю, именно Оппенгеймер и Валлер в 1930 г. [16] впервые заметили независимо друг от друга, что квантовая теория поля в более высоких порядках теории возмущений приводит к ультрафиолетовым расходимостям в результатах для собственных энергий. Профессор Валлер рассказал мне вчера вечером, что когда он сообщил об этом результате Паули, тот не поверил. Должно быть, тогда казалось, что эти бесконечности окажутся катастрофой для квантовой теории поля, которая только что была развита Гейзенбергом и Паули в 1929–1930 гг. И, действительно, эти бесконечности привели к некоторому разочарованию в квантовой теории поля, о чем свидетельствуют предпринятые в 30-е годы и в начале 40-х го-

дов многочисленные попытки поиска альтернатив. Проблема была решена (по крайней мере, для квантовой электродинамики) после войны Фейнманом, Швингером и Томонагой [17]. Было показано, что все бесконечности исчезают, если наблюдаемым конечным значениям массы и заряда электрона сопоставить не те параметры m и e , которые появляются в лагранжиане, а те значения массы и заряда электрона, которые *вычисляются* из m и e , после того как мы примем во внимание тот факт, что электрон и фотон всегда окружены облаками виртуальных фотонов и электрон-позитронных пар [18]. Мгновенно все вычисления удалось провести и получить результаты, прекрасно согласующиеся с экспериментом.

Однако даже после этого успеха оставалось определенное различие в мнениях по поводу важности ультрафиолетовых расходимостей в квантовой теории поля. Многие считали — а некоторые считают и до сих пор, — что проделанная работа позволила лишь спрятать реальные проблемы «под ковер». Вскоре стало ясно, что существует весьма ограниченный класс так называемых «перенормируемых» теорий, в которых бесконечности могут быть устранены путем изменения определений, т.е. «перенормировки» конечного числа физических параметров. (Грубо говоря, в перенормируемых теориях ни одна константа связи не должна обладать размерностью массы в отрицательной степени. Но каждый раз, когда мы добавляем поле или пространственно-временную производную во взаимодействие, мы снижаем размерность соответствующей константы связи. Поэтому только небольшое число простых типов взаимодействия может быть перенормируемыми.) В частности, ясно видно, что широко применявшаяся фермиевская теория слабых взаимодействий была неперенормируемой. (Фермиевская константа связи имеет размерность (масса)⁻².) Чувство неудовлетворенности квантовой теорией поля сохранилось и в 50-е и 60-е годы.

Теорию перенормировок я изучил, будучи аспирантом, главным образом по статьям Дайсона [19]. Поначалу мне показалось прекрасным, что только небольшое число квантовых теорий поля могут быть перенормируемыми. В конце концов, ограничения такого типа мы больше всего и *хотим* найти.

Важны не математические методы, которые помогут прийти к осмысленному результату в бесконечном разнообразии физически бессмысленных теорий, а методы, которые несут с собой ограничения, потому что именно эти ограничения могут указать нам путь к единственно верной теории. В частности, на меня большое впечатление произвел тот факт, что квантовую электродинамику в каком-то смысле можно было *вывести* из принципов симметрии и требования перенормируемости; единственным лоренц-инвариантным и калибровочно-инвариантным перенормируемым лагранжианом фотонов и электронов является в точности изначальный дираковский лагранжиан квантовой электродинамики. Конечно, Дирак пришел к своей теории не таким путем. Он опирался на информацию, полученную в течение веков экспериментирования с электромагнетизмом, а для того чтобы придать окончательную форму своей теории, он использовал идеи простоты (более конкретно, идею, которая иногда называется минимальной электромагнитной связью). Однако надо смотреть вперед, пытаться построить теории явлений, которые еще не изучены столь хорошо на эксперименте, и мы не можем здесь полагаться на чисто формальные идеи простоты. Я думал, что перенормируемость может оказаться ключевым критерием, который и при более общем подходе потребует некоей простоты от наших теорий и поможет нам выбрать одну истинно физическую теорию среди бесконечного множества разумных квантовых теорий поля.

Как я поясню в дальнейшем, я бы сказал, что сейчас это выглядит несколько по-иному, но я еще более, чем когда-либо, убежден в том, что использование принципа перенормируемости как ограничения на наши теории наблюдаемых взаимодействий является хорошей стратегической линией. Преисполненный энтузиазма в отношении теории перенормировок, я написал свою кандидатскую диссертацию под руководством Сэма Треймана в 1957 г. на тему о применении некоторой специальной версии принципа перенормируемости для получения ограничений на слабые взаимодействия [20]. А некоторое время спустя я доказал небольшую, но довольно строгую теорему [21], которая завершала доказательство Дайсона [19] и Са-

лама [22] о сокращении всех ультрафиолетовых расходимостей во всех порядках теории возмущений в перенормируемых теориях. Но ничто из сделанного, казалось, не решало важнейшей проблемы — как построить перенормируемую теорию слабых взаимодействий.

А теперь я опять подхожу к 1967 г. Тогда я изучал следствия нарушенной $SU(2) \times SU(2)$ -симметрии сильных взаимодействий и обдумывал попытки развития идеи о том, что, возможно, симметрия $SU(2) \times SU(2)$ является «локальной», а не просто «глобальной» симметрией, т.е. сильные взаимодействия следовало бы описывать чем-то вроде теории Янга–Миллса, но вдобавок к векторным ρ -мезонам теории Янга–Миллса должны были бы появляться и аксиально-векторные A_1 -мезоны. Чтобы придать ρ -мезону массу, было необходимо вставить обычные массовые члены для ρ и A_1 в лагранжиан, а спонтанное нарушение $SU(2) \times SU(2)$ -симметрии затем отщепит ρ от A_1 с помощью механизма, подобного хиггсовскому, однако, поскольку теория не будет калибровочно-инвариантной, пионы останутся как физические голдстоуновские бозоны. Эта теория приводила к интригующему результату, что отношение масс A_1/ρ должно равняться $\sqrt{2}$. Пытаясь понять этот результат вне рамок теории возмущений, я открыл определенные правила сумм, «правила сумм для спектральных функций» [23], которые, как оказалось, могут быть широко использованы и для других целей. Но $SU(2) \times SU(2)$ -теория не была калибровочно-инвариантной, а следовательно, она не могла быть перенормируемой [24], поэтому я не проявлял по отношению к ней большого энтузиазма [25]. Конечно, если бы я не подставлял массовый член для ρ — A_1 в лагранжиан, то такая теория была бы калибровочно-инвариантной и перенормируемой и A_1 обладал бы массой. Но тогда не было бы пионов, а ρ -мезон был бы безмассовым, в очевидном противоречии (если не сказать большего) с наблюдениями.

И вот как-то в конце 1967 г. (мне кажется, это было, когда я вел машину, направляясь на работу в МТИ*) мне при-

* Массачусетский технологический институт. — *Прим. перев.*

шла в голову мысль о том, что я использовал верные идеи в неподходящей проблеме. Безмассовым должен быть не ρ -мезон, а фотон, причем его партнером будет не A_1 , а массивный промежуточный бозон, который с времен Юкавы прочили на роль переносчика слабых взаимодействий. Слабые и электромагнитные взаимодействия можно было бы тогда описать [26] единым образом в терминах точной, но спонтанно нарушенной калибровочной симметрии. (Конечно, это не обязательно должна быть группа $SU(2) \times SU(2)$.) И эта теория была бы перенормируемой подобно квантовой электродинамике, потому что она калибровочно-инвариантна, как и квантовая электродинамика.

Было нетрудно развить конкретную модель, которая воплощала эти идеи. У меня было мало уверенности в правильности моего понимания сильных взаимодействий, поэтому я решил сконцентрировать свое внимание на лептонах. Существуют два левосторонних лептона электронного типа ν_{eL} и e_L и один правосторонний лептон электронного типа e_R . Поэтому я начал с группы $U(2) \times U(1)$; все унитарные 2×2 -матрицы действуют на левосторонние лептоны e -типа, тогда как все унитарные 1×1 -матрицы воздействуют на правосторонний лептон e -типа. Подразделяя $U(2)$ на унимодулярные преобразования и фазовые преобразования, можно было сказать, что группа была $SU(2) \times U(1) \times U(1)$. Но тогда одна из групп $U(1)$ могла быть соотнесена обычному лептонному числу, а поскольку лептонное число оказывается сохраняющимся и не существует никакой безмассовой векторной частицы, обладающей им, то я решил исключить его из группы. При этом остается лишь четырехпараметрическая группа $SU(2) \times U(1)$. Спонтанное нарушение симметрии $SU(2) \times U(1)$ до группы $U(1)$ обычной электромагнитной калибровочной инвариантности привело бы к появлению масс у трех из четырех векторных калибровочных бозонов: заряженных бозонов $W^\pm$ и нейтрального бозона, который я назвал Z^0 . Зная силу обычных слабых взаимодействий заряженных токов, подобных бета-распаду, которые обусловлены обменом $W^\pm$, можно определить массу $W^\pm$. Она оказалась равной около $40 \text{ ГэВ}/\sin \theta$, где θ — угол смешивания $\gamma - Z^0$.

Чтобы продвинуться дальше, приходится принять определенную гипотезу о механизме нарушения $SU(2) \times U(1)$. В перенормируемой $SU(2) \times U(1)$ -теории единственным полем, с помощью которого можно было бы придать электрону массу за счет отличных от нуля вакуумных средних, является $SU(2)$ -дублет частиц (ϕ^+, ϕ^0) с нулевым спином. Поэтому для простоты я предположил, что эти поля являются единственными скалярными полями в теории. Масса Z^0 -бозона при этом оказалась равной $80 \text{ ГэВ}/\sin 2\theta$. Таким образом, была зафиксирована сила взаимодействий слабых нейтральных токов. Действительно, точно так, как и в квантовой электродинамике, как только выбрано «меню» полей в теории, все детали такой теории полностью определяются принципами симметрии и перенормируемостью, если задать еще несколько свободных параметров: заряды и массы лептонов, фермиевскую константу связи бета-распада, угол смешивания θ и массу скалярной частицы. Естественность такой теории хорошо демонстрирует тот факт, что практически такая же теория была независимо развита Саламом [27] в 1968 г.

Следующей проблемой была перенормируемость. Правила Фейнмана для теорий Янга–Миллса с ненарушенными калибровочными симметриями были разработаны [28] де Виттом, Фаддеевым и Поповым и другими, причем было известно, что такие теории перенормируемы. Однако в 1967 г. я еще не знал, как можно доказать, что это свойство перенормируемости не портится при спонтанном нарушении симметрии. Я усиленно работал над этой задачей в течение нескольких лет, частично вместе с моими студентами [29], но продвинулся в решении вопроса не намного. Оглядываясь назад, можно понять, что основная трудность заключалась в том, что при квантовании векторных полей я использовал калибровку, которая известна сейчас под названием унитарной калибровки [30]. Такая калибровка имеет ряд существенных преимуществ, например, она дает истинный спектр частиц в теории, но у нее есть и крупный недостаток, состоящий в том, что свойство перенормируемости в такой калибровке практически невозможно выяснить.

Наконец, в 1971 году 'т Хоофт [31] показал в своей пре-

красной статье, как можно разрешить эту проблему. Он придумал калибровку, в которой (наподобие «фейнмановской калибровки» в квантовой электродинамике) правила Фейнмана явно приводили только к конечному числу типов ультрафиолетовых расходимостей. Необходимо было также показать, что эти бесконечности удовлетворяли практически тем же ограничениям, что и лагранжиан теории, так что они могли бы быть устранены путем переопределения параметров этой теории. (Это казалось естественным, но доказательство не было простым, потому что калибровочно инвариантную теорию можно проквантовать лишь после того как выбрана определенная калибровка, так что совсем не очевидно, что ультрафиолетовые расходимости удовлетворяют тем же ограничениям, вытекающим из калибровочной инвариантности, что и сам лагранжиан.) Вскоре доказательство было завершено [32] в работах Ли и Зинн-Жюстена, а также 'т Хоофта и Велтмана. Со всем недавно Бекки, Руэ и Стора [33] придумали изящный метод проведения такого доказательства, использующий глобальную суперсимметрию калибровочных теорий, которая сохраняется даже при выборе какой-либо специфической калибровки.

Мне придется признать, что, когда я впервые увидел статью 'т Хоофта в 1971 г., я не поверил, что им найден путь доказательства перенормируемости. Но это была уже моя беда, а не вина 'т Хоофта: я просто не был достаточно хорошо знаком с формализмом интегралов по траекториям, на котором основывалась работа 'т Хоофта, и мне хотелось увидеть вывод фейнмановских правил в калибровке 'т Хоофта из канонического квантования. Вскоре это было показано (для ограниченного класса калибровочных теорий) в статье Бена Ли [34]. После статьи Ли я уже был готов к восприятию мысли о том, что перенормируемость единой теории практически доказана.

К тому времени многие физики-теоретики поверили в общий подход, развиваемый Саламом и мною, т.е. в то, что слабые и электромагнитные взаимодействия управляются некой группой точных локальных калибровочных симметрий, эта группа спонтанно нарушена до $U(1)$, за счет чего все векторные бозоны, за исключением фотона, приобретают массу,

и такая теория перенормируема. Оставалось, правда, еще не ясным, действительно ли природа выбрала ту специфическую модель, которую мы предлагали. Конечно, только эксперимент мог дать ответ на этот вопрос.

Уже в 1967 г. было ясно, что наилучший путь проверки теории — поиск слабых взаимодействий, обусловленных нейтральными токами. Переносчиком взаимодействия в этом случае является промежуточный нейтральный векторный бозон Z^0 . Конечно, возможность проявления нейтральных токов не была абсолютно новой. Еще в 1937 г. Гамов и Теллер, Кеммер и Вентцель, а позже, в 1958 г., Бладмен и Лейте-Лопес выдвигали гипотезы [35] о возможных нейтральных токах. В начале 60-х годов подобные попытки были предприняты [36] Глэшоу и Саламом и Уордом в поисках единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий. У них появлялись нейтральные токи, обладавшие многими из тех свойств, которые Салам и я обнаружили при построении единой теории в 1967–1968 гг. Но поскольку теперь в качестве одного из предсказаний нашей теории вытекало определенное значение массы Z^0 бозона, то можно было сделать конкретное предсказание силы этих нейтральных токов. Таким образом, имелась специфическая цель, к которой следовало направить усилия экспериментаторов.

Некоторое время спустя, в 1971 г., я провел анализ экспериментальных возможностей [37]. Результаты оказались весьма впечатляющими. Проведенные ранее эксперименты установили верхние границы скоростей протекания процессов, обусловленных нейтральными токами. Они оказались довольно низкими, и потому у многих физиков сложилось впечатление, что с высокой степенью достоверности нейтральных токов вообще не существует. Однако, в действительности, теория, развитая в 1967–1968 гг., *предсказывала* весьма малые скорости, реально настолько малые, что соответствующие процессы к тому времени и не могли быть обнаружены. Например, опыты [38], поставленные несколькими годами ранее, привели к значению $0,12 \pm 0,06$ для верхнего предела отношения сечения процесса упругого рассеяния мюонных нейтрино протонами, обусловленного нейтральными токами, к сечению

соответствующего процесса с рождением мюона, вызванного заряженными токами. Я показал, что предсказываемая величина этого отношения лежит в пределах от 0,15 до 0,25 в зависимости от θ — угла смешивания $\gamma - Z^0$. Поэтому имелись все основания для того, чтобы попытаться измерить эту величину несколько точнее.

Как всем уже хорошо известно, нейтральные токи были, наконец, открыты в 1973 г. Затем последовали годы детального экспериментального изучения конкретных свойств нейтральных токов. Обзор результатов этих экспериментов [40] увел бы меня слишком далеко от предмета моей лекции, поэтому я только скажу, что они со все большей точностью подтверждали выводы теорий для реакций с нейтральными токами во взаимодействиях нейтрино с нуклонами и нейтрино с электронами, а после прекрасного эксперимента [41] группы СЛАК – Йейль, проведенного в прошлом году, появилось также подтверждение правильности теории и в электрон-нуклонных реакциях с нейтральными токами.

Все это прекрасно. Но должен сказать, что я не был бы слишком удивлен, если бы оказалось, что правильная теория базируется на какой-то другой спонтанно нарушенной калибровочной группе с совершенно отличными нейтральными токами. Одной из таких возможностей могла бы быть предложенная Джорджи и Глэшоу [42] весьма хитроумная SU(2)-теория, в которой вообще не было нейтральных токов. Важной мне представлялась лишь сама идея о точной спонтанно нарушенной калибровочной симметрии, которая связывает слабые и электромагнитные взаимодействия и обеспечивает перенормируемость этих взаимодействий. В правильности этой идеи я был убежден, хотя бы только потому, что она соответствовала моим представлениям о том, какой должна быть природа.

В начале 70-х годов, еще до открытия нейтральных токов, были получены два других важных теоретических результата, связанных с обсуждаемой проблемой. Поэтому я упомяну о них здесь. Один из них был получен в известной работе Глэшоу, Илиопулоса и Майани об очарованном кварке [43]. В их работе содержалось решение проблемы (которая в противном случае могла бы стать серьезным препятствием) нейтраль-

ных токов, изменяющих странность. Я оставляю эту тему для лекции профессора Глэшоу. Другой теоретический результат имел непосредственное отношение к сильным взаимодействиям. Однако это возвращает нас назад к одной из тем моей лекции, к теме о симметриях.

В 1973 г. Политцер, а также Гросс и Вильчек [44] обнаружили замечательное свойство теории Янга–Миллса, которое они назвали «асимптотической свободой»: эффективная константа связи [45] падает до нуля по мере того, как характерная энергия процесса растет к бесконечности. Казалось, это могло бы объяснить известный экспериментальный факт о поведении нуклона в процессах глубоко неупругого рассеяния электронов высоких энергий, когда он проявляет себя как бы состоящим из практически свободных кварков [46]. Однако возникала одна проблема. Для того чтобы векторные бозоны в калибровочной теории сильных взаимодействий стали массивными, хотелось бы ввести в схему сильно взаимодействующие скалярные поля. А они-то как раз и разрушили бы асимптотическую свободу. Другая трудность, которая особенно беспокоила меня, заключалась в том, что в единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий фундаментальная слабая связь оказывается того же порядка величины, что и заряд электрона e , а потому эффекты, связанные с виртуальными промежуточными векторными бозонами, приведут к чересчур большому (порядка $1/137$) нарушениям четности и закона сохранения странности при сильных взаимодействиях этих скалярных частиц друг с другом и с кварками [47]. Как-то весной 1973 г. мне пришла в голову мысль (независимо развитая также Гроссом и Вильчеком), что можно вообще не рассматривать сильно взаимодействующие скалярные поля, если позволить калибровочной симметрии сильных взаимодействий остаться ненарушенной. При этом векторные бозоны, или «глюоны», остаются безмассовыми. Кроме того, приходится полагаться на рост сильных взаимодействий по мере роста расстояния, чтобы объяснить, почему кварки и безмассовые глюоны не обнаружены на опыте [48]. Предположив отсутствие сильно взаимодействующих скалярных частиц, три «цвета» кварков (как это следовало из более ранних работ раз-

ных авторов [49]) и калибровочную группу симметрии $SU(3)$, мы приходим к специфической теории сильных взаимодействий. Эта теория известна сейчас под названием квантовой хромодинамики (КХД).

С тех пор экспериментальные исследования все в большей степени подтверждали КХД как правильную теорию сильных взаимодействий. Здесь меня все же больше будет интересовать ее влияние на понимание нами принципов симметрии. Ограничения, вытекающие из требований калибровочной инвариантности и перенормируемости, оказались (в который уже раз) необычайно мощными. Эти ограничения заставляют лагранжиан теории принять столь простую форму, что сильные взаимодействия в КХД должны сохранять странность, быть инвариантными относительно зарядового сопряжения и (за исключением проблем [50], связанных с инстантонами) сохранять четность. Указанные симметрии не приходится выдумывать как априорные принципы. Просто не видно никакого пути возможного усложнения лагранжиана, который бы привел к их нарушению. При одном дополнительном предположении, об относительно малых массах u - и d -кварков, сильные взаимодействия оказываются удовлетворяющими также приближенной $SU(2) \times SU(2)$ -симметрии алгебры токов, которая после спонтанного нарушения приводит к группе изоспина. Если масса s -кварка тоже не слишком велика, то получается весь восьмеричный путь в качестве приближенной симметрии сильных взаимодействий. Более того, описывая слабые и электромагнитные взаимодействия также с помощью калибровочной теории, с необходимостью получаем, что слабые токи как раз являются токами, связанными с этими симметриями сильных взаимодействий. Другими словами, вся картина приближенных симметрий сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий, которая так сильно озадачивала нас в 50-е и 60-е годы, теперь в значительной мере объясняется как простое следствие калибровочной инвариантности сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий плюс условия перенормируемости. Понятие о внутренних симметриях достигло сейчас того же уровня, что и симметрия пространства-времени во времена Эйнштейна. Все при-

ближенные внутренние симметрии объяснены с динамической точки зрения. На фундаментальном уровне вообще нет никаких приближенных или частичных симметрий, а есть лишь точные симметрии, управляющие всеми взаимодействиями.

Теперь я хочу снова заглянуть немного вперед и прокомментировать возможное развитие в будущем идей симметрии и перенормируемости.

Перед нами еще стоит открытым вопрос о том, являются ли элементарными те скалярные частицы, которые ответственны за спонтанное нарушение электрослабой калибровочной симметрии $SU(2) \times U(1)$. Если они элементарны, тогда полуслабо распадающиеся «хиггсовские бозоны» с нулевым спином должны быть обнаружены при энергиях, сравнимых по величине с теми, которые нужны для рождения промежуточных векторных бозонов. С другой стороны, возможно, что эти скаляры — составные частицы [51]. Хиггсовские бозоны будут в этом случае неразличимыми достаточно массивными состояниями с очень большой шириной, аналогичными возможному s -волновому максимуму в $\pi\pi$ -рассеянии. Возможно, существуют также и более легкие, медленнее распадающиеся скалярные частицы совсем другого типа, известные под названием псевдоголдстоуновских бозонов [52].

А может быть, существует совершенно новый класс «сверхсильных» взаимодействий [53], приводящих к силам связи сверхмощным в том смысле, что асимптотическая свобода начинает здесь работать не при нескольких сотнях МэВ, как в КХД, а при нескольких сотнях ГэВ? Эти «сверхсильные» силы будут восприниматься новым семейством фермионов и приводить к тому, что массы этих фермионов окажутся равными порядку нескольких сотен ГэВ. Поживем — увидим.

Из четырех (сейчас — трех) типов взаимодействий только гравитация противится включению ее в схему перенормируемой квантовой теории поля. Это может просто означать, что мы еще не достаточно глубоко разбираемся в математической трактовке общей теории относительности. Однако существует другая возможность, которая представляется мне более заманчивой. Гравитационная постоянная определяет единицу энергии, известную под названием планков-

ской энергии и равную около 10^{19} ГэВ. При такой энергии гравитация превращается практически в сильное взаимодействие, так что уже более нельзя игнорировать ультрафиолетовые расходимости теории, если имеешь дело с энергией порядка планковской. Возможно, существует целый мир с новой физикой и неожиданными степенями свободы при столь огромных энергиях, а общая теория относительности не является адекватной схемой для понимания физики этих степеней свободы при сверхвысоких энергиях. Когда мы изучаем гравитацию или другие привычные явления при массах частиц и их энергиях, не превышающих ТэВ или около того, мы, видимо, обучаемся только «эффективной» теории поля, т.е. такой, в которой сверхтяжелые степени свободы не проявляются в явной форме, а параметры связи неявно подразумевают суммирование по этим открытым степеням свободы.

Чтобы проверить, насколько такое предположение осмысленно, будем считать его верным и зададим вопрос о том, какие типы взаимодействий (как мы могли бы ожидать, исходя из такой гипотезы) проявятся при обычных энергиях. «Заинтегрировав» сверхвысокоэнергичные степени свободы фундаментальной теории, мы, как правило, приходим к очень сложной эффективной теории поля. В действительности она оказывается настолько сложной, что содержит *все* взаимодействия, допускаемые принципами симметрии. Но там, где из анализа размерностей следует, что константа связи должна выражаться определенной степенью некой массы, эта самая масса оказывается, вероятнее всего, типичной сверхбольшой массой, такой, как 10^{19} ГэВ. Бесконечное многообразие перенормируемых взаимодействий в этой эффективной теории обладает константами связи с размерностями массы в отрицательных степенях, так что обусловленные ими эффекты подавлены при обычных энергиях как степени отношения энергии к сверхбольшим массам. Поэтому единственными взаимодействиями, которые мы можем обнаружить при обычных энергиях, являются перенормируемые в обычном смысле взаимодействия плюс те из перенормируемых взаимодействий, которые приводят хотя и к ничтожно малым, но в чем-то эк-

зотическим эффектам, обнаруживаемым именно за счет их экзотичности.

Одна из возможностей зарегистрировать очень слабое взаимодействие проявляется, когда это взаимодействие когерентное и дальнodelствующее, так что оно может суммироваться и приводить к макроскопическим эффектам. Было показано [54], что единственными частицами, обмен которыми приводит к таким силам, являются безмассовые частицы со спинами 0, 1 или 2. Более того, одной лишь лоренц-инвариантности достаточно, чтобы продемонстрировать, что дальнodelствующие силы, обусловленные произвольной частицей с нулевой массой и спином, равным 2, должны описываться общей теорией относительности [55]. Итак, с этой точки зрения нам не следует чересчур удивляться тому, что гравитация является единственным (из известных сейчас) взаимодействием, которое, кажется, не описывается перенормируемой теорией поля, — это почти единственное сверхслабое взаимодействие, которое *могло* быть обнаружено. А тот факт, что гравитация хорошо описывается общей теорией относительности в макроскопических масштабах, не должен приводить нас к заключению о том, что общая теория относительности верна при 10^{19} ГэВ.

Неперенормируемые эффективные взаимодействия можно также зарегистрировать, если они нарушают какие-либо законы сохранения, являющиеся точными без учета таких взаимодействий. Первоочередными кандидатами на нарушение являются законы сохранения барионного и лептонного чисел. Схема $SU(3)$ - и $SU(2) \times U(1)$ -калибровочных симметрий сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий приводит к замечательному следствию, гласящему, что все перенормируемые взаимодействия известных частиц автоматически сохраняют число барионов и лептонов. Однако тот факт, что обычное вещество оказывается весьма стабильным, и что распад протона не обнаружен, еще не должен привести к выводу о фундаментальном характере законов сохранения чисел барионов и лептонов. С той точностью, с которой они были проверены, законы сохранения барионов и лептонов могут быть объяснены как динамические следствия других симмет-

рий точно так же, как сохранение странности было объяснено в рамках КХД. Но могут существовать сверхтяжелые частицы, и эти частицы могут обладать необычными свойствами преобразований $SU(3)$ или $SU(2) \times U(1)$. В этом случае не видно никаких оснований, почему бы при их взаимодействиях сохранялись числа барионов и лептонов. Сомневаюсь, что барионное и лептонное числа останутся неизменными. Действительно, сам факт, что Вселенная, видимо, содержит избыток барионов над антибарионами, должен заставить нас подозревать, что процессы с несохранением числа барионов действительно имели место. Если эффекты слабого несохранения барионного или лептонного числа, такие, как распад протона или наличие массы у нейтрино, будут открыты экспериментально, в нашем распоряжении останутся только калибровочные симметрии как единственные истинные внутренние симметрии природы. Такой вывод я бы рассматривал как наиболее удовлетворительный.

Идея о новой шкале сверхбольших масс возникла несколько другим образом [56]. Если «великое объединение» сильных и электрослабых калибровочных взаимодействий как-либо окажется возможным в той или иной форме, то следует ожидать, что все калибровочные константы связи $SU(3)$ и $SU(2) \times U(1)$ будут сравнимы по величине. (В частности, если $SU(3)$ и $SU(2) \times U(1)$ являются подгруппами большей простой группы, то отношения квадратов констант связи задаются рациональными числами порядка единицы [57].) Однако такая возможность кажется противоречащей очевидному факту, что сильные взаимодействия сильнее слабых и электромагнитных взаимодействий. В 1974 г. Джорджи, Квинн и я предположили, что масштаб великого объединения, при котором все константы связи становятся сравнимыми по величине, лежит при огромной энергии. Поэтому истинная причина того, что константа сильной связи настолько больше электрослабых связей при обычных энергиях, кроется в асимптотической свободе КХД, в которой эффективная константа связи медленно возрастает по мере того, как энергия падает от масштаба великого объединения к привычным значениям. Константа сильной связи меняется очень медленно (как $1/\sqrt{\ln E}$), поэто-

му масштаб великого объединения должен быть огромным. Мы нашли, что для довольно широкого класса теорий великое объединение происходит где-то поблизости от 10^{16} ГэВ. Эта энергия не слишком сильно отличается от планковской энергии 10^{19} ГэВ. Время жизни протона оценить с достаточно большой точностью трудно, но мы дали приблизительное значение, равное 10^{32} лет, которое, видимо, удастся проверить экспериментально уже через несколько лет. (Эти оценки были улучшены более подробными вычислениями, проделанными разными авторами [58].) Мы также вычислили значение параметра смешивания $\sin^2 \theta$, которое оказалось равным примерно 0,2. Оно не сильно отличается от значения $0,23 \pm 0,02$, полученного сейчас в эксперименте [40]. Важной задачей будущих экспериментов с нейтральными токами является улучшение той точности, с которой известна величина $\sin^2 \theta$. Интересно узнать, действительно ли она согласуется с предсказанным значением.

Для того чтобы элементарные скалярные частицы, появляющиеся в теории великого объединения, приводили к спонтанному нарушению электрослабой калибровочной симметрии при нескольких сотнях ГэВ, необходимо (и достаточно), чтобы они не приобрели сверхбольших масс при спонтанном нарушении калибровочной группы великого объединения [59]. В этом нет ничего невозможного, но я не смог до конца продумать вопрос, почему это должно иметь место. (Эта проблема может быть связана с давней загадкой, почему квантовые поправки не приводят к огромной космологической постоянной. В обоих случаях мы имеем дело с аномально малым «суперперенормируемым» членом в эффективном лагранжиане, который следует положить равным нулю. В случае с космологической постоянной это требование должно выполняться с точностью до 10^{-50} .) Если же нет таких элементарных скалярных частиц, которые не приобретают сверхбольших масс при нарушении калибровочной группы великого объединения, тогда, как я уже упоминал, должны появляться сверхмощные силы, чтобы образовать составные голдстоуновские и хиггсовские бозоны, которые связаны со спонтанным нарушением $SU(2) \times U(1)$. Такие силы могут появляться доволь-

но естественным образом в теориях великого объединения. В качестве одного из примеров предположим, что великая калибровочная группа разрушается не до прямого произведения $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, а до $SU(4) \times SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Поскольку группа $SU(4)$ больше группы $SU(3)$, ее константа связи растет с уменьшением энергии быстрее, чем КХД-константа. Поэтому $SU(4)$ -сила становится большой при намного более высоких энергиях, чем несколько сотен МэВ, когда сильными становятся взаимодействия в КХД. Обычные кварки и лептоны были бы нейтральными относительно $SU(4)$. Они не чувствовали бы этой силы. Но другие фермионы могли бы нести квантовые числа $SU(4)$ и поэтому обладали бы большими массами. Можно даже представить себе последовательность все возрастающих подгрупп великой калибровочной группы, которая заполнила бы огромную энергетическую область вплоть до 10^{15} или 10^{19} ГэВ массами частиц, рождающихся при таких последовательно усиливающихся взаимодействиях.

Если существуют элементарные скаляры, вакуумные ожидания которых ответственны за массы обычных кварков и лептонов, то эти массы в членах порядка α будут чувствовать радиационные поправки, обусловленные сверхтяжелыми векторными бозонами великой калибровочной группы. Возможно, что объяснить значения величин, подобных m_e/m_μ , без полной теории великого объединения не удастся. С другой стороны, если таких элементарных скаляров нет, то почти все детали теории великого объединения оказываются забытыми в эффективной теории поля, описывающей физику при обычных энергиях. Тогда может оказаться возможным вычисление масс кварков и лептонов просто через свойства процессов при доступных энергиях. К сожалению, до сих пор никому не удалось показать, как можно получить таким способом что-либо напоминающее наблюдаемую картину распределения масс [60].

Отставив в сторону все эти неопределенности, предположим, что существует истинно фундаментальная теория, характеризующая шкалой энергий порядка от 10^{16} до 10^{19} ГэВ, при которой сильные, электрослабые и гравитационные взаи-

модействия объединяются. Возможно, это будет обычная перенормируемая квантовая теория поля, но в настоящий момент, если мы учитываем гравитацию, не ясно, как ее построить. Однако если она перенормируемая, то чем же тогда задается бесконечный набор констант связи, которые необходимы, чтобы поглотить все ультрафиолетовые расходимости такой теории? Как я считаю, ответ заключается в том, что квантовая теория поля, которая родилась около пятидесяти лет назад в результате объединения квантовой механики с теорией относительности, оказалась прекрасным, но не очень здоровым ребенком. Как указывали много лет назад Ландау и Челлен, квантовая теория поля при сверхвысоких энергиях подвержена болезням всех сортов — тахионы, духи и т. п. — и нужны специальные лекарства для того, чтобы она выжила. Один из способов избежать возможных болезней квантовой теории поля состоит в том, чтобы сделать ее перенормируемой и асимптотически свободной. Однако имеются и другие способы. Например, даже бесконечный набор констант связи может стремиться к некоей фиксированной, отличной от нуля точке по мере роста к бесконечности энергии, при которой они измеряются. Но требование наличия такого характерного поведения обычно накладывает столь много ограничений на эти константы, что в результате остается только конечное число свободных параметров [61] — в точности как для теорий, перенормируемых в обычном смысле слова. Таким образом, я думаю, что тем или иным способом квантовая теория поля окажется упрямо ограничивающей возможные подходы, так что она позволит описать лишь небольшое число возможных миров, среди которых, как мы надеемся, находится и наш мир.

Кажется, я склонен быть чересчур оптимистичным относительно будущего физики. И ничто так не заставляет меня быть оптимистом, как открытие нарушенных симметрий. В седьмой книге своего труда «Государство» Платон описывает прикованных в пещере узников, которые могут видеть лишь тени, отбрасываемые на стены пещеры предметами из внешнего мира. А когда узников выпускают из пещеры на свет, глаза их настолько поражены сиянием, что в течение

некоторого времени они думают, будто тени, которые они видели в пещере, действительно достовернее тех вещей, которые им сейчас показывают. Но постепенно их восприятие мира проясняется, и они начинают понимать, насколько прекрасен настоящий мир. Мы как раз находимся в такой пещере, прикованные ограничениями на возможные типы экспериментов, доступных нам. В частности, мы можем изучать вещество лишь при относительно низких температурах, когда симметрии, по всей видимости, спонтанно нарушены, и потому природа не представляется здесь очень простой или единой. Мы не можем выбраться из этой пещеры, но если долго и терпеливо смотреть на тени на ее стенах, то можно, по крайней мере, уловить формы симметрии, которые, даже будучи разрушенными, являются точными принципами, управляющими всеми явлениями природы, проявлением красоты внешнего мира.

Здесь удалось привести ссылки лишь на малую часть статей, посвященных тематике, обсуждавшейся мною в этой лекции. Дополнительные ссылки можно найти в следующих обзорах:

Abers E. S., Lee B. W. Gauge Theories. — Phys. Rept. Ser. C, 1973, v. 9, № 1.

Marciano W., Pagels H. Quantum Chromodynamics. — Ibid., 1978, v. 36, № 3.

Taylor J. C. Gauge Theories of Weak Interactions. — Cambridge Univ. Press, 1976.

Цитированная литература

- [1] Tuve M.A., Heydenberg N., Hafstad L.R. — Phys. Rev., **1936**, v. 50, p. 806.
Breit G., Condon E.V., Present B.D. — Ibid., p. 825.
Breit G., Fepnberg E. — Ibid., p. 850.
- [2] Gell – Mann M. — Phys. Rev., **1953**, v. 92, p. 833.
Nakano T., Nishijima K. — Progr. Theor. Phys., 1955, v. 10, p. 581.
- [3] Lee T.D., Yang C.N. — Phys. Rev., **1956**, v. 104, p. 254.
Wu C.S. et al. — Ibid., **1957**, v. 105. p. 1413.

- Garwin R., Lederman L., Weinrich M. — Ibid., p. 1415.
- Friedman J.I., Telegdi V.L. — Ibid., p. 1681.
- [4] Gell – Mann M. Cal. Tech. Synchrotron Laboratory Report CTSL-20 — **1961**, (unpublished).
- Neeman Y. — Nucl. Phys., **1961**, v. 26, p. 222.
- [5] Fock V. — Zs. Phys., **1927**, Bd. 39, S. 226.
- Weyl H. — Ibid., **1929**, Bd. 56, S. 330.
- Название «калибровочная инвариантность» основано на аналогии с более ранними гипотезами:
- Weyl H. — In: Raum, Zeit, Materie. — 3rd ed. — Springer, **1920**. См. также:
- London F. — Zs. Phys., **1927**, Bd. 42, S. 375. Обзор истории вопроса дается в лекции Ч. Н. Янга в City College, **1977**.
- [6] Yang C.N., Mills R.L. — Phys. Rev., **1954**, v. 96, p. 191.
- [7] Goldstone J. — Nuovo Cimento, **1961**, v. 19, p. 154.
- [8] Goldstone J., Salam A., Weinberg S. — Phys. Rev., **1962**, v. 127, p. 965.
- [9] Higgs P.W. — Phys. Lett., **1964**, v. 12, p. 132; v. 13, p. 508; Phys. Rev., **1966**, v. 145, p. 1156.
- Kibble T.W.B. — Phys. Rev., **1967**, v. 155, p. 1554.
- Guralnik C.S., Hagen C.R., Kibble T.W.B. — Phys. Rev. Lett., **1964**, v. 13, p. 585.
- Englert F., Brout B. — Ibid., p. 321.
- См. также: Anderson P.W. — Phys. Rev., **1963**, v. 130, p. 439.
- [10] Adler S.L. — Phys. Rev. Lett., **1965**, v. 14, p. 1051; Phys. Rev. Ser. B, **1965**, v. 140, p. 736.
- Weisberger W.I. — Phys. Rev. Lett., **1965**, v. 14, p. 1047; Phys. Rev., **1966**, v. 143, p. 1302.
- [11] Gell – Mann M. — Physics, **1964**, v. 1, p. 63.
- [12] Nambu Y., Jona-Lasinio G. — Phys. Rev., **1961**, v. 122, p. 345; **1961**, v. 124, p. 246.
- Nambu Y., Lurie D. — Ibid., **1962**, v. 125, p. 1429.
- Nambu Y., Shrauner E. — Ibid., **1962**, v. 128, p. 862.
- См. также: Gell – Mann M., Levy M. — Nuovo Cimento, **1960**. v. 16, p. 705.

- [13] Goldberger M.L., Miyazawa H., Oehme R. — Phys. Rev., **1955** v. 99, p. 986.
- [14] Goldberger M.L., Treiman S.B — Ibid., **1958**, v. III, p. 354.
- [15] Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., **1966**, v. 16, p. 879; v. 17, p. 336; **1967**, v. 18, p. 188; Phys. Rev., **1967**, v. 166, p. 1568.
- [16] Oppenheimer J.R. — Phys. Rev., **1930**, v. 35, p. 461.
Waller I. — Zs. Phys., **1930**, Bd. 51, S. 168; Bd. 62, S. 673.
- [17] Feynman R.P. — Rev. Mod. Phys., **1948**, v. 20, p. 367; Phys. Rev., **1948**, v. 74, p. 939; 1430; **1949**, v. 76, p. 749, 769; **1950**, v. 80, p. 440.
Schwinger J.W. — Ibid., **1948**, v. 73, p. 146; v. 74, p. 1439; **1949**, v. 75, p. 651; v. 76, p. 790; **1951**, v. 82, p. 664, 914; **1953**, v. 91, p. 713; Proc. Nat. Acad. Sci., **1951**, v. 37, p. 452.
Tomonaga S. — Progr. Theor. Phys., **1946**, v. 1, p. 27.
Koba Z., Tati T., Tomonaga S., — Ibid., **1947**, v. 2, p. 101.
Kanazawa S., Tomonaga S. — Ibid., **1948**, v. 3, p. 276.
Koba Z., Tomonaga S. — Ibid., **1948**, v. 3, p. 290.
- [18] Ранее выдвигались предположения о том, что бесконечности можно удалить из квантовой теории поля таким способом. См. Weisskopf V.F. — Kon. Dansk. Vid. Mat.-Fys. Medd., **1936**, Bd. 15, Nr. 6, особенно с. 34 и с. 5–6.
Kramers H. (не опубликовано).
- [19] Dyson F.J. — Phys. Rev., **1949**, v. 75, p. 486, 1736.
- [20] Weinberg S. — Ibid., **1957**, v. 106, p. 1301.
- [21] Weinberg S. — Ibid., **1960**, v. 118, p. 838.
- [22] Salam A. — Ibid., **1951**, v. 82, p. 217; v. 84, p. 426.
- [23] Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., **1967**, v. 18, p. 507.
- [24] О перенормируемости теорий с внутренне нарушенными калибровочными симметриями см.:
Komar A., Salam A. — Nucl. Phys., **1960**, v. 21, p. 624.
Umezawa H., Kametuchi S. — Ibid., **1961**, v. 23, p. 399.
Kametuchi S., O’Raifeartaigh L., Salam A. — Ibid., **1961**, v. 28, p. 529.
Salam A. — Phys. Rev., **1962**, v. 128, p. 331.

- Veltman M. — Nucl. Phys. Ser. B, **1968**, v. 7, p. 637; v. 21, p. 288.
- Boulware D. — Ann. of Phys., **1970**, v. 56, p. 140.
- [25] Эта работа была вкратце упомянута в [23] (сноска).
- [26] Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., **1967**, v. 19, p. 1264.
- [27] Salam A. In: Elementary Particle Physics: Nobel Symposium No. 8/Ed. N. Svartholm — Stockholm: Almqvist and Wilsell, **1968**. — P. 367.
- [28] De Witt B. — Phys. Rev. Lett., **1964**, v. 12, p. 742; Phys. Rev., **1967**, v. 162, p. 1195.
- Faddeev L.D., Popov V.N. — Phys. Lett. Ser. B, **1967**, v. 25, p. 29.
- См. также: Feynman B.P. — Acta Phys. Pol., **1963**, v. 24, p. 697.
- Mandelstam S. — Phys. Rev., **1968**, v. 175, p. 1580.
- [29] См.: Stuller L. Ph. D. Thesis M. I. T. — **1971** (не опубликовано).
- [30] Моя работа с унитарной калибровкой описана в статье: Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., **1971**, v. 27, p. 1688, а более детально в статье: Weinberg S. — Phys. Rev. Ser. D, **1973**, v. 7, p. 1068.
- [31] 't Hooft G. — Nucl. Phys. Ser. B, **1971**, v. 35, p. 167.
- [32] Lee B.W., Zinn-Justin J. — Phys. Rev. Ser. D, **1972**, p. 3121, 3137, 3155.
- 't Hooft G., Veltman M. — Nucl. Phys. Ser. B, **1972**, v. 44, p. 189, v. 50, p. 318.
- [33] Beechi C., Rouet A., Stora R. — Comm. Math. Phys., **1975**, v. 42, p. 127.
- [34] Lee B.W. — Phys. Rev. Ser. D, **1972**, v. 5, p. 823.
- [35] Gamow G., Teller E. — Phys. Rev., **1937**, v. 51, p. 288.
- Kemmer N. — Phys. Rev., **1937**, v. 52, p. 906.
- Wentzel G. — Helv. Phys. Acta, **1937**, v. 10, p. 108.
- Bludman S. — Nuovo Cimento, **1958**, v. 8, p. 234.
- [36] Glashow S.L. — Ibid., **1961**, v. 22, p. 519.
- Salam A., Ward J.C. — Phys. Lett., **1964**, v. 13, p. 168.
- [37] Weinberg S. — Phys. Rev., **1972**, v. 5, p. 1412.

- [38] C u n d y D. C. et al. — Phys. Lett. Ser. B, **1970**, v. 31, p. 478.
- [39] Первые сведения о нейтральных токах были получены на пузрьковой камере «Гаргамель» в ЦЕРНе:
H a s e r t F. J. et al., Phys. Lett. Ser. B, **1973**, v. 46, p. 121, 138.
См. также: M u s s e t P. — J. de Phys., **1973**, t. 11/12, p. T34.
Примерно в то же время безмюонные события наблюдались группой HPWF в лаборатории им. Ферми, но после задержки с публикацией их статьи они перестроили детектор и после этого вначале не смогли обнаружить сигнал от нейтральных токов. Эта группа опубликовала сведения о нейтральных токах в статье:
B e n v e n u t i A. et al. — Phys. Rev. Lett., **1974**, v. 32, p. 800.
- [40] Обзор данных см.: B a l t a y C. — In: Proc. of the 19th Intern. Conference on High Energy Physics. — Tokyo, **1978**. Теоретический анализ см.: A b b o t t L. F., B a r n e t t R. M. — Phys. Rev. Ser. D, **1979**, v. 19, p. 3230; L a n g a c k e r P., K i m J. E., L e v i n e M., W i l l i a m s H. H., S i d h u D. P. (в печати), и более ранние ссылки, приведенные там.
- [41] P r e s c o t t C. Y. et al. — Phys. Lett. Ser. B, **1978**, v. 77, p. 347.
- [42] G l a s h o w S. L., G e o r g i H. L. — Phys. Rev. Lett., **1972**, v. 28, p. 1494. См. также: S c h w i n g e r J. — Ann. of Phys., **1957**, v. 2, p. 407.
- [43] G l a s h o w S. L., I l i o p o u l o s J., M a i a n i L. — Phys. Rev. Ser. D, **1970**, v. 2, p. 1285. Эта статья упоминалась в [37] как работа, в которой дается возможное решение проблемы нейтральных токов, меняющих странность. Однако в то время я скептически относился к кварковой модели. Поэтому в работе [37] барионы включались в теорию только в виде SU(2)-дублета из протона и нейтрона, а странные частицы полностью игнорировались.
- [44] P o l i t z e r H. D. — Phys. Rev. Lett., **1973**, v. 30, p. 1346.
G r o s s D. J., W i l c z e k F. — Ibid., p. 1343.
- [45] Эффективные константы связи, зависящие от энергии, были введены в работе:
G e l l - M a n n M., L o w F. E. — Phys. Rev., 1954, v. 95, p. 1300.
- [46] B l o o m E. D. et al. — Phys. Rev. Lett., **1969**, v. 23, p. 930.
B r e i d e n b a c h M. et al. — Ibid., p. 935.

- [47] Weinberg S. — Phys. Rev. Ser. D, **1973**, v. 8, p. 605.
- [48] Gross D.J., Wilczek F. — Ibid., p. 3633.
Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., **1973**, v. 31, p. 494.
Подобная идея была выдвинута до открытия свойства асимптотической свободы в работе: Fritzsche H., Gell-Mann M., Leutwyler H. — Phys. Lett. Ser. B, **1973**, v. 47, p. 365.
- [49] Greenberg O.W. — Phys. Rev. Lett., **1964**, v. 13, p. 598.
Han M.Y., Nambu Y. — Phys. Rev. Ser. B, **1965**, v. 139, p. 1006.
Bardeen W.A., Fritzsche H., Gell-Mann M. — In: Scale and Conformal Symmetry in Hadron Physics/Ed. R. Gatto. — N. Y.: J. Wiley, **1973**. — P. 139. (и т. д.)
- [50] 't Hooft G. — Phys. Rev. Lett., **1976**, v. 37, p. 8.
- [51] Такой «динамический» механизм спонтанного нарушения симметрии впервые обсуждался в работах:
Nambu Y., Jona-Lasinio G. — Phys. Rev., **1961**, v. 122, p. 345.
Schwinger J. — Ibid., **1962**, v. 125, p. 397; v. 128, p. 2425, и в контексте современных калибровочных теорий в работах: Jackiw R., Johnson K — Ibid. Ser. D, **1973**, v. 8, p. 2386.
Cornwall J.M., Norton R.E. — Ibid., p. 23338.
Следствия нарушения симметрии были рассмотрены в работах:
Weinberg S. — Ibid., **1976**, v. 13, p. 975; **1979**, v. 19, p. 1277.
Susskind L. — Ibid., **1979**, v. 20, p. 2619.
- [52] Weinberg S. — см. в [51]. Возможность появления псевдоголдстоуновских бозонов впервые была отмечена в другом контексте в работе: Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., **1972**, v. 29, p. 1698.
- [53] Weinberg S. см. в [51]. Модели с такими взаимодействиями обсуждались также в работе: Susskind L. — См. в [51].
- [54] Weinberg S. — Phys. Rev. Ser. B, **1964**, v. 135, p. 1049.
- [55] Weinberg S. — Phys. Lett., **1964**, v. 9, p. 357; Phys. Rev. Ser. B, **1965**, v. 138, p. 988; In: Lectures in Particles and Field Theory/Ed. S. Deser, K. Ford. — Prentice-Hall, **1965**, p. 988;

- и ссылка [54]. Программа вывода общей теории относительности из квантовой механики и специальной теории относительности была завершена работой:
- Boulware D., Deser S. — *Ann. Phys.*, **1975**, v. 89, p. 173. — Я знаю, что подобные идеи развивались Р. Фейнманом в неопубликованных лекциях, прочитанных в Калифорнийском технологическом институте.
- [56] Georgi H., Quinn H., Weinberg S. — *Phys. Rev. Lett.*, **1974**, v. 33, p. 451.
- [57] Пример простой калибровочной группы слабых и электромагнитных взаимодействий (для которых $\sin^2 \theta = 1/4$) была дана в работе: Weinberg S. — *Phys. Rev. Ser. D*, **1972**, v. 5, p. 1962. Имелось несколько конкретных моделей слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий, основанных на простых калибровочных группах, в том числе:
- Pati J.C., Salam A. — *Ibid.*, **1974**, v. 10, p. 275.
- Georgi H., Glashow S.L. — *Phys. Rev. Lett.*, **1974**, v. 32, p. 438.
- Georgi H. — In: *Particles and Fields*. — American Institute of Physics, **1975**.
- Fritzsche H., Minkowski P. — *Ann. d. Phys.*, **1973**, Bd. 93, S. 193.
- Georgi H., Nanopoulos D.V. — *Phys. Lett. Ser. B*, **1979**, v. 82, p. 392.
- Gürsey F., Ramond P., Sikivie P. — *Ibid.*, **1975**, v. 60, p. 177.
- Gürsey F., Sikivie P. — *Phys. Rev. Lett.*, **1976**, v. 36, p. 775.
- Ramond P. — *Nucl. Phys. Ser. B*, **1976**, v. 110, p. 214. (и т. д.)
- [58] Buras A., Ellis J., Gaillard M.K., Manopoulos D.V. — *Ibid.*, **1978**, v. 135, p. 66.
- Ross D. — *Ibid.*, **1978**, v. 140, p. 1.
- Marciano W.J. — *Phys. Rev. Ser. D*, **1979**, v. 20, p. 274.
- Goldman T., Boss D. — CALT 68-704 (в печати).
- Jarlskog C., Yndurain F.J. — CERN preprint (в печати).
- Machacek M. — Harvard preprint HUTP — 79/A021 (в печати в «Nuclear Physics»).

Статья готовится к печати, феноменология распада нуклона в общем случае обсуждалась в работах:

Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., **1979**, v. 43, p. 1566.

Wilczek F., Zee A. — Ibid., **1979**, v. 43, p. 1571.

- [59] Gildener E., Weinberg S. — Phys. Rev. Ser. D, **1976**, v. 13, p. 3333.

Weinberg S. — Phys. Lett. Ser. B., **1979**, v. 82, p. 387,

Механизм нарушения симметрии впервые обсуждался в работе: Coleman S., Weinberg E. — Phys. Rev. Ser. U. **1976**, v. 7, p. 1888.

- [60] Эта проблема изучалась недавно в работах:

Dimopoulos S., Susskind L. — Nucl. Phys. Ser. B, **1979**, v. 155, p. 237.

Eichten E., Lane K. — Phys. Lett. (в печати).

Weinberg S. (не опубликовано).

- [61] Weinberg S. In: General Relativity: An Einstein Centenary Survey/Ed. S. W. Hawking, W. Israel. — Cambridge, Univ. Press, **1979** — Ch. 16.

Алфавитно-предметный указатель

- Адроны 154
— и теория кварков 137
— — ядерной демократии 136
— открытие новых 141
— отличие от лептонов 135
— сильные взаимодействия 135–136
Азот 76
Ангстрем (определение) 71, 154
Антибарионы 97, 104
Антивещество 101
Антигипероны 97
Антилептоны 104
Антимюон 89, 97
Антинейтрино 102, 114, 119
— в первые 3 мин Вселенной 18, 108–110
— как лептоны 98, 102
Антинейтроны 93, 97, 100, 154
Антипротоны 89
— в космическом излучении 101
— как стабильные барионы 100
— обнаружение 127
Античастицы 88–93, 154
— вклад в лептонное число 104
— отношение к числу ядерных частиц 100–102
Антиэлектрон (позитрон) 89
Антиядро 101
Асимптотическая свобода 139–140, 154
Атомные ядра в первые 3 мин Вселенной 108–113
— в ранней Вселенной 15, 18, 22, 59, 72, 96
— в сжимающейся Вселенной 20, 149
— в сильных взаимодействиях 134, 136
— в ядерных реакциях 86
— взаимодействие с излучением 59, 63, 64
— при образовании атомов 18
— среднее свободное время 64
Атомы в ранней Вселенной 15, 22, 72, 76, 94, 115
— в сжимающейся Вселенной 20, 149
— взаимодействие с фотонами 16, 26, 63, 64
— оболочечная структура 92
— при высоких температурах 96
Барионное число в ранней Вселенной 106
— на один фотон 100–102, 104
— определение 97, 154
— плотность 118
Беватрон 127
Бета-распад 98
Бета Центавра 118
Большая Медведица II (скопление галактик) 38

- Большой взрыв, нуклеосинтез — — 13,82 с 110
 59, 61, 129 — — 3 мин 2 с 112
 — предварительные условия — — 3 мин 46 с 113
 для признания теории 42 — — 34 мин 40 с 113
 — теория 15, 124, 127 — — 700 000 лет 64, 114
 Бор 119
- Водород 59, 115, 117, 123
 — атомы 18, 70, 143
 — ионы 51, 95
 — космическая распространенность в настоящее время 60, 123–125
 — ядра 96, 115, 128
 Вращательное состояние молекул циана 77
 Вселенная, бесконечная 43, 45
 — будущее 20, 147–153
 — в первые 0,01 с 106–109, 132–144
 — в первые 3 мин 105–112
 — возраст 51, 53
 — горизонт 51, 52
 — замкнутая 45, 49, 118
 — изотропия 33–36, 52, 121–122
 — конечная *см.* Конечная Вселенная
 — модели 45–49
 — однородность 33–36, 52, 121–122, 149
 — определение возраста 39, 41
 — открытая 49, 118
 — размеры 39, 52, 108, 109
 — расширение *см.* Расширение Вселенной
 — сжатие 49, 148–149
 — температура 109–115
 — через 0,11 с 109
 — — 1,09 с 109
- Галактика *см.* также Млечный Путь, 155
 Галактики 18, 19, 64
 — движение 22, 32
 — закон Хаббла 33, 34, 37
 — красные смещения 33, 40, 64
 — масса 51
 — образование 18, 79, 81, 82, 115
 — разбегание 19, 38, 45
 — расстояние 37, 38, 49
 — скорость 34, 40
 — отрыва 48
 — «типичные» 33, 47, 48, 165
 — удаленные 54
 Галактические скопления 35, 38
 Гамма-излучение 59
 Гелий в ранней Вселенной 60, 111–116, 122–124, 130
 — в теории большого взрыва 125, 127
 — в теперешней Вселенной 115, 118, 123, 126, 128
 — гелий-три (^3He) 111, 117
 — жидкий 55, 78
 — определение 155
 Гидроксил (ионы) 95, 155
 Гипероны 97, 135
 Голубое смещение 148, 155
 Гончие Псы (созвездие) 31
 Горизонт (в космологии) 51–52, 143
 — определение 155
 Гравитационные волны 155

- Гравитация в моделях Фридмана 46
- в ранней Вселенной 142, 144
 - и нейтрино 102, 110
 - как излучение 144–146
 - при расширении Вселенной 39, 92, 93, 105, 107
 - теория Ньютона 43
 - — Эйнштейна 44, 45
- Давление излучения 82
- Девы, скопление галактик 156
- созвездие 33, 35, 37
- Джинса масса 82
- математическое дополнение 178
- Длина волны 110
- Доплер-эффект для туманностей 31–33
- и измерение расстояний 26–27, 37
 - — измерение скоростей 26
 - — красное смещение 40
 - — цвет звезд 24
 - математическое дополнение 168
 - определение 22–23
- Железо 26
- Закон Рэлея – Джинса 156
- Стефана – Больцмана 72, 157
 - Хаббла 34, 157
 - сохранения 157
- Замедления параметр 161
- Звезда Барнарда 21
- Звездная теория нуклеосинтеза 128
- Звезды 20, 64
- в сжимающейся Вселенной 149
 - видимая светимость 37
 - движение 21
 - двойные 26
 - измерение расстояний с помощью эффекта Доплера 27, 37
 - как «малые» источники радишума 54
 - нейтронные 147
 - ньютонова теория происхождения 43
 - образование 18, 115
 - разделение материи на звезды 81
 - созвездия Центавра 118
 - спектральные линии 24
 - тепловое равновесие 66
 - ультрафиолетовый спектр 117
 - цвет 24
 - цефеиды 31–32
 - ядерные реакции 96
- Звуковые волны, эффект Доплера 23–24
- Земля, атмосфера 75
- возраст 41
 - движение 79
 - скорость 79–80
- Излучение в ранней Вселенной 59, 60
- в тепловом равновесии 67
 - квантовая точка зрения 63
 - определение 59
 - фон *см.* также Космический фон микроволнового излучения, 59, 60, 73–78

- Излучение черного тела 75, 85
— качественные свойства 68
— математическое дополнение 175
— определение 68–69, 157
— плотность энергии 69–71
— фон микроволнового излучения 77–78
- Измерение скоростей с помощью эффекта Доплера 26
- Изотопы урана (в датировке возраста Вселенной) 41
- Изотропия в космологических моделях 44, 45
— во Вселенной 35, 52, 121–122, 149
— определение 157
— фон излучения 79
- Инфракрасная астрономия 75, 78
- Инфракрасное излучение 59, 71, 80, 157
- Ионы 95, 96
- Калибровочные теории 138, 141, 147, 157
- Кальций 26
- Капелла (звезда) 26
- Каталог Мессье 29, 36
- Квазары (квазизвездные объекты) 40, 119, 158
- Квантовая механика 68, 149, 158
— теория 16, 63, 67, 84, 86, 138
- Кванты 69, 85, 86
- Кварковая теория 137–139, 158
- Кельвина шкала 58, 158
- Кислород 95, 96
- Классическая механика 68
- К-мезоны 135
- Кометы 29
- Конечная Вселенная 15, 45, 108–109
— в модели Фридмана 45
— и космическая плотность 147
— тяготение 43
— электрический заряд 99
- Конечное пространство 43
- Космическая плотность и критическая плотность 147
— оценка величины 49–51
- Космическая температура 81, 90–93, 101, 105–110, 149
- Космический фон микроволнового излучения *см.* также Микроволновое излучение, Микроволновый шум, 73, 75, 100, 104, 115, 147, 148
— в теории большого взрыва 124
— и тепловое равновесие 80, 143
— изотропность 79
— как излучение черного тела 77–78
— открытие 54–59
— предсказание 124–126
— причины отказа от поисков 127–132
— технические возможности обнаружения 126
- Космический фон нейтрино 119–120
- Космическое излучение 12, 101, 118, 158
- Космологическая постоянная 44, 45, 50, 159
- Космологический принцип 35, 36, 38, 79, 121–122
— определение 33, 159

- Крабовидная теманность (M 1) 29
- Красное смещение в модели Эйнштейна 44
- в модели де Ситтера 44
 - в сжимающейся Вселенной 148
 - галактик 32
 - и длины волн нейтрино 110
 - — фотонов 85
 - излучения 60
 - Капеллы 26
 - квазаров 40
 - кривая зависимости от расстояния 50
 - определение 159
 - различные интерпретации 41
 - световые волны 42–43
 - эквивалентная температура фона излучения 60
 - эффект 73
- Критическая плотность 51, 81, 159
- в моделях Фридмана 45, 48
 - и постоянная Хаббла 46
 - математическое дополнение 169
- Критическая температура 159
- Лептонное число 98, 104, 106, 107
- определение 97–98
 - плотность 102, 120
- Лептоны 97, 102, 104, 135, 137, 159
- Линии поглощения 76, 117–118
- Литий 119
- Луна 21, 24, 27
- Лямбда-гипероны 135
- Магнетизм 97
- Магний 26
- Максвелловская теория электромагнетизма 97
- Максимальная температура 136
- Мезоны 160
- Микроволновое излучение в сжимающейся Вселенной 148
- определение 56, 160
 - происхождение 72
- Микроволновой шум 56
- «Младшая Эдда» 14, 18, 150
- Млечный Путь 27–30, 54, 79, 160
- Молекулы 15, 76, 95, 96, 117, 149
- сильные взаимодействия 133
- Мюон 89, 97, 104, 105, 132
- как лептон 135, 160
- Натрий 26
- Неабелевы калибровочные теории 138, 141
- Неевклидова геометрия 44
- Нейтральные токи (открытие) 141
- Нейтрино 98, 102, 104, 124, 132, 160
- в первые 3 мин Вселенной 16, 17, 106–110
 - как лептоны 135
 - космический фон 147–148
 - обнаружение 127
 - температура в настоящее время 119–121
 - типы 98
 - характеристики 102–104
 - через первые 34 мин Вселенной 114
- Нейтронные звезды 147
- Нейтронный распад 98, 140

- Нейтрон-протонный баланс 114, 120, 125
- Нейтроны 81, 93, 96–98, 135
- в кварковой модели 138–139
 - в первые 3 мин Вселенной 108–114
 - в первые 3 мин Вселенной 17
 - в сжимающейся Вселенной 149
 - в сильных взаимодействиях 133
 - в теории большого взрыва 124, 127
 - как стабильные барионы 100
- Нуклеосинтез 113, 114, 116, 123, 149
- звездная теория 128–129
 - современная теория 129
 - теории большого взрыва 124
- Ньютоновская постоянная 162
- Область Рэлея–Джинса 75
- Обсерватории: Гарвардского колледжа 31
- Лоуэлловская 32
 - Маунт – Вилсон 31, 38
 - Маунт – Гамильтон 38
 - Паломарская 38
 - Хейльская 40
- Общая теория относительности 37, 43, 47, 49, 161
- Однородность в космологических моделях 44, 45
- во Вселенной 35, 121–122
 - определение 161
 - принцип однородности 34
- Относительность, общая теория 37, 43, 47, 49, 161
- специальная теория 37, 86, 89, 164
- Отношение числа фотонов к числу ядерных частиц 81, 116–120, 123, 124, 129, 130
- в теории стационарного состояния 151
 - в теперешней Вселенной 81, 101, 122
 - в эру преобладания излучения 83
 - и космическая распространённость дейтерия 116–120
 - следствия 81–83
 - таблица возможных значений 116
- Параметр замедления 161
- Парсек 161
- Пары частица-античастица 89–91
- Пи-мезоны 132, 161
- как адроны 135, 136
 - пороговая температура для мезонов 135
 - фазовый переход 141
 - характеристики 105
- Планковская формула для излучения черного тела 73
- Плеяды (М 45) (созвездие) 29
- Плотность 161
- Плотность энергии в ранней Вселенной 91–93
- в течение первых 3 мин 107, 109, 110
 - и длина волны 75
 - через первые 34 мин 114
- Плутоний 70

- Позитроны 88–89, 91, 97, 105,
119, 124, 149, 161
— в первые 0,01 с Вселенной
106–109
— — 3 мин Вселенной 16, 17,
106–112
— открытие 89, 127
— через первые 34 мин Вселен-
ной 113
- Полярная звезда 20
- Пороговая температура 88–92,
100, 104–106, 109, 110, 162
- Постоянная Больцмана 87, 88,
91, 108, 162
— Планка 162
— Хаббла 46, 48, 148
— — и определение возраста
Вселенной 39
— — и оценка размера Вселен-
ной 108
— — и характерное время рас-
ширения 107
— — определение 38
— тонкой структуры 134, 162
- Принцип исключения Паули 91,
162
- Программа Хаббла 49
- Протоны 89, 97, 132, 163
— в модели кварков 139
— в первые 3 мин Вселенной 17,
18, 107–112
— в сжимающейся Вселенной
149
— в сильных взаимодействиях
132, 133
— и ядро гелия 127
— как барионы 97, 100
— отношение числа протонов к
числу фотонов 81
— плотность 81
— после первых нескольких ми-
нут Вселенной 93
— через первые 34 мин Вселен-
ной 114
— энергия 83
- Радиоастрономия 54, 74–78, 130
- Радиосум 54–58
- Распределение Планка 67, 68,
74–78, 163
— Рэлея – Джинса 66
- Распространенность нейтрино
144
- Расширение Вселенной 22, 49,
105, 146
— и излучение 60, 62, 73
— и температура 85
— изотропное 52
— общие выводы 52
— ошибочные взгляды 46
— скорость расширения 86, 92,
107, 109
— теорема Биркгофа и р. В. 47
- Резерфорд Эрнест 41
- Рекомбинация 163
- Рентгеновское излучение 59
- Ро-мезоны 136, 163
- Сатурн 26
- Сверхновые 31, 119, 128, 163
- Свет в ранней Вселенной 42
— как излучение 59
— квантовая теория 86
- Светимость абсолютная 32, 50,
154
— видимая 32, 37, 50, 155
- Световой год 163
- Световые волны и фотоны 63

- и эффект Доплера 22
- Сигма-гипероны 135
- Сильные взаимодействия элементарных частиц 133–140, 142, 163
- Скорость света 26, 36, 164
 - и горизонт Вселенной 51
 - и специальная теория относительности 86
- Слабые взаимодействия элементарных частиц 140–142, 163
- Собственное движение: определение 21, 164
- Созвездия: Андромеды 28
 - Девы 33, 36, 37
 - Змееносца 76
 - Ориона 29
- Солнечная система 21, 27
 - движение 33, 79
 - положение в Млечном пути 28
- Солнце, гелий 115
 - дейтерий 117–118
 - длина волны света 71
 - нейтринное излучение 103
 - ньютонова теория происхождения 43
 - спектр 26
 - температура 71, 89
- Соотношение период–светимость для цефеид 32, 39
- Сохраняющиеся величины 94–98
- Спектр Змееносца 76
 - Солнца 26
 - ультрафиолетовый 117
- Спектральные линии *см.* также
 - Линии поглощения, 24, 26
- Специальная теория относительности 37, 86, 89, 164
- Спин 165
- Спиральные туманности 30, 31
- Спутники Земли (искусственные) 78
 - «Коперник» 117–118
 - «Эхо» 54
- Средний свободный пробег 165
- Стандартная модель 10, 17, 115, 116
 - и будущее Вселенной 147
 - и Космологический Принцип 121, 122
 - обзор следствий 15–18
 - предварительные условия для признания 42
 - предположения 104
- Статистическая механика 65, 69, 91, 96, 106, 131, 144
 - и постоянная Больцмана 87
 - и энергия фотонов 70
- Стационарного состояния модель 19, 41, 129, 151
- Стратоны 138
- Температура антенны (отличие от эквивалентной температуры) 58
 - в сжимающейся Вселенной 148
 - в течение первых 3 мин 106–113
 - в эру преобладания излучения 83
 - до первой 0,01 с 144
 - и кварковая модель 138
 - и планковское распределение 68
 - и плотность нейтрино (математическое дополнение) 179

- и тепловое равновесие 65–68, 95
- свыше 100 000 миллионов градусов 133, 143, 144, 149
- через 34 мин 40 с 113
- через 700 000 лет 115
- Теорема Биркгофа 47
- Теория стационарного состояния 50, 165
- Тепловое равновесие 90, 99, 101, 105, 165
- в нейтрон-протонном балансе 114
- в первые 0,11 с Вселенной 109
- в первые 1,09 с Вселенной 110
- в течение первой секунды Вселенной 144
- в течение первых 0,01с Вселенной 106–109
- и гравитационное излучение 145
- и излучение 72, 74, 75
- и нейтрино 106, 119
- и температура 65–68
- объяснение 65–68, 96
- при эволюции Вселенной 66
- Тритий (^3H) 111, 165
- Туманности 28–33, 165
- Туманность Андромеды 29–33, 56, 166
- Ориона (М 42) 29
- Тяжелая вода (НБО) 117
- УВЧ полоса 56
- Углерод 76, 128
- Ультрафиолетовое излучение 166
- Ультрафиолетовые линии поглощения 117–118
- Ультрафиолетовый свет 59, 117
- Уран-235 41
- Уран-238 41
- Фазовый переход в ранней Вселенной 140–142
- определение 140, 166
- Формула Планка для излучения черного тела 67
- Фотоны 16, 69, 119, 133, 134, 166
- барионное число 99–102, 104
- в квантовой теории 63, 86
- в первые 3 мин Вселенной 106–113
- в первые 34 мин Вселенной 114
- в сжимающейся Вселенной 149
- в теории кварков 137
- в эру преобладания излучения 85, 86
- длина волны 70–73, 77, 85
- и другие частицы 64, 89
- и линии поглощения 76
- как излучение 67, 68
- космический заряд 99
- лептонное число 104
- описание 63
- плотность 81, 99, 100, 102
- спин 91
- среднее свободное время 64
- через первые 700 000 лет Вселенной 64
- энергия 69
- Фотосинтез 70
- Фридмановские модели 45, 48, 49, 160
- Характерное время расширения 107, 109, 110, 114

- определение 39, 166
- «Холодная нагрузка» 55, 78
- Хром 26
- Частота 166
- Черные дыры 147
- Черные карликовые звезды 147
- Шкала времени расширения
(математическое дополнение) 171
- Шум *см.* Электрический шум,
Радиошум
- Эквивалентная температура
микроволнового фона излу-
чения 59, 74, 80
- определение 58, 67
- Электрический шум 54–57
- Электронвольт 69, 87, 167
- Электроны 70, 87–95, 104, 105,
127, 166
- в первые 3 мин Вселенной 16–
18, 106–113
- в сжимающейся Вселенной
149
- в теории большого взрыва
124
- в эру преобладания излуче-
ния 85, 86
- вычислительная вероятность
рассеяния 133
- захват 81
- и лептонное число 102, 104
- и сильные взаимодействия
135
- и фотоны 64
- как лептоны 98
- тепловое движение 54, 57
- через первые 34 мин Вселен-
ной 113
- Эллиптические туманности 30
- Энергия покоя 86–88, 167
- химических реакций 70, 87
- ядерных реакций 70
- Энтропия 99, 151, 167
- Эра преобладания вещества 83,
85
- излучения 83, 85
- Эрг 167
- Эта-мезоны 135
- Ядерная демократия 136, 167
- Ядерные частицы 93, 97, 100,
102, 167
- в эру преобладания излуче-
ния 85, 86
- как адроны 135
- отношение к числу античас-
тиц 100, 102
- плотность энергии 91, 93
- теперешняя плотность 81,
123
- Ядро *см.* Атомные ядра

Стивен Вайнберг

ПЕРВЫЕ ТРИ МИНУТЫ

Современный взгляд на происхождение Вселенной

Дизайнер М. В. Ботя

Технический редактор А. В. Широбоков

Компьютерная подготовка О. С. Михайловой

Компьютерная графика М. А. Дьячковой

Корректоры О. Ю. Кучеренко, М. А. Ложкина

Подписано к печати 10.10.00. Формат $84 \times 108^{1/32}$.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,28. Уч. изд. л. 13,83.

Гарнитура Computer Modern Roman. Бумага офсетная № 1.

Тираж 1000 экз. Заказ №

Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика»

426057, г. Ижевск, ул. Пастухова, 13.

Лицензия на издательскую деятельность ЛУ № 084 от 03.04.00.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов в ГИПП «Вятка».

610033, г. Киров, ул. Московская, 122.
