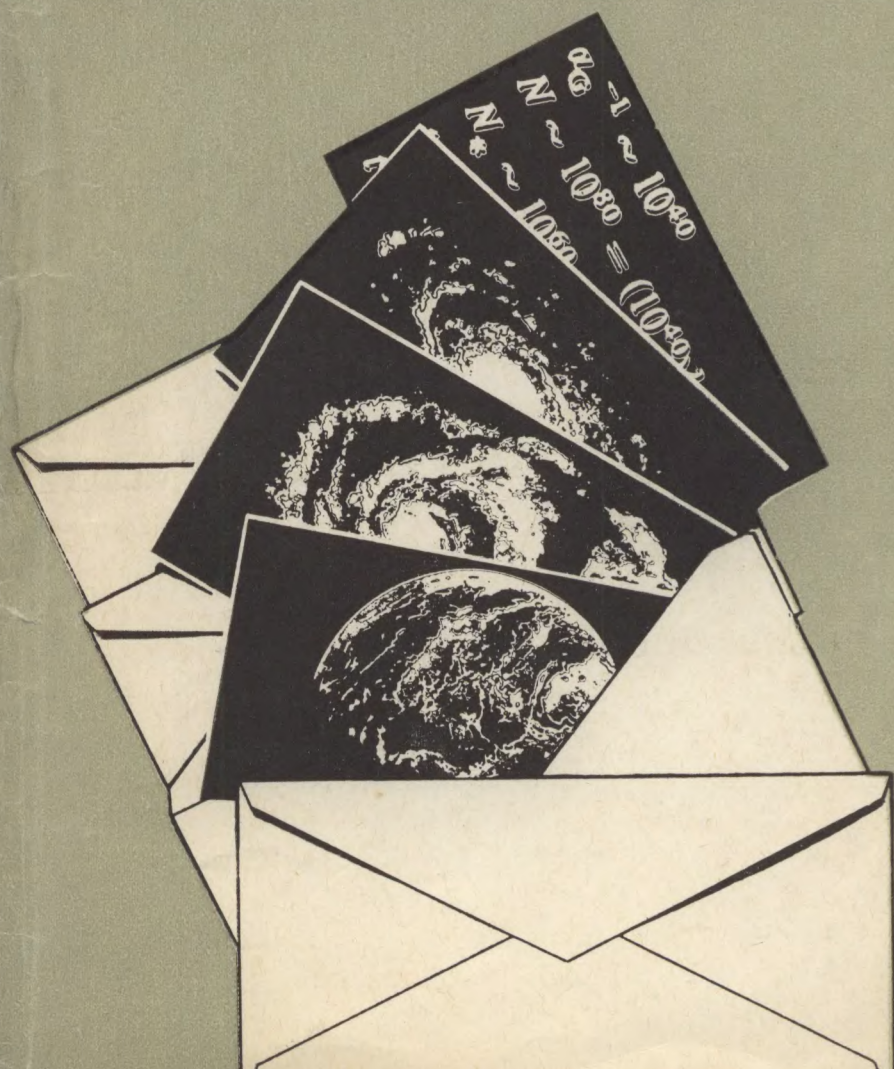


П. ДЕВИС

СЛУЧАЙНАЯ ВСЕЛЕННАЯ



СЛУЧАЙНАЯ
ВСЕЛЕННАЯ

THE ACCIDENTAL UNIVERSE

P.C.W. DAVIES

**Professor of Theoretical Physics,
University of Newcastle-upon-Tyne**

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

Cambridge

**London New York New Rochelle
Melbourne Sydney**

П.ДЕВИС

СЛУЧАЙНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Перевод с английского
д-ра физ.-мат. наук В. Е. Чертопруда
под редакцией
д-ра физ.-мат. наук А. Г. Дорошкевича



МОСКВА «МИР» 1985

ББК 22.68
Д25
УДК 52 + 53

Девис П.

Д25 Случайная Вселенная: Пер. с англ. В. Е. Черто-
пруда / Под редакцией и с предисловием А. Г. До-
рошкевича. — М.: Мир, 1985, 160 с., ил.

Почему Вселенная именно такова, какой мы ее наблюдаем? Почему в ней существуют галактики, звезды и планеты? Случайно ли появление человека? Есть ли другие вселенные, познаваемые разумными существами? Какой была бы Вселенная, если бы физические фундаментальные постоянные имели значения, хотя бы немного отличающиеся от известных ныне значений? На эти вопросы пытается дать ответ известный английский астрофизик и популя-
ризатор науки.

Доступна широкому кругу читателей, интересующихся проблемами совре-
менной науки.

Д $\frac{1705010000-327}{041(01)-85}$ 77—85, ч. 1

ББК 22.68
528

*Редакция литературы по космическим исследованиям,
астрономии и геофизике*

Пол Девис

СЛУЧАЙНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Ст. научный редактор М. Я. Рутковская
Художник Е. Л. Вельчинский. Художественный редактор В. И. Шаповалов
Технический редактор Н. И. Манохина. Корректор В. И. Постнова

ИБ № 5185

Сдано в набор 08.10.84. Подписано к печати 31.01.85. Формат $84 \times 108^{1/32}$. Объем 2,5 бум. л. Бумага кн. журн. № 2. Печать высокая. Гарнитура литературная. Усл. печ. л. 8,40. Усл. кр.-отт. 8,62. Уч.-изд. л. 7,86. Изд. № 27/3603. Тираж 30 000 экз. Зак. 780. Цена 40 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» 129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

© Cambridge University Press 1982

This book was originally published
in the English language by Cambridge
University Press of Cambridge, England

© Перевод на русский язык, Мир, 1985

Как известно, в науке часто труднее всего ответить на самые «простые» вопросы. Такие вопросы почти всегда затрагивают основы наших знаний, и их решение иногда ведет к коренной перестройке установившихся представлений. Особенно много «простых» вопросов возникает в последние годы на стыке физики элементарных частиц и космологии. Знаменательно, что в настоящее время происходит все более тесное объединение этих двух разделов науки. Этот на первый взгляд неожиданный процесс объединения физики микро- и макромира становится понятным, если учесть, что в физике высоких энергий теория сегодня уже имеет дело с энергиями, на много порядков величины превосходящими обозримые перспективы эксперимента. Тем самым ранняя Вселенная, в которой, вероятно, достигались необходимые энергии, становится уникальной областью приложения новейших теорий элементарных частиц, а анализ наблюдаемых следствий моделей ранней Вселенной позволяет проверять некоторые гипотезы физики высоких энергий. В этой связи можно напомнить о не увенчавшихся успехом, но исключительно поучительных поисках кварков и магнитных монополей, активно изучаемой проблеме массы покоя и, возможно, нестабильности нейтрино и, наконец, громадных достижений последних лет в построении теории ранних стадий эволюции Вселенной.

Многие «простые» вопросы сейчас активно разрабатываются и широко обсуждаются в научной и научно-популярной литературе. Некоторым из актуальных вопросов такого типа и посвящена предлагаемая книга.

Книга интересна с нескольких различных точек зрения. Прежде всего ее автор, известный английский астрофизик и популяризатор науки, очень коротко останавливается на современных представлениях о структуре микромира, управляющих им законах, в самых общих чертах касается вопросов строения и эво-

люции Вселенной. Далее он показывает, как немногие основные законы физики определяют строение окружающего мира во всех масштабах — от атомных ядер до гигантских скоплений галактик. При этом автор обращает внимание на то, что окружающий нас мир очень чувствителен к значениям фундаментальных физических постоянных и, возможно, существует благодаря выполнению очень жестких соотношений между ними.

К этим вопросам тесно примыкает известная проблема «больших чисел» в космологии, проблемы однородности и изотропии наблюдаемой Вселенной и интересные соотношения между средней плотностью Вселенной и постоянной Хаббла. В заключение автор останавливается на антропном (или антропологическом) принципе, согласно которому Вселенная обладает наблюдаемыми свойствами потому, что только эти свойства допускают возможность существования человека-наблюдателя.

С точки зрения современной космологии допустимо огромное разнообразие вселенных, и мы, несмотря на все успехи последних лет, все еще не можем объяснить происхождение некоторых свойств и особенностей нашей Вселенной. Однако, как пишет В. В. Казютинский, «способы отражения свойств Вселенной в системе знаний существенно зависят от биологической организации познающего субъекта, особенностей уровня развития его социально-практической и познавательной деятельности. И если это верно, то ответ на вопрос: «Почему Вселенная именно такова, какой мы ее наблюдаем?», содержащийся в антропологическом (антропном) принципе, отнюдь не исчерпывает сути дела, поскольку он сформулирован в «объектном», а не в деятельностном плане. Простая ссылка на *существование* познающего субъекта оказывается далеко не достаточной. Вселенная оказывается такой, какой мы ее наблюдаем, не только в силу присущих ей объективных свойств, но также и потому, что «образы» Вселенной на различных этапах развития науки — это «срезы» материальной действительности, формируемые в контексте всей системы практической и познавательной деятельности человечества.» (В. В. Казютинский. Ми-

ровоззренческие и методологические аспекты антропологического (антропного) принципа в космологии, в сб. Социологические проблемы космонавтики и внеземных цивилизаций, Труды шестнадцатых Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского, (Калуга, 14—17 сентября) — М., 1982.)

В последние годы в значительной степени благодаря работам советских астрофизиков А. Д. Линде и А. А. Старобинского наметились очень интересные пути разрешения некоторых из описанных в книге «загадок». Развита в деталях уже после выхода в свет английского издания книги теория ранних стадий эволюции Вселенной — модель раздувающейся Вселенной — непринужденно объясняет наблюдаемую однородность и изотропию, а также близость средней плотности Вселенной к критическому значению, при котором сопутствующее пространство обладает псевдоевклидовой геометрией. Попутно объясняется, почему не удастся наблюдать магнитные монополи, предсказываемые современными теориями, а также решается задача возникновения начальных неоднородностей, необходимых для образования наблюдаемой структуры Вселенной (галактики, скопления и сверхскопления галактик). Кроме того, обращается задача нахождения числа $S = n_\gamma / n_b$ — отношения плотности фотонов реликтового излучения n_γ к плотности барионов n_b , поскольку, согласно этой модели, барионы и антибарионы рождаются в горячей Вселенной после «инфляционной» фазы (фазы раздувания). При таком подходе число S характеризует асимметрию рождения барионов и антибарионов и может быть выражено с помощью постоянных величин теории элементарных частиц. В теории раздувающейся Вселенной естественно решается и проблема космологического Λ -члена. Описание этой модели можно найти в статье А. Гута и П. Стейнхардта «Раздувающаяся Вселенная» (В мире науки, № 7, с. 56, 1984).

Можно полагать, что в разрабатываемых теперь теориях типа супергравитации или моделей «пенистой» Вселенной удастся сделать и следующий шаг на пути объединения всех четырех типов взаимодействий в

одно фундаментальное взаимодействие. При этом, вероятно, получают естественное объяснение и проблема больших чисел, и другие затронутые в книге «простые» вопросы. Тем не менее нельзя забывать, что в физике разрешение парадоксов, как правило, сводится к тому, что удастся с единых позиций объяснить несколько, казалось бы, разнородных явлений и уменьшить число «фундаментальных» постоянных. Поэтому не исключено, что и впредь будут возникать вопросы типа: почему та или иная постоянная имеет именно такое, а не иное значение, с какой вероятностью это возможно и т. д. Подобные рассуждения и оценки имеют главным образом эмоциональный характер, поскольку никогда не удастся достаточно строго определить однородное множество событий, на котором можно было бы выделить вероятность появления желаемого события. Кроме того, оценки типа рассматриваемых в книге характеризуют лишь вероятность случайного совместного выпадения нескольких событий. Эти оценки не применимы к причинно связанным событиям, а как показывают приведенные примеры, рано или поздно причинная связь обнаруживается и вероятностные соображения теряют всякий смысл.

Несмотря на сделанные замечания, книга представляет интерес для широкого круга читателей. Разумеется, ссылки на бога носят нейтральный характер и, как в известных высказываниях А. Эйнштейна, по существу являются лишь литературным приемом. В составленной автором библиографии указаны книги для дальнейшего чтения как по обсуждаемым, так и по смежным вопросам. Библиография доведена до 1981 г., причем многие из упомянутых книг переведены на русский язык. В качестве дополнения можно указать следующие книги советских авторов:

Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1975.

Новиков И. Д. Эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1979.

Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. Происхождение галактик и звезд. — М.: Наука, 1983.

Современное состояние некоторых затронутых в

книге вопросов изложено в научных и научно-популярных обзорах:

де Витт Б. С. Квантовая гравитация. — В мире науки, № 2, с. 50, 1984.

Долгов А. Д., Зельдович Я. Б. Космология и элементарные частицы. — Успехи физ. наук, 130, с. 559, 1980.

Зельдович Я. Б. Почему расширяется Вселенная. — Природа, № 2, с. 66, 1984.

Силк Д., Салаи А., Зельдович Я. Б. Крупномасштабная структура Вселенной. — В мире науки, № 12, с. 26, 1983.

Шандарин С. Ф., Дорошкевич А. Г., Зельдович Я. Б. Крупномасштабная структура Вселенной. — Успехи физ. наук, 139, с. 83, 1983.

Шкловский И. С. Что было, когда ничего не было? — Земля и Вселенная, № 4, с. 34, 1984.

12 сентября 1984 г.

А. Г. Дорошкевич

Вопреки громадному прогрессу в понимании основных сил природы, достигнутому физиками в последние годы, многие фундаментальные свойства физического мира все еще кажутся случайными и бессмысленными. Почему пространство трехмерно? Почему гравитационное взаимодействие настолько слабо? Почему масса протона в 1838 раз превосходит массу электрона? И так далее.

Числовые значения таких фундаментальных постоянных, как заряд электрона, масса протона и ньютоновская постоянная тяготения, хотя и таинственны по своей природе, но их значения точно отражаются в структуре наблюдаемой Вселенной. По мере проникновения в тайны строения все большего числа физических систем, от атомных ядер до галактик, ученые все яснее осознают, что многие свойства этих систем удивительно чувствительны к точным значениям фундаментальных постоянных. Так, если бы природа «выбрала» немного иную последовательность чисел, то мир был бы совершенно другим. Не исключено, что человека вообще не было бы и некому было бы познавать Вселенную.

Но еще более удивительно то, что некоторые важные для нас структурные единицы, такие, как звезды типа Солнца, своими свойствами обязаны маловероятным совпадениям чисел, которые построены из фундаментальных постоянных, относящихся к разным разделам физики. А когда космологи занялись изучением строения и эволюции Вселенной, недоумение возросло. Установленные свойства ранней Вселенной показывают, что начальные параметры расширяющейся Вселенной были согласованы с поразительной точностью.

Многие из этих «случайностей природы» известны уже десятилетия. В 1930-х годах Эддингтон и Дирак были поражены любопытным и неожиданным совпадением некоторых очень больших чисел, рассчитанных исходя из атомной физики и космологии — явно не-

связанных областей физики. Эти и другие примеры создают впечатление, что Вселенная приведена какими-то способами в точное равновесие.

Единственная (кроме библейской) систематическая попытка объяснить своеобразие физического мира развилась на основе радикального отхода от традиционной схемы научного мышления. Названная *антропным принципом*, эта идея призвана связать основные особенности мира с существованием человека в качестве наблюдателя. У истоков этого принципа стоял такой великий физик, как Больцман, а в последние годы к антропному принципу вновь обратился ряд выдающихся ученых, в том числе Брандон Картер, Роберт Дикке, Фримен Дайсон, Стивен Хокинг, Мартин Рис и Джон Уилер. Некоторые из них утверждают, что существование человека можно рассматривать как биологический селективный эффект, позволяющий объяснить численные значения фундаментальных физических постоянных, не поддающиеся никакому другому объяснению.

Хотя философские основы антропного принципа вызывают возражения у некоторых авторов, трудно не поразиться невероятным случайностям, без которых было бы невозможно существование человека. Обзору некоторых из этих удивительных случайностей и численных совпадений и посвящена данная книга, причем дискуссионный вопрос об антропном принципе поднят лишь в последней главе.

Книга рассчитана на широкий круг читателей и в равной степени адресована как ученым, так и неспециалистам, интересующимся наукой. Для студентов, изучающих философию и естественные науки, книга в основном доступна, от них требуется только знакомство с основами физики. В гл. 1 кратко описана большая часть сведений по физике, необходимых для понимания последующих глав. Уровень книги примерно соответствует уровню журналов *Scientific American* (в русском переводе «В мире науки») или *New Scientist*. Там, где используется математика, она почти всегда ограничена только элементарной алгеброй.

В основе книги лежит несколько превосходных специальных обзоров, которые уже были опубликова-

ны. Чтобы не нарушать изложение, я привожу библиографию в конце книги к каждой главе в отдельности.

Я особенно благодарен д-ру Бернарду Карру и профессору Мартину Рису, обзорные статьи которых широко использованы при написании книги. Им, а также д-рам Джону Барроу, Франку Типлеру и Джону Лесли я обязан многими ценными замечаниями и советами. Мне также были весьма полезны ценные дискуссии с сотрудниками физического и философского факультетов Кентерберийского университета в Новой Зеландии.

П. Девис

Математические соотношения, представляющие наибольший интерес в этой книге, не являются точными уравнениями, а представляют собой неравенства или приближенные равенства. Чаще всего используется символ $\sim$, он означает, что две величины равны по порядку величины, например $7 \cdot 10^8 \sim 5 \cdot 10^9$. Стоящий перед одиночным символом знак $\sim$ означает «по порядку величины». Например, $\sim 10^3$ может означать как 630, так и 2018. Символы $>$ и $<$, как обычно, означают «больше чем» и «меньше чем», символ $\gtrsim$ означает «больше чем примерно» некоторое число; соответствующий смысл имеет и $\lesssim$.

Иногда используется символ $\approx$. Он означает приближенное равенство и применяется к величинам, равным с точностью до множителя два или около этого. Таким образом, $\pi^2 \approx 10$. Наконец, $\equiv$ используется для обозначения «по определению», например $\alpha \equiv \equiv e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$. Читатели, желающие проводить вычисления с большей точностью, найдут в табл. 3 численные значения фундаментальных постоянных и в табл. 5 другие полезные сведения.

В книге всюду использована Международная система единиц (СИ). Почти во всех работах, приведенных в библиографии, используются либо система единиц СГС (особенно в астрономических работах), либо специальные системы единиц, в которых все или некоторые из постоянных $\hbar$, c , G и k принимаются равными 1. Поскольку в системе СИ электрический заряд в вакууме e^2 умножается на $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$, где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума, мы будем сохранять во всех выражениях в явном виде множитель 4π , связанный с e^2 даже тогда, когда другие множители и степени π опущены и дается приближенное выражение. Кроме того, мы здесь не будем рассматривать среду с диэлектрической постоянной, отличной от нуля, поэтому для краткости индекс нуль при ϵ опущен.

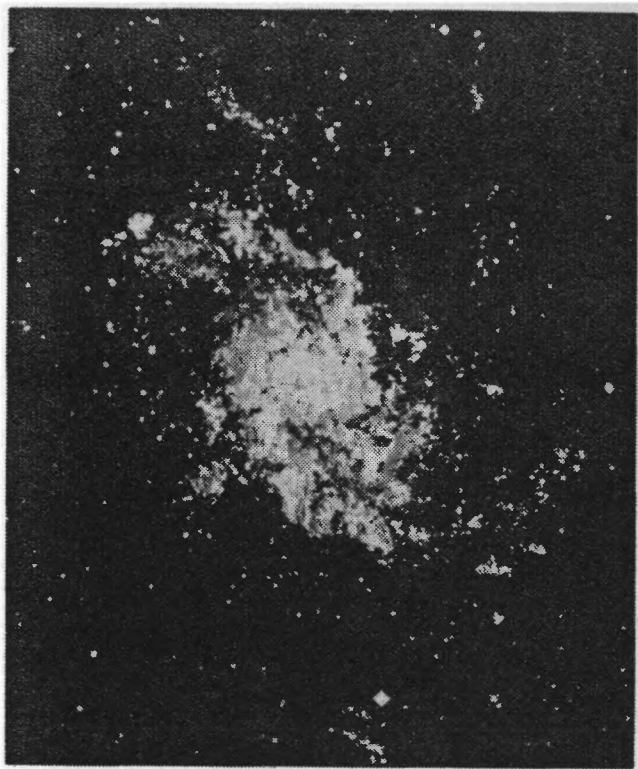


Рис. 2. Типичная спиральная галактика в созвездии Треугольника. Наша Галактика при наблюдении с большого расстояния выглядела бы аналогично.

Галактики в наблюдаемой Вселенной образуют скопления, насчитывающие от нескольких десятков до многих тысяч объектов. Согласно данным наблюдений, вещество и излучение во Вселенной в еще больших масштабах распределены удивительно равномерно. Их распределение не зависит ни от направления (изотропия), ни от расстояния (однородность).

В целом скопления галактик, конечно, не находятся в покое. Сила гравитации беспрестанно стремится объединить рассеянное вещество в более компактные сгустки, так что в веществе происходит противобор-

ство между силой гравитации и противодействующими силами. Гравитация отчасти одержала верх в таких относительно малых объектах, как звезды и планеты. Плотность вещества в них примерно в 10^{30} раз выше средней плотности вещества во Вселенной.

Более крупные системы — галактики и их скопления — избежали катастрофического гравитационного коллапса, потому что они вращаются и движутся относительно друг друга. Гравитационному коллапсу противостоят центробежные силы. Кроме того, падению скоплений галактик друг на друга мешает непрерывное расширение Вселенной в целом, так что каждое скопление постепенно удаляется от своих соседей. Открытое Эдвином Хабблом в 1920-х годах расширение Вселенной является краеугольным камнем современной космологии и лучше всего представляется как непрерывное «разрастание» или растяжение сопутствующего пространства. По мере того как пространство между галактиками расширяется, галактики удаляются друг от друга.

Как и в случае распределения вещества, это расширение, на удивление, равномерно всюду во Вселенной. И поскольку крупномасштабное распределение вещества во Вселенной весьма однородно, движение всей совокупности можно охарактеризовать одним параметром — скоростью удаления друг от друга двух типичных галактик, находящихся на определенном расстоянии. Этот параметр называется постоянной Хаббла и обозначается буквой H . Астрономы часто принимают, что H близко к $50 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпс})$. Это значит, что две галактики, расстояние между которыми, скажем, 10 Мпс (около 30 млн. световых лет), удаляются друг от друга со скоростью около $500 \text{ км}/\text{с}$. В более привычных единицах $H \approx 10^{-18} \text{ с}^{-1}$.

Если сейчас галактики удаляются друг от друга, значит, в прошлом они находились ближе друг к другу. Размерность величины H — скорость, деленная на расстояние, — обратна размерности времени. Следовательно, величина, обратная H , дает фундаментальную единицу времени (время Хаббла), определяющую изменение космологических параметров. Величина H^{-1} приблизительно равна 10^{10} лет. Из этого

следует, что 10^{10} лет назад крупномасштабная структура Вселенной должна была сильно отличаться от современной, а галактики располагались значительно ближе друг к другу.

Вселенная медленно расширяется, а галактические гравитационные силы сдерживают разбегание галактик. Поэтому можно ожидать, что величина H , характеризующая темп расширения, будет понемногу уменьшаться, подобно тому как постепенно замедляется снаряд, выпущенный вертикально вверх. И действительно, имеются некоторые данные наблюдений, свидетельствующие об уменьшении скорости космологического расширения.

Если принять, что темп расширения Вселенной замедляется, то из этого следует, что 10^{10} лет назад скорость расширения была выше, чем теперь. При экстраполяции назад во времени следует ожидать, что скорость расширения была больше, иначе галактики упали бы друг на друга под действием взаимного притяжения. Экстраполируя в прошлое насколько возможно, получим, что около 18 млрд. лет назад Вселенная имела бесконечно большую плотность и расширялась бесконечно быстро. Поскольку фаза расширения из сингулярного состояния началась конечное время назад, обычно считается, что она описывает фактическое образование наблюдаемой Вселенной.

На рис. 3 показано, как символический объем пространства (например, один кубический световой год по современным измерениям) расширялся от нулевого момента времени из сингулярного состояния. Обратите внимание на быстрое замедление скорости расширения на ранних стадиях и на достижение постоянной скорости (постоянный наклон графика), предсказываемое в будущем. Это постепенное замедление обусловлено тем, что гравитация слабеет по мере расширения. С увеличением расстояний между галактиками их взаимное гравитационное воздействие, сдерживающее расширение, уменьшается. Вследствие быстрого начального замедления темпа расширения время Хаббла приближенно (с точностью до множителя $3/2$) равно возрасту Вселенной. Значит, несмотря на свое название, H не является постоянной.

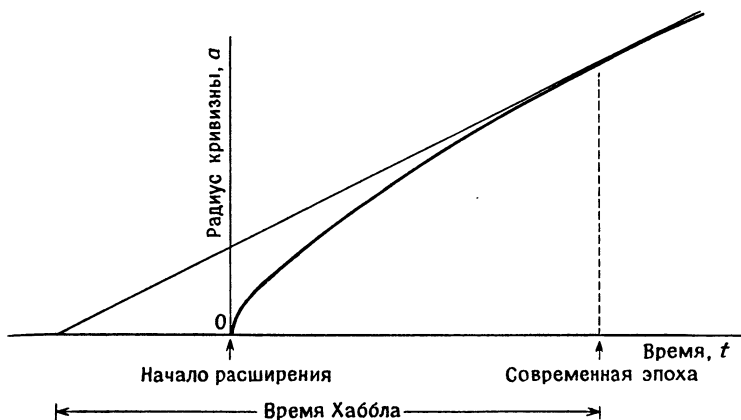


Рис. 3. Расширяющаяся Вселенная. Пространство непрерывно увеличивает объем, приводя к снижению плотности вещества и разбеганию галактик. Кривая показывает, что типичный сферический объем пространства растет со временем с уменьшающейся скоростью. Современная скорость расширения H , определяемая как $\dot{a}/a$ (где a — радиус некоторого типичного сферического объема пространства), дается наклоном касательной, проведенной к кривой в точке, отмеченной «современная эпоха». Пересечение касательной с осью t определяет характерное время H^{-1} , называемое временем Хаббла, которое примерно в полтора раза превышает время, прошедшее от начала расширения Вселенной.

Хотя галактики выглядят островами ярко светящегося вещества в безграничном океане пустого пространства, межгалактическое пространство не абсолютно пустое. Несомненно, там имеется некоторое количество разреженного поглощающего или прозрачного для излучения вещества. Но более важно то, что вся наблюдаемая Вселенная пронизана излучением, температура которого составляет всего около 3 К. Чрезвычайная изотропия этого регистрируемого на Земле фонового излучения и дает надежное свидетельство крупномасштабной однородности Вселенной, ибо фоновое излучение беспрепятственно распространялось на космологические расстояния и любая крупномасштабная неоднородность оставила бы в нем свой отпечаток.

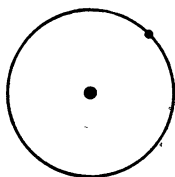
Одна из основных загадок космологии: почему температура фонового излучения равна именно 3 К? По мере расширения Вселенной температура падает. Однако отношение числа тепловых фотонов к числу, скажем, протонов или электронов в некотором большом объеме пространства при расширении Вселенной не изменяется (разд. 2.4). Отношение числа фотонов к числу протонов обозначается буквой S и составляет около 10^9 . Очевидно, фотоны значительно более многочисленны, чем атомы.

Переходя теперь к меньшим характерным размерам, мы встречаемся с самыми распространенными структурными единицами во Вселенной — звездами. Звезды удерживаются в равновесии вследствие того, что сила самогравитации, которая стремится их сжать, уравновешивается внутренним давлением, которое порождается теплом, выделяющимся при ядерных реакциях в недрах звезд. Гораздо меньшие по размерам холодные планеты преодолевают самогравитацию благодаря силам, действующим в твердом веществе, которые по своему происхождению в основном являются электрическими. Звезды часто образуют скопления, в которых насчитывается до миллиона объектов.

При еще меньших характерных размерах мы встречаемся с многочисленными живыми организмами (включая человека), представляющими структуры наивысшей сложности из всех известных. Далее на шкале характерных размеров располагаются живые клетки и биологически активные цепочечные молекулы, такие, как ДНК, еще дальше — атомы, которые, как теперь известно, являются сложными системами с внутренней структурой.

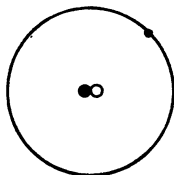
Ядра атомов состоят из частиц двух типов: нейтронов и электрически заряженных протонов. Обе имеют массу около 10^{-27} кг. Среднее время жизни изолированного нейтрона — несколько минут; он распадается на протон и электрон. Кроме того, излучается еще одна частица, названная антинейтрино (античастица нейтрино, разд. 1.3). Нейтрино — электрически нейтральны, вовсе не имеют или имеют малую массу покоя и настолько слабо взаимодействуют с обычным веществом, что легко проходят сквозь всю Землю. По этой

Один протон
Один электрон



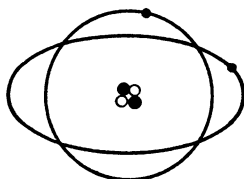
Обычный водород ^1H

Один протон
Один нейтрон
Один электрон



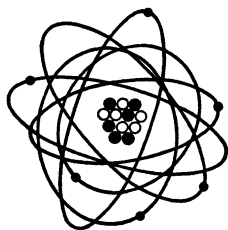
Дейтерий ^2H

Два протона
Два нейтрона
Два электрона



Гелий ^4He

Шесть протонов
Шесть нейтронов
Шесть электронов



Углерод ^{12}C

Рис. 4. Химические элементы. Химические свойства атома определяются зарядом ядра (числом протонов), который точно компенсируется числом электронов. Атом, потерявший электроны, называется ионом. Внешние электроны способствуют образованию связей, объединяющих атомы в молекулы. Самые тяжелые и самые сложные атомы содержат около 250 нуклонов и около 90 электронов.

причине нейтрино в высшей степени неуловимы; лишь после второй мировой войны их существование было доказано экспериментально. Тем не менее нейтрино играют важную роль в структуре Вселенной.

Протон — основной строительный блок атомных ядер (рис. 4). Свойства химических элементов определяются числом протонов в ядре. Ядро простейшего элемента — водорода состоит из одного протона. Изотоп водорода — дейтерий состоит из нейтрона и протона, которые удерживаются вместе. Следовательно, заряд у этого ядра такой же, как у ядра обычного водорода, но масса приблизительно вдвое больше.

Следующий простейший элемент — гелий. Его наиболее распространенный изотоп содержит два протона и два нейтрона. Затем идут: литий, имеющий три протона, бериллий, имеющий четыре протона, и т. д. Важнейшими элементами являются: углерод (шесть протонов), кислород (восемь протонов), железо (26 протонов) и уран (92 протона). Такие тяжелые элементы, как уран, обычно содержат примерно в полтора раза больше нейтронов, чем протонов. Многие из них являются радиоактивными. Элементы тяжелее урана имеют период полураспада меньше, чем возраст Земли, поэтому на Земле они редки.

Протон является частицей первостепенной важности, и его характеристики имеют особый смысл для ядерной (и в итоге атомной и химической) физики. Эти характеристики включают массу, электрический заряд и размер. Размер протона — довольно тонкое понятие (разд. 1.3). Далее размер протона принимается равным примерно 10^{-15} м. Это расстояние можно обратить в фундаментальную единицу времени — интервал, за который свет пересекает протон. Скорость света — это наибольшая скорость, с которой может распространяться информация, и поэтому она имеет особое значение. Время, за которое свет пересечет протон, составляет около 10^{-24} с. Физически это наименьший интервал времени, который требуется, чтобы протон наблюдался как единое целое.

Итак, теперь у нас два естественных масштаба времени: время Хаббла $t_H \sim 10^{10}$ лет и ядерное время

$t_N \sim 10^{-24}$ с. Их отношение — колоссальное число 10^{41} . Происхождение этого числа и то, почему оно столь велико, будет важной темой последующих глав.

1.2. Основные типы взаимодействий

Все многообразие явлений природы обусловлено всего четырьмя типами фундаментальных сил, или взаимодействий: гравитационным, электромагнитным и двумя типами ядерных взаимодействий, называемыми слабым и сильным. В последние годы сделаны попытки описать эти типы взаимодействий в рамках единой математической теории. Эта так называемая теория великого объединения связала слабое ядерное взаимодействие с электромагнитным, а совсем недавно удалось объединить с ними и сильное взаимодействие (табл. 1).

Таблица 1

Фундаментальные взаимодействия

Электрическое Магнитное	Электро- магнитное (Максвелл, 1860)	Электро- слабое (Вайнберг, Салам, 1967)	Теории ве- ликого объедине- ния (1980)	Теория сверхобъ- единения (1990 ?)
Слабое ядерное				
Сильное ядерное				
Гравита- ционное				

Исследования показывают, что всевозможные несопоставимые силы природы представляют собой проявления очень малого числа фундаментальных сил, вероятно даже одной силы. Все известные взаимодействия в конечном счете можно свести к четырем основным типам: электромагнитному, гравитационному, слабому и сильному ядерным. Электромагнитное и слабое ядерное взаимодействия, очень различающиеся физически по своим действиям, — это проявления единого электрослабого взаимодействия. Недавние достижения в физике наводят на мысль, что сильное ядерное взаимодействие, сильно отличающееся от других, можно также включить в эту схему в рамках теории великого объединения. Остается присоединить только гравитацию.

Гравитацию мы постоянно ощущаем в повседневной жизни. Сила гравитации действует между всеми

материальными телами во Вселенной и в хорошем приближении (для звезд и планет) описывается знаменитым законом всемирного тяготения Исаака Ньютона. Согласно этому закону, эта сила обратно пропорциональна квадрату расстояния. Две точечные массы притягивают друг друга с силой, направленной вдоль прямой, их соединяющей:

$$F_{\text{гр}} = -Gm_1m_2/r^2. \quad (1.1)$$

В этой формуле знак минус указывает, что мы имеем дело с силой притяжения, r — расстояние между двумя телами (считается, что размер тел мал по сравнению с r), m_1 и m_2 — массы тел. Величина G — универсальная постоянная и имеет очень важное значение. Она определяет величину гравитационных сил. Пусть m_1 и m_2 — две одинаковые массы, равные, скажем 1 кг, и r — расстояние, скажем 1 м, тогда сила притяжения между ними равна $6,7 \cdot 10^{-11}$ Н. Если бы постоянная G была больше, то и эта сила пропорционально увеличилась бы. Утверждение об универсальности постоянной G означает, что если измерить силу между двумя массами 1 кг, разделенными расстоянием 1 м, то в любом месте Вселенной и в любой момент времени результат всегда будет $6,7 \cdot 10^{-11}$ Н. Следовательно, величину G нужно ставить в один ряд с другими фундаментальными постоянными, как важную постоянную природы, которая определяет структуру гравитирующих систем.

В XX в. Альберт Эйнштейн разработал новую теорию тяготения — общую теорию относительности. Хотя в случае сильных гравитационных полей результаты общей теории относительности отличаются от результатов теории Ньютона, в пределе слабого поля и вдали от гравитирующих тел обе теории совпадают. Таким образом, ньютоновский закон обратной пропорциональности квадрату расстояния и постоянная G остаются в силе и в теории Эйнштейна.

Однако общая теория относительности обладает свойством, которое отсутствует у ньютоновской теории. Наряду с обычной силой притяжения, убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния, она предсказывает, что, возможно, существует дополни-

тельный источник силы гравитации. Эта добавочная сила гравитации характеризуется двумя необычными свойствами. Во-первых, это сила отталкивания, поэтому она приводит к расталкиванию материи, а не к концентрации ее, как в случае ньютоновской гравитации. Во-вторых, сила отталкивания увеличивается с расстоянием, тогда как «обычная» сила гравитации уменьшается в соответствии с формулой (1.1). Следовательно, эффекты дополнительной силы отталкивания будут проявляться только в очень больших масштабах. По этой причине Эйнштейн назвал эту новую силу космологическим членом. Первоначально он ввел его, чтобы объяснить, как Вселенная в целом может избежать сжатия под действием самогравитации. Он ввел космологическое отталкивание, уравнивающее обычную гравитацию, чтобы обеспечить стационарность Вселенной.

Космологический член был введен в общую теорию относительности в 1917 г., а некоторое время спустя Хаббл открыл, что Вселенная вовсе не стационарна, а находится в состоянии расширения. Галактики преодолевают взаимное гравитационное притяжение благодаря разбеганию. Осознав это, Эйнштейн назвал введение космологического члена великой ошибкой и отказался от него. Тем не менее нет априорной причины, чтобы исключить космологический член, и, как мы увидим ниже, современная квантовая теория поля требует, чтобы такой член существовал*. Однако сила отталкивания неимоверно мала. Если представить силу отталкивания F_{cos} в виде

$$F_{\text{cos}} = \Lambda r m c^2, \quad (1.2)$$

где m — масса отталкиваемого объекта, r — его расстояние от отталкивающего тела, c — скорость света, то Λ — постоянный коэффициент с размерностью м^{-2} . (Обратите внимание на то, что сила не зависит от отталкивающей массы.) Современные наблюдения устанавливают верхний предел для $\Lambda = 10^{-53} \text{ м}^{-2}$. Таким образом, два тела массой 1 кг, разнесенные на расстоя-

* В современных теориях Λ -член описывает гравитацию вакуума. — *Прим. ред.*

ние один метр, испытывают силу притяжения, по крайней мере в 10^{25} раз превышающую космическое отталкивание. С другой стороны, две галактики массами, скажем, 10^{41} кг, на расстоянии 10^6 световых лет (около 10^{22} м) друг от друга испытывали бы сравнимые силы притяжения и отталкивания, если бы Λ было близко к указанному верхнему пределу. Поэтому, хотя Λ до сих пор еще не измерено, мы все же будем считать его универсальной постоянной, имеющей фундаментальное значение для крупномасштабной структуры Вселенной.

Перейдем к электромагнетизму. Как электричество, так и магнетизм обусловлены электрическим зарядом. Сила взаимодействия между двумя электрическими зарядами сложным образом зависит как от их положения, так и от движения, поскольку электрический и магнитный эффекты взаимозависимы. Однако имеется один простой случай, который осуществляется, когда два заряда неподвижны. Если заряды соответственно равны e_1 и e_2 и каждый сосредоточен в точке, то взаимодействие между ними F_{el} является чисто электрическим и описывается формулой почти идентичной (1.1):

$$F_{el} = e_1 e_2 / (4\pi \epsilon r^2). \quad (1.3)$$

Сила электрического взаимодействия направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, и является силой притяжения или отталкивания в зависимости от знаков e_1 и e_2 . Здесь ϵ — универсальная постоянная, которая определяет интенсивность электромагнитного взаимодействия. Ее значение $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Так, например, два заряда каждый в один кулон, разнесенные на один метр, будут испытывать силу $8,99 \cdot 10^9$ Н.

Электрический заряд всегда связан с элементарными частицами, из которых лучше всего известны электрон и протон. Численная величина заряда этих частиц одинакова; это универсальная постоянная природы. В международной системе единиц (СИ) единица заряда равна $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряд протона считается положительным; обозначим его через e .

Что касается магнитных сил, то нет экспериментального свидетельства существования магнитного заряда, подобного электрическому, а магнитные силы полностью порождаются электрическими токами (движу-

щимися электрическими зарядами). И тем не менее некоторые современные теории великого объединения предсказывают существование магнитного заряда. Однако в этом случае нет необходимости вводить новую фундаментальную единицу, поскольку, как показал Поль Дирак, величина магнитного заряда, порожденного заряженной частицей, должна быть кратной основной единице, которая полностью определяется фундаментальной единицей электрического заряда e . Таким образом, e определяет интенсивности как электрического, так и магнитного (если он существует) элементарных зарядов.

Переходя теперь к взаимодействиям элементарных частиц, рассмотрим сначала слабое взаимодействие. Оно ответственно за многие ядерные процессы, среди которых один из лучше всего известных — превращение нейтронов в протоны (β -распад). Слабое взаимодействие сильнее сказывается на превращениях частиц, нежели на их движении. Поэтому эффективность слабого взаимодействия можно характеризовать универсальной постоянной связи g_w , определяющей скорость, с которой протекают такие процессы, как распад нейтрона.

Сильное ядерное взаимодействие значительно более сложно по своей природе, чем другие типы взаимодействий. В своей наиболее простой форме сильное взаимодействие ответственно за удержание протонов и нейтронов в атомном ядре. Не будь сильного взаимодействия, ядра распались бы из-за электрического отталкивания протонов. Для этого упрощенного случая можно ввести величину g_s , аналогичную электрическому заряду, но значительно большую, как следует из определения «сильное взаимодействие». Однако понятие g_s имеет лишь ограниченное значение. Во-первых, сильное взаимодействие не подчиняется закону обратной пропорциональности квадрату расстояния типа (1.1) или (1.3). Оно быстро спадает до нуля за пределами эффективной области радиусом около 10^{-15} м. Во-вторых, как мы увидим ниже, протоны и нейтроны состоят из еще более мелких частиц, так что внутри их также должно проявлять себя очень сильное взаимодействие. Взаимодействия между протонами и нейтронами — это

отражение взаимодействия внутри самих нуклонов. А поскольку мы пока еще далеки от понимания внутреннего строения протонов и нейтронов, менее фундаментальное, но более простое понятие g , будет использоваться здесь как грубая мера эффективности сильного взаимодействия.

1.3. Квантовая теория и теория относительности

Структура нашего мира обусловлена законами, которые определяют движение тел под влиянием различных сил природы. Явления, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, адекватно описываются механикой Ньютона. Однако в трех случаях законы Ньютона не выполняются.

Во-первых, если скорость рассматриваемых тел приближается к скорости света, то нужно применять специальную теорию относительности. Скорость света (обычно обозначаемая буквой c) — абсолютный верхний предел скорости любых материальных систем. Можно считать скорость света еще одной фундаментальной универсальной постоянной, очень важной в определении строения Вселенной.

Во-вторых, в случае сильных гравитационных полей следует отказаться не только от ньютоновского закона всемирного тяготения, но также и от механики Ньютона. Согласно общей теории относительности, гравитация проявляется как искривление пространства-времени (типа кривизны сферической поверхности). Поведение частицы в этом искривленном пространстве отличается от предсказываемого механикой Ньютона.

И наконец, в-третьих, если размеры рассматриваемой системы сравнимы с размерами атома, то законы Ньютона несправедливы. Для описания взаимодействия заряженных частиц и электромагнитных полей необходимо использовать квантовую теорию.

Основное положение специальной теории относительности — постоянство скорости света относительно любого наблюдателя независимо от его движения. Значит, скорость света — универсальная постоянная

природы. Отсюда следует, что пространственный и временной интервалы по отдельности не являются инвариантами, а изменяются от одной системы координат к другой, приводя к знаменитым эффектам замедления течения времени и релятивистского сокращения длин.

Поскольку скорость света в вакууме всегда равна c , ясно, что наблюдатель не может достичь (или превзойти) скорость света. Эта скорость — барьер для распространения любых процессов или движения материального тела. Все физические возмущения ограничены в том смысле, что распространяются со скоростью света или медленнее. По этой причине из механики тел, движущихся с субсветовой скоростью, следует несколько интересных эффектов. Так, например, энергия E и масса покоя m_0 тела, движущегося со скоростью v относительно некоторого наблюдателя, связаны формулой

$$E = m_0 c^2 / (1 - v^2 / c^2)^{1/2}. \quad (1.4)$$

По мере того как v приближается к c , энергия тела беспредельно возрастает, т. е. необходимо сообщить телу бесконечное количество энергии, чтобы разогнать его до скорости света. В противоположном пределе, когда $v = 0$, т. е. тело покоится, его энергия не исчезает, а равна

$$E_r = m_0 c^2. \quad (1.5)$$

Энергия покоя E_r полностью обусловлена массой m_0 тела, а не какими-нибудь следствиями движения. Иногда это соотношение интерпретируется так: энергия и масса эквивалентны, или энергия обладает массой, или масса имеет энергию.

В качестве иллюстрации рассмотрим Солнце, которое излучает около 10^{26} Дж/с. Эта ежесекундная потеря энергии эквивалентна массе 4 млн. тонн, таким образом, каждую секунду Солнце становится на $4 \cdot 10^6$ тонн легче.

Возьмем другой пример. Ядро кислорода содержит восемь протонов и восемь нейтронов, тесно связанных друг с другом. Масса ядра кислорода равна $2,655 \cdot 10^{-26}$ кг. С другой стороны, суммарная масса восьми изолированных протонов и восьми изолированных нейтронов равна $2,678 \cdot 10^{-26}$ кг. Недостаю-

щие $2,3 \cdot 10^{-28}$ кг соответствуют потере энергии по сравнению с тем состоянием, когда элементарные частицы не были собраны в единую систему.

Иногда уравнение (1.4) записывают в форме

$$E = mc^2, \quad (1.6)$$

где $m = m_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ — релятивистская масса. Эта величина зависит от скорости v . Величина m_0 — масса покоя, она равна значению m при $v = 0$.

Если частица движется со скоростью света (очевидно, с такой скоростью движутся фотоны; см. ниже), то из формулы (1.4) следует, что для конечности E необходимо, чтобы $m_0 = 0$. Тогда правая часть (1.4) равна $0/0$. Это отношение может быть и конечной величиной. Энергия фотона зависит от его частоты и дается формулой (1.7), приведенной ниже. Таким образом, если масса покоя частицы равна нулю, то она движется со скоростью света. Физики часто называют такую частицу «безмассовой», имея в виду массу покоя. Безмассовая частица все же имеет релятивистскую массу $m = E/c^2$.

Перейдем теперь к краткому описанию квантовой теории. Квантовые эффекты влекут за собой изменение общего (классического) представления о частице. Например, электрон наряду со свойствами частицы обладает волновыми свойствами, поэтому электроны могут испытывать дифракцию и интерференцию. Другие аспекты их поведения также кажутся странными: они могут просачиваться сквозь потенциальные барьеры (туннельный эффект) или отскакивать от «несущественных» препятствий. Подобным же образом на квантовом уровне необходимо модифицировать понятие волны. Так, например, при излучении, поглощении и рассеянии света, представляющего собой электромагнитные волны, проявляются его корпускулярные свойства. Корпускулы, или фотоны, первоначально назывались «пакетами» или «квантами»; от последних теория и получила свое название.

Характерный размер, при котором эти типичные для квантовых эффектов волновые и корпускулярные свойства становятся важными, определяется постоянной Планка h , равной $6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Чаще исполь-

зуют величину $h/2\pi$, которая обозначается через $\hbar$. В случае когда проявляются корпускулярные свойства, h входит в формулы как отношение энергии к частоте фотона. Так, например,

$$E = h\nu. \quad (1.7)$$

Когда преобладают волновые свойства частиц, h является произведением импульса p на длину волны λ :

$$p = h/\lambda. \quad (1.8)$$

Квантовую теорию следует применять, если интересующие нас механические параметры сравнимы с $\hbar$. Например, электрон на орбите внутри атома имеет кинетическую энергию около 10^{-19} Дж и орбитальный период около 10^{-15} с. Таким образом, произведение энергии на период составляет 10^{-34} Дж · с, т. е. сравнимо с $\hbar$. Значит, поведение электронов в атоме подчиняется квантовой теории, что и наблюдается в действительности.

Поскольку квантовая теория электромагнитного поля описывает перенос энергии и импульса в виде обмена фотонами, это должно приниматься во внимание в процессах взаимодействия зарядов и токов. В классической электростатике закон обратной пропорциональности квадрату расстояния (1.3) описывается в рамках теории поля следующим образом: заряд e_1 создает вокруг себя электрическое поле, а заряд e_2 взаимодействует с этим полем в точке, удаленной на расстояние r . Взаимодействие между e_2 и полем создает силу. Если бы заряд e_1 подвергся какому-либо возмущению, то воздействие этого возмущения передалось бы посредством электрического поля к заряду e_2 , и он реагировал бы соответствующим образом на это возмущение. Согласно квантовой теории, возмущение также распространяется посредством поля, но в форме фотонов. Движущийся заряд e_1 будет излучать фотоны, которые поглощаются e_2 и приведут его в движение. Поэтому электромагнитное взаимодействие описывается в виде обмена фотонами, осуществляющими взаимодействие между источниками. (Чтобы распространить это описание на саму электростатическую силу в отсутствие возмущения

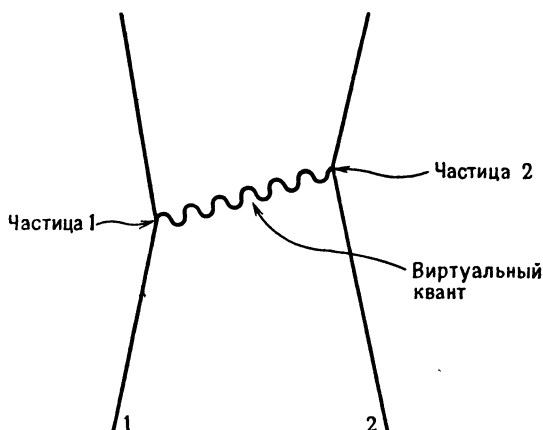


Рис. 5. Квантовое описание взаимодействий. Схематически изображен основной механизм, посредством которого передаются взаимодействия между обычными частицами. Прямые линии показывают пути взаимодействующих частиц. Когда частица 1 возбуждена, она испускает временный, или «виртуальный», квант взаимодействия (например, фотон электромагнитного поля), который впоследствии поглощается частицей 2. Тогда частица 2 испытывает ответное возмущение. Подобным образом описываются все фундаментальные взаимодействия природы.

зарядов, необходимо ввести понятие о новом типе фотонов, отличающихся от тех, которые вызывают зрительное ощущение.)

Для других сил природы было также развито описание, основанное на обмене квантами промежуточного поля (рис. 5). Например, гравитационное взаимодействие можно описать как обмен гравитонами. Слабое взаимодействие обусловлено обменом частицами, называемыми промежуточными векторными бозонами. В последних теориях слабого взаимодействия необходимы как электрически заряженные, так и нейтральные векторные бозоны (обозначаемые соответственно W и Z). Как W -, так и Z -бозоны очень массивны (во много раз массивнее протонов). Сильное взаимодействие, более сложное для понимания, будет подробнее обсуждаться в следующем разделе.

Сочетание квантовых и релятивистских эффектов

ведет к рождению и аннигиляции элементарных частиц. Соотношение $E = m_0 c^2$ наводит на мысль, что если как-то обеспечить энергию $m_0 c^2$, то может родиться частица массой покоя m_0 . Это подтверждается экспериментально. Например, электрон может родиться из фотона очень высокой энергии (гамма-кванта). Для сохранения электрического заряда необходимо, чтобы рождение электрона сопровождалось рождением античастицы с противоположным (положительным) зарядом. Эта частица, названная позитроном, была открыта в 1932 г.; она имеет такую же массу, как электрон. Впредь мы будем обозначать электрон через e^- , а позитрон — через e^+ .

Другие частицы также могут рождаться из энергии. Протоны и нейтроны (обозначаемые соответственно p и n) рождаются в паре со своими античастицами, обозначаемыми $\bar{p}$ и $\bar{n}$. У каждого типа частиц есть *античастица*: $\bar{p}$ — это антипротон, $\bar{n}$ — антинейтрон, а позитрон e^+ — это «антиэлектрон». Обобщающее название античастиц — *антивещество*. Частицы обычно рождаются парами: частица — античастица (например e^+ и e^-). Некоторые частицы (например, фотон) неотличимы от своей античастицы; такие частицы могут рождаться и поодиночке.

Энергия $2m_0 c^2$ на рождение пары может поставляться различными путями. Например, это могут быть: кинетическая энергия, высвобождающаяся при столкновении двух других частиц, тепловая энергия, электромагнитная потенциальная энергия или энергия покоя некоторых других частиц.

Обратным процессу рождения пары является процесс ее аннигиляции. Он имеет место, когда частица сталкивается со своей античастицей. Например, электрон и позитрон при их тесном сближении обычно разрушаются, обе частицы полностью исчезают, но при этом образуется два или три фотона.

Когда квантовые и релятивистские эффекты сочетаются описанным образом, соотношения (1.6) и (1.7) выполняются одновременно, что приводит к соотношению

$$c/v = h/mc, \quad (1.9)$$

которое имеет размерность длины. Если взять в качестве m массу покоя частицы, то h/m_0c — связанная с этой частицей характерная длина, которая в честь американского физика Артура Комптона названа *комптоновской длиной волны*. Для протона комптоновская длина волны составляет около 10^{-15} м.

Хотя на образование стабильной новой частицы массой покоя m_0 требуется энергия m_0c^2 , на короткое время такая частица может возникнуть и без поставки энергии. Причина этого кроется в принципе неопределенности Гейзенберга, отражающем двойственную корпускулярно-волновую природу частиц. Согласно этому принципу,

$$\Delta E \Delta t \sim h. \quad (1.10)$$

Отсюда следует, что энергия m_0c^2 может быть «одолжена» на время $\Delta t \sim h/m_0c^2$ для рождения временной, или виртуальной, частицы. Конечно, виртуальная частица существует лишь краткий миг и затем исчезает, поэтому она не может уйти далеко от места рождения. Даже при движении со скоростью света (верхний предел скорости) ее радиус действия составляет $c\Delta t$, что совпадает с величиной в правой части формулы (1.9). Тем самым раскрывается смысл комптоновской длины как максимального радиуса действия виртуальной частицы.

В квантовом описании передачи сил взаимодействующие частицы обмениваются между собой квантами (рис. 5). Вообще, эти кванты являются виртуальными и их радиус действия ограничен комптоновской длиной волны. В случае электромагнитных сил виртуальными частицами переносчиками взаимодействия являются фотоны. Поскольку их масса покоя равна нулю, их комптоновская длина волны, а следовательно, и радиус действия бесконечны. По этой причине электромагнитные силы могут действовать на макроскопических расстояниях. То же самое справедливо для гравитационных сил (гравитоны также имеют нулевую массу покоя). Но частицы, участвующие в слабом взаимодействии, W - и Z -бозоны очень массивны, поэтому радиус их взаимодействия очень мал ($\ll 10^{-15}$ м) и ограничен ядерными расстояниями.

Эти рассуждения справедливы и для сильного ядерного взаимодействия между протонами и нейтронами.

В атомных процессах, включающих излучение и поглощение фотонов, необходимо совместно рассматривать эффекты квантовой теории и электромагнетизма. Это означает, что свойства таких процессов будут зависеть от всех трех фундаментальных постоянных: e , $\hbar$ и c . Перемножение скорости фотонов c , постоянной Планка $\hbar$ и электрической постоянной e дает величину с размерностью квадрата заряда, так что, комбинируя e , $\hbar$ и c , можно получить безразмерное отношение (число), обозначаемое α :

$$\alpha \equiv e^2/(4\pi\hbar c) = 1/137,036. \quad (1.11)$$

Эта величина входит в описание всех процессов, включающих взаимодействие вещества и излучения. Например, она определяет скорость, с которой возбужденный атом перейдет в основное (невозбужденное) состояние, излучив фотон, или скорость, с которой он будет поглощать энергию, находясь в потоке фотонов. Она также определяет степень расщепления в мультиплете атомных энергетических уровней в результате взаимодействия между внутренним магнитным моментом электрона и его орбитальным магнитным полем. Эта так называемая тонкая структура наблюдается в спектральных линиях возбужденных атомов. По этой причине величина α (1.11) называется *постоянной тонкой структуры*, но соотношение имеет гораздо более общий характер.

Процессы слабого и сильного взаимодействия — столь короткодействующие, что они всегда проявляются на квантовом уровне. Постоянные слабого и сильного взаимодействия g_w и g_s также можно объединить с другими постоянными и получить безразмерные отношения

$$g_w m_p^2 c / \hbar^3 \approx 10^{-5}, \quad (1.12)$$

$$g_s^2 / \hbar c \approx 15, \quad (1.13)$$

где m_p — масса протона. Роль соотношений (1.12) и (1.13) менее фундаментальна, чем роль α .

Наконец, обращаясь к гравитации, можно объеди-

нить величины $\hbar$, c и G и получить фундаментальные единицы длины l_p и времени t_p :

$$\begin{aligned} l_p &= (G\hbar/c^3)^{1/2} \approx 10^{-35} \text{ м}, \\ t_p &= (G\hbar/c^5)^{1/2} \approx 10^{-43} \text{ с}, \end{aligned} \quad (1.14)$$

называемые *длиной Планка* и *временем Планка*. Из общих соображений можно ожидать, что на этой длине и при этом характерном времени проявляются эффекты квантовой гравитации. Но это предсказание нельзя непосредственно проверить, так как l_p и t_p примерно на двадцать порядков величины меньше значений, доступных в современных экспериментах.

Интересно, что t_p дает еще одну фундаментальную единицу времени, которую можно сопоставить с возрастом Вселенной t_H и характерным ядерным временем t_N . Их отношения приблизительно равны

$$\begin{aligned} t_N/t_p &\sim 10^{20}, \\ t_H/t_N &\sim 10^{40}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

1.4. Строение ядра: «перепись» фундаментальных частиц

Протоны и нейтроны, несмотря на их важную роль в структуре атомных ядер, не являются самыми элементарными строительными блоками. Данные по бомбардировке ядерных частиц электронами высоких энергий и другими частицами показывают, что протоны и нейтроны в свою очередь состоят из еще более мелких частиц. Хотя до сих пор внутренняя структура этих частиц понята не полностью, все же вырисовывается последовательная картина.

Как считают, каждый протон состоит из трех более мелких частиц, называемых кварками. Протон содержит два различных типа (или два аромата) кварков: два *u*-кварка (от англ. *up* — вверх), каждый с дробным электрическим зарядом $\frac{2}{3}e$, и *d*-кварк (от англ. *down* — вниз) с зарядом $-\frac{1}{3}e$. Слово «вверх» и «вниз» — это просто обозначения, не имеющие ничего общего с вертикальной ориентацией, так же как обо-

значения других кварков, обсуждаемых ниже. Нейтрон состоит из одного *u*-кварка и двух *d*-кварков. Когда нейтрон распадается, образуется протон, а один из *d*-кварков превращается в *u*-кварк, и рождается электрон, уносящий единицу отрицательного заряда. Таким образом, слабое ядерное взаимодействие способно изменять тип (аромат) кварков.

Массы кварков неизвестны, но, вероятно, они значительно больше одной трети массы протона. Объясняется это тем, что кварки очень сильно связаны и поэтому большая часть массы компенсируется энергией связи (см. с. 29).

Природа взаимодействия между кварками недостаточно хорошо понята. Взаимодействие, которое «склеивает» кварки вместе, очень сильное. И теперь уже очевидно, что сильное ядерное взаимодействие, связывающее в свою очередь вместе нейтроны и протоны в ядрах, представляет собой проявление этого значительно более сильного внутреннего взаимодействия. В соответствии с общими представлениями квантовой теории поля взаимодействие между кварками обусловлено обменом особыми квантами поля, или частицами, которые обычно называют глюонами (от англ. *glue* — клей). Согласно наиболее широко признанной теории сильного взаимодействия, называемой квантовой хромодинамикой, имеется восемь разных типов глюонов. Хотя у глюонов нет массы покоя, взаимодействие между ними тем не менее является короткодействующим. Дело в том, что глюоны притягивают друг друга с той же огромной силой, с какой они заставляют притягиваться кварки. Этим глюоны отличаются от фотона, который электрически нейтрален, но переносит электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами.

Большинство физиков, занимающихся элементарными частицами, придерживаются мнения, что взаимодействие между кварками усиливается с увеличением расстояния между ними. Если это справедливо, то растащить на части соединение кварков невозможно. В таком случае кварки не могут существовать изолированно. Например, невозможно расщепить протон на три его составные части. Это предсказание подтверж-

дается экспериментами по столкновениям частиц высокой энергии, в ходе которых еще никогда не удавалось разбить протон на части.

Однако не обязательно объединяются три кварка: допустима и пара кварков. Одно из объединений двух кварков — система $u\bar{d}$, в которой u -кварк связан с античастицей d -кварка. Полный заряд этой системы $+e$, но из-за отсутствия третьего кварка ее масса меньше, чем у протона. Частицу $u\bar{d}$ можно получить в лаборатории, и она известна уже более 30 лет; это пи-мезон, или пион, обозначаемый π^+ . Античастица π^+ , т. е. $\bar{u}d$, обозначается π^- . Имеется также нейтральный пион π^0 , который можно рассматривать как объединение u и $\bar{u}$ или d и $\bar{d}$.

Нейтральный пион π^0 очень нестабилен, так как кварк может аннигилировать с антикварком. Его среднее время жизни около 10^{-16} с, а затем он распадается на два гамма-кванта:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

Заряженные пионы более стабильны, так как антикварки в них иного типа, чем кварки, и не могут непосредственно аннигилировать друг с другом. Однако слабое взаимодействие может изменять тип (аромат) кварков и, таким образом, приводить к распаду заряженных пионов. Поскольку взаимодействие является слабым, время распада значительно больше (около 10^{-8} с).

Конечным продуктом распада пиона является другой мезон, но он состоит не из кварков. Это мю-мезон, или мюон, который обозначается μ . Он не участвует в процессах сильного ядерного взаимодействия, но подвержен слабому взаимодействию (которое и ответственно за его образование) и обладает электрическим зарядом. Мюон рождается в сопровождении нейтрино, названного мюонным нейтрино и обозначаемого ν_μ :

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

Не существует нейтрального мюона. Чтобы отличать мюонные нейтрино от нейтрино, связанных с распадом

нейтрона, последние называются электронными нейтрино и обозначаются ν_e .

Оставим пока мезоны. Двух сильно взаимодействующих кварков u и d и двух слабо взаимодействующих частиц e и ν_e (и четырех их античастиц) достаточно, чтобы объяснить все обычное вещество, а вместе с глюонами, фотонами, гравитонами, промежуточными векторными бозонами W и Z (обменными частицами, посредством которых осуществляются четыре типа фундаментальных взаимодействий) их достаточно для объяснения всех существенных свойств взаимодействий частиц. Если бы эти частицы были единственными фундаментальными элементами, то, вероятно, мир мало бы отличался по структуре от наблюдаемого.

Тройки кварков составляют тяжелые частицы (n и p), именуемые *барионами*. Масса электрона e и нейтрино ν_e значительно меньше; они называются *лептонами*. Двух барионов и двух лептонов достаточно для построения материального мира, очень сходного с наблюдаемым.

Вызывает удивление, что природа, по-видимому, создала избыток строительных блоков, ибо установлено, что схема два бариона — два лептона копируется по крайней мере дважды. При высоких энергиях, когда возможно рождение частиц с большими массами покоя, появляются два более тяжелых кварка. Они причудливо названы странным и очарованным и обозначаются соответственно s -кварк и c -кварк (от англ. *strange* — странный и *charmed* — очарованный). Они объединяются как в тройки, порождая барионы, более тяжелые, чем протон и нейтрон, так и в пары, давая тяжелые мезоны. Например, странные барионы, содержащие по крайней мере один странный кварк, обозначаются Σ , Λ , Ξ и Ω . Все они нестабильны и распадаются в среднем меньше чем за 10^{-8} с на частицы, не имеющие странности. Первая открытая очарованная частица ψ имеет массу, превышающую три массы протона, и состоит из пары $c\bar{c}$. Она распадается примерно через 10^{-20} с на пион и другие частицы. Парными к странному и очарованному кваркам являются:

мюон, который подобен «большому брату» электрона, и мюонное нейтрино.

При еще более высоких энергиях существуют еще два кварка: t и b (от англ. *top* — верх и *bottom* — низ) и известен новый тяжелый тау-лептон (обозначаемый τ) массой ~ 3500 масс электрона. Предположительно тау-лептон имеет свое собственное тау-нейтрино, образуя с ним пару. Число сочетаний двух и трех кварков и их антикварков, взятых из шести типов, доходит до десятков, так что мир элементарных частиц можно сравнить с зоосадам.

Число кварков и лептонов быстро растет, если учесть силы взаимодействия кварков. Наиболее популярная теория, включающая восемь типов глюонов, требует не менее трех различных типов сильного «заряда», чтобы связать глюоны и кварки, подобно тому как электрический заряд связывает электроны и фотоны. Заряд сильного взаимодействия именуют цветом. Значит, шесть известных кварков могут быть трех разных цветов, образуя в общей сложности 18 типов кварков. Лептоны, которые не относятся к сильно взаимодействующим частицам, бесцветны. Частицы, состоящие из кварков (т. е. все барионы и мезоны), участвуют в сильном ядерном взаимодействии и собирательно называются *адронами*.

В непрерывных поисках простоты в основе сложности некоторые физики пришли в смятение от большого числа известных видов кварков и деления вещества на адроны и лептоны. Они предположили, что даже кварки состоят из более мелких единиц (прекварков). Возможно, лептоны также построены из прекварков. Может быть, эта последовательность все более мелких строительных блоков нескончаема и, таким образом, истинно элементарных частиц не существует вообще?

Более простая картина, которой мы и будем придерживаться, заключается в том, что кварки и лептоны являются фундаментальными строительными блоками всего вещества. Они бесструктурны по крайней мере в рамках современной квантовой гравитации (разд. 2.2). Возможно, в будущем будут открыты новые типы кварков, хотя это представилось бы дальнейшим из-

лишним дублированием. Строение и свойства элементарных частиц приведены в табл. 2.

Таблица 2

Элементарные частицы

Поколения	Кварки		Лептоны	
	Тип	Заряд	Тип	Заряд
I	<i>u</i>	+2/3	Электрон <i>e</i>	—1
	<i>d</i>	—1/3	Электронное нейтрино ν_e	0
II	<i>c</i>	+2/3	Мюон μ	—1
	<i>s</i>	—1/3	Мюонное нейтрино ν_μ	0
III	<i>t</i>	+2/3	Тау τ	—1
	<i>b</i>	—1/3	τ -нейтрино ν_τ	0
?	?	?	?	?

Все обычное вещество построено всего из четырех типов элементарных частиц и соответствующих им античастиц, которые здесь не приведены (поколение I). Каждый тип (аромат) кварка бывает трех цветов. По какой-то причине природа, по крайней мере дважды, дублирует эту схему (поколения II, III). Лептоны испытывают только слабое взаимодействие и обычно остаются одиночными, а кварки испытывают могучее притяжение глюонов и всегда связаны парами или тройками. Эти сочетания создают огромное разнообразие элементарных частиц: протоны, нейтроны, мезоны, частицы Σ и ψ и т. д. Частицы, построенные из составных частей поколений II и III, очень нестабильны и быстро превращаются в частицы поколения I. То же справедливо и для лептонов.

В эту схему не включены фотоны, гравитоны, глюоны и промежуточные векторные бозоны, являющиеся переносчиками взаимодействия между кварками и лептонами. Заряд измеряется в единицах электрического заряда протона.

1.5. Краткая история Вселенной

Как в общих чертах описано в разд. 1.1, наиболее общепринятая космологическая модель основана на концепции расширения Вселенной из сингулярного состояния. Судя по современной скорости расширения Вселенной, оно началось примерно 15 или 20 млрд. лет назад, и эта оценка возраста подтверждается незави-

симыми методами определения возраста старейших звезд.

По мере расширения Вселенной длина волны любого электромагнитного излучения, распространяющегося в пространстве, растет, а частота уменьшается. Этот эффект проявляется, например, в смещении линий в спектрах далеких галактик к красному концу — знаменитом космологическом красном смещении.

Как отмечено в разд. 1.1, в больших масштабах (превосходящих размер скопления галактик, т. е. $\approx 10^{23}$ м) вещество распределено удивительно однородно и скорость расширения также в высокой степени изотропна. Почему это так, обсуждается в последующих разделах. А пока мы просто укажем, что однородное и изотропное расширение Вселенной можно описать одним масштабным фактором $a(t)$, который можно считать пропорциональным расстоянию между двумя типичными скоплениями галактик. Поскольку Вселенная расширяется, $a(t)$ возрастает со временем.

Точная форма функции $a(t)$ зависит от динамики Вселенной в больших масштабах, которая обусловлена гравитацией (см. разд. 4.2). Следовательно, для вычисления $a(t)$ нужно использовать общую теорию относительности. Результат будет зависеть от того, какой источник гравитации рассматривается. Если полагать, что основным источником сил гравитации являются галактики, а время t не слишком велико, то

$$a(t) \propto t^{2/3}. \quad (1.16)$$

Если же преобладающий вклад в массу-энергию Вселенной вносит излучение, то

$$a(t) \propto t^{1/2}. \quad (1.17)$$

В обоих случаях выбрано начальное условие $a(t)=0$ при $t=0$ в соответствии с предположением о сингулярности. Обе функции имеют такой же характер, как кривая на рис. 3.

Как уже упоминалось, Вселенная пронизана тепловым (реликтовым) излучением с современным значением температуры около 3 К. Типичная длина волны излучения изменяется вместе с масштабным фактором

$\lambda \propto a(t)$, так что температура T излучения падает по мере расширения Вселенной:

$$T \propto a^{-1}(t). \quad (1.18)$$

Плотность энергии электромагнитного излучения, обозначаемая q_γ , определяется законом Стефана — Больцмана:

$$q_\gamma = \sigma T^4,$$

поэтому

$$q_\gamma \propto a^{-4}(t). \quad (1.19)$$

Здесь σ — так называемая постоянная плотности излучения, определяемая через фундаментальные постоянные h , c и k , значения которых приведены в табл. 3.

Для плотности массы-энергии вещества имеет место соотношение

$$q_m \propto a^{-3}(t) \quad (1.20)$$

(разд. 2.4). Значит, при $a \rightarrow 0$ $q_\gamma > q_m$, поэтому на ранних стадиях эволюции Вселенной преобладало излучение. Будем обозначать через t_{eq} эпоху, в которую $q_\gamma = q_m$. Эту эпоху можно определить, экстраполируя современное наблюдаемое отношение плотностей энергии в прошлое. Оказалось, что $t_{eq} \sim 10^5$ лет.

Принимая для эпохи $t < t_{eq}$ модель (1.17), получим

$$T \propto t^{-1/2}, \quad (1.21)$$

так что при $t \rightarrow 0$ температура беспрестанно растет. Скорость расширения

$$H \equiv \dot{a}/a \propto t^{-1} \quad (1.22)$$

при $t \rightarrow 0$ также неограниченно возрастает. Таким образом, ранняя Вселенная характеризовалась двумя критическими свойствами: огромными температурами и взрывообразным расширением.

Постоянная пропорциональности в формуле (1.21) зависит от состава заполняющего Вселенную вещества.

$$T \approx 10^{10} \text{ K}/t_{\text{sec}}^{1/2} \quad (1.23)$$

где t_{sec} означает, что время нужно выражать в секун-

дах. Средняя энергия типичной частицы, обусловленная тепловыми движениями, составляет около kT , где k — постоянная Больцмана. Ясно, что описание вещества в более ранние эпохи требует привлечения физики все более высоких энергий. На современных ускорителях частиц достигается уровень энергий, который, вероятно, преобладал в ранней Вселенной вблизи эпохи $t \sim 10^{-12}$ с. При изучении предшествующих эпох исследователи вынуждены опираться в основном на теоретические аргументы.

Когда температура достаточно высока, тепловая энергия может приводить к рождению пар частица — античастица. Для этого энергия kT должна превосходить $2m_0c^2$. Таким образом, приблизительно до 1 с от начала расширения Вселенной могли рождаться электрон-позитронные пары, до 10^{-6} с — протон-антипротонные пары и т. д. Значит, вблизи сингулярного состояния в изобилии присутствовали все виды частиц и античастиц. Затем, по мере того как Вселенная расширялась и охлаждалась, античастицы аннигилировали с частицами, превращаясь в электромагнитную энергию. Именно это, но сильно охлажденное излучение наблюдается сегодня как реликтовое излучение с температурой 3 К.

Очевидно, количество антивещества в ранней Вселенной не было в точности равно количеству вещества, в противном случае не осталось бы вещества, из которого в дальнейшем образовались галактики. Обсуждением этого несоответствия между количествами вещества и антивещества мы займемся в разд. 4.4.

Раннюю Вселенную, таким образом, можно характеризовать последовательностью эпох (рис. 6). Самая ранняя эпоха продолжалась около 10^{-43} с, т. е. возраст Вселенной составлял около одной планковской единицы времени. В пределах этой так называемой эпохи Планка, вероятно, были значительными эффекты квантовой гравитации, приводившие к распаду структуры пространства-времени (разд. 2.2). Пока еще не разработана надежная теория квантовой гравитации, поэтому невозможны подробные исследования эпохи Планка.



Рис. 6. История Вселенной. Показаны наиболее важные эпохи (время приводится в секундах). Эра Планка, т. е. интервал времени $\sim 10^{-43}$ с после начала расширения Вселенной, — самый ранний момент, который еще можно разумно описать в рамках современных физических теорий. Современная структура Вселенной, включая фундаментальные взаимодействия и частицы, из которых состоит вещество, последовательно «выделяется» из сверхгорячего и сверхплотного состояния.

В конце эпохи Планка температура была, вероятно, около 10^{32} К и присутствовали только элементарные строительные блоки вещества, плотность же была колоссальной — 10^{97} кг/м³. По мере падения температуры из строительных блоков (кварков?) образовывались адроны. При дальнейшем понижении температуры большинство этих адронов последовательно аннигилировали со своими античастицами. Частицы, которые избежали аннигиляции, являясь нестабильными, в конце концов распались.

Примерно через одну микросекунду после начала

расширения вещество Вселенной состояло только из более легких частиц: протонов, нейтронов, электронов, мюонов, пионов и их античастиц, а также из нейтрино, фотонов и гравитонов. Тяжелые же частицы, например содержащие странный и очарованный кварки, к этому времени исчезли. Примерно через 10^{-6} с после начала расширения температура стала слишком низкой, чтобы поддерживать существование антипротонов и антинейтронов. Примерно при 10^{-3} с аннигилировали мюоны. Наконец, приблизительно через секунду в результате аннигиляции исчезли позитроны и остались только нейтроны, протоны, электроны, нейтрино, фотоны и гравитоны.

Температура продолжала снижаться, и тепловая энергия упала ниже энергии связи сложных ядер, позволяя протонам и нейтронам объединиться. Вычисления показывают, что в этом первичном синтезе ядер образовалось около 25% (по массе) гелия, а остальное вещество почти полностью состояло из свободных протонов. Через несколько минут температура была уже слишком низкой для дальнейших реакций синтеза ядер, и успело образоваться за это короткое время лишь очень немного ядер тяжелее, чем ядра гелия.

Постепенное охлаждение продолжалось, но его темп уменьшался со временем ($dT/dt \propto t^{-3/2}$), так что потребовалось около 10^5 лет, прежде чем температура достигла примерно 10^4 К. При этой температуре свободные протоны и электроны рекомбинировали, образуя атомарный водород. На этой стадии вещество стало прозрачным для излучения, и с того времени вещество и излучение в значительной степени разделились.

В конце концов охлаждавшийся газ образовывал облака, из которых возникли протогалактики. Области повышенной плотности притягивали дополнительное вещество, и их сила тяготения увеличивалась. Медленное сжатие этих протогалактик протекало под действием самогравитации. Одна за другой сменялись последовательные стадии фрагментации, и в конце концов в газовых облаках начался процесс звездообразования. Поскольку эти облака (протозвезды)

сжимались, происходило постепенное разогревание протозвезд до тех пор, пока температуры центральных областей не поднимались достаточно высоко (несколько миллионов градусов), чтобы начались термоядерные реакции. С началом выделения ядерной энергии сжатие прекращается, так как температура и давление в центре возрастают и уравнивают силу гравитации. В конце концов протозвезды обретают равновесие, образуя объекты, которые мы называем звездами.

Основной особенностью приведенного здесь сценария расширяющейся Вселенной является предположение о термодинамическом равновесии. Без этого предположения описание детальных процессов в ранней фазе было бы гораздо сложнее. Термодинамическое равновесие подразумевает, что космическое вещество может характеризоваться единым параметром — температурой T . Но разумно ли такое допущение?

Измерения космического фонового (реликтового) излучения подтверждают, что в хорошем приближении реликтовое излучение имеет планковский спектр, свидетельствующий о термодинамическом равновесии (рис. 7). Однако это излучение несет на себе отпечаток условий, существовавших примерно через 10^5 лет после начала расширения Вселенной, когда вещество и излучение разъединились. Что можно сказать о более ранних эпохах?

Поскольку ранняя Вселенная была очень горячей и плотной, различные элементарные частицы сильно взаимодействовали друг с другом, что способствовало установлению равновесия. С другой стороны, ранние эпохи были также эпохами наиболее быстрого расширения, которое, напротив, ведет к нарушению равновесия. В качестве общего руководящего принципа можно принять, что если скорость типичной реакции для некоторого процесса взаимодействия между двумя частицами была много больше скорости расширения в данную эпоху, то равновесие преобладало. Скорости реакций пропорциональны концентрации каждого типа частиц. Следовательно, для частиц с постоянной относительной распространенностью скорость реакции пропорциональна a^{-6} , что в свою очередь пропорционально t^{-3} . С другой стороны, скорость расширения

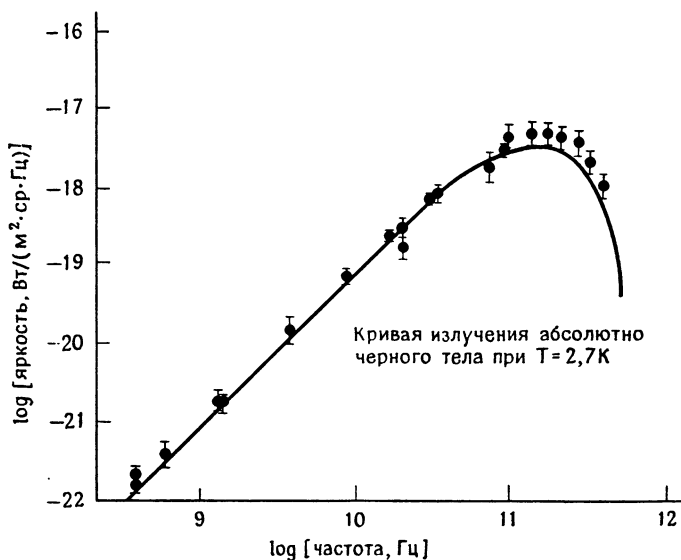


Рис. 7. Энергетический спектр излучения абсолютно черного тела обладает специфической формой. Кривая — расчетный график, соответствующий температуре 2,7 К. Точки — результаты нескольких наблюдений космического микроволнового фонового излучения.

$\alpha/\alpha \propto t^{-1}$. Поэтому если другие факторы, воздействующие на скорость реакции, не слишком сильно зависят от температуры и, следовательно, от времени (возможно, такая ситуация имела место до 10^{-35} с от начала расширения), то при $t \rightarrow 0$ скорости реакций превышают скорость изменения плотности (и температуры) в ходе расширения.

На основании этих общих соображений можно сделать вывод, что вещество возникло в условиях термодинамического равновесия. Затем по мере расширения скорости реакций падали и больше не могли конкурировать с темпом расширения. Таким образом, различные типы частиц одна за другой переставали участвовать в реакциях, поддерживающих взаимное равновесие. Большинство типов частиц именно на этой стадии интенсивно аннигилировали со своими античастицами.

В качестве примера рассмотрим электроны и по-

зитроны. Приблизительно до одной секунды от начала расширения Вселенной эти частицы находились в равновесии с электромагнитным излучением (фотонами). С некоторой (большой) скоростью происходила аннигиляция, но с той же самой скоростью тепловое излучение рождало новые пары e^+ , e^- , поддерживая равновесные концентрации каждого типа частиц, $e^+ + e^- \rightleftharpoons 2\gamma$. После того как температура упала ниже примерно 10^{10} К, средняя энергия фотонов была слишком мала, чтобы рождать пары e^+ , e^- . Следовательно, в приведенной выше схеме процесса происходила только аннигиляция (стрелка вправо) и быстро истощавшийся запас e^+ , e^- уже не мог пополняться. Спустя короткое время сохранился только очень небольшой избыток электронов.

При термодинамическом равновесии относительное содержание двух типов частиц определяется статистической теоремой Больцмана. Эта теорема предсказывает, что два состояния с энергиями E_1 и E_2 будут заселены в отношении $\exp(-E_1/kT)/\exp(-E_2/kT)$. Если частицы одного типа имеют массу покоя m_1 , а другого — m_2 , то из формулы Эйнштейна $E=mc^2$ и того факта, что в равновесии эти частицы рождаются с той же скоростью, с какой аннигилируют, найдем, что отношение содержаний равно $\exp[(m_2 - m_1)c^2/kT]$. Следовательно, этот «фактор Больцмана» оказывает предпочтение частицам меньших масс:

$$\frac{\text{Содержание частиц типа 1}}{\text{Содержание частиц типа 2}} = \exp[(m_2 - m_1)c^2/kT] > 1,$$

если $m_2 > m_1$.

Хорошей иллюстрацией этому выводу служат протоны и нейтроны. Поскольку масса нейтронов слегка превосходит массу протонов, нейтронов в ранней горячей Вселенной было меньше, чем протонов. Вот почему в современной Вселенной преобладают протоны (около 90%), главным образом в виде атомов водорода. Отношение числа нейтронов к числу протонов отражает условия в течение первой секунды после начала расширения Вселенной.

Общая теория относительности предсказывает так-

же будущее наблюдаемой Вселенной. Рассмотрение рис. 3 показывает, что темп ее расширения постепенно замедляется. Это замедление легко понять. Взаимное гравитационное притяжение всех галактик и другого космического вещества сдерживает расширение. Если это сдерживание достаточно сильное, то в конце концов (при больших t) расширение прекратится и сменится сжатием и Вселенная будет коллапсировать с ускорением. (Мы пренебрегаем здесь эффектом космического отталкивания, обсуждавшимся в разд. 1.2.) Тогда через много миллиардов лет галактики будут спрессованы вместе, а любой заданный объем пространства катастрофически уменьшится в ходе сжатия Вселенной к сингулярному состоянию, т. е. обращенного во времени процесса расширения Вселенной из сингулярного состояния. Последствия такого катастрофического гравитационного коллапса не ясны, за исключением того, что в результате исчезнут не только все физические структуры, но и сама Вселенная, включая пространство и время. В этом случае сингулярное завершение Вселенной было бы зеркальным отражением ее сингулярного происхождения. В такой модели длительность существования Вселенной ограничена во времени.

Условие, необходимое для того, чтобы расширение сменилось сжатием, — это присутствие во Вселенной достаточного количества гравитирующего вещества, т. е. замкнутость Вселенной зависит от плотности массы-энергии при данной скорости расширения. Существующие наблюдения позволяют предположить, что плотность, определяемая веществом, содержащимся в галактиках, несколько ниже критического значения, при котором Вселенная замкнута, но ненаблюдаемое вещество (скрытая масса, например, в форме нейтрино) могло бы компенсировать этот дефицит. Более подробно эти вопросы будут обсуждаться в гл. 4.

Если самогравитация Вселенной не способна сдерживать расширение, то Вселенная, по-видимому, будет расширяться вечно. Звезды со временем либо взорвутся, либо истощат запасы ядерного топлива и коллапсируют, образуя белые карлики, нейтронные звезды или черные дыры. Галактики будут светить все слабее,

а черные дыры будут поглощать вещество: угасшие звезды, газ, пыль и прочее — и увеличиваться в размере. Очень медленные процессы, такие, как излучение гравитационных волн, приведут к распаду многих систем, поэтому галактики будут постепенно коллапсировать с образованием черных дыр. Вещество, которое ускользает в межгалактическое пространство, охладится до температуры реликтового излучения, которое будет остывать по закону (1.18).

Затем могут проявиться тонкие квантовые эффекты, в результате которых черные дыры медленно испарялись бы и осталось бы только излучение. Протоны, избежавшие поглощения черной дырой, могли бы также постепенно распадаться на позитроны (см. с. 125), которые начали бы аннигилировать с оставшимися электронами. Произойдет ли со временем полная аннигиляция, зависит от деталей модели. По-видимому, в любом случае конечный вид открытой Вселенной — это очень разреженная и постепенно исчезающая смесь фотонов, нейтрино, гравитонов и, вероятно, незначительного количества электронов и позитронов. Далее больше ничего интересного уже не произойдет.

ХАРАКТЕРНЫЕ РАЗМЕРЫ СТРУКТУРНЫХ ЕДИНИЦ ВСЕЛЕННОЙ

Предыдущая глава была посвящена иерархии структур в наблюдаемой Вселенной. Любопытно, что самые мелкие единицы длины и времени — l_p и t_p и самая большая — время Хаббла t_H определяются гравитацией. Между этими предельными значениями лежат структуры, обусловленные действием ядерных ($\lesssim 10^{-14}$ м) и электромагнитных сил. Последние ответственны за все структуры от атомов до окружающих нас предметов.

Хотя в природе существует огромное многообразие физических структур, некоторые из них более или менее равномерно распределены во Вселенной и характеризуются довольно узким диапазоном свойств. К таким объектам относятся атомы и звезды. Специфические свойства отдельных систем зависят от законов движения и различных начальных или граничных условий, которые в совокупности определяют их поведение. Однако такие параметры, как размер, масса, время жизни и т. д., с точностью до порядка величины часто определяются исключительно значениями таких фундаментальных постоянных, как G , $\hbar$, c , e и m_p . Так, например, атомы, строение которых определяется электромагнитными силами и законами квантовой физики, связаны в основном с постоянными e и $\hbar$. С другой стороны, звезды являются гравитирующими объектами, энергия которых определяется электромагнитными силами, а их структура, кроме того, зависит от G .

В последующих разделах с помощью фундаментальных постоянных мы будем анализировать основные системы природы и попытаемся выявить параметры, играющие первостепенную роль в их структуре. Оказывается, что для довольно полного описания природы требуется совсем немного таких параметров.

2.1. Роль фундаментальных постоянных в физической теории

Метод приближенного определения важных свойств системы, минуя тщательный анализ в рамках физической теории, часто называют анализом размерностей. Простой пример — определение периода колебаний маятника.

Для этого нужно сначала приближенно определить связанные с рассматриваемой системой величины. Период колебаний маятника на Земле обусловлен силой тяготения, которую можно характеризовать величиной g — ускорением свободного падения ($g=9,81$ м/с²). Сам маятник характеризуется двумя параметрами: длиной и массой. Поскольку нас интересует период колебаний, нужно получить величину с размерностью времени. Обозначим время через T , длину через L и массу через M ; величина g имеет размерность LT^{-2} . Размерность T из комбинации g , L и M получается при $(L/g)^{1/2}$, т. е. M сюда не входит. Маловероятно, чтобы результат $(L/g)^{1/2}$ давал точный период колебаний маятника, но все же он должен быть равен периоду в пределах порядка величины или около того. И действительно, из точной теории следует $T=2\pi(L/g)^{1/2}$. Таким образом, анализ размерностей приводит к значению в шесть раз меньшему. Для наших целей такую ошибку можно считать несущественной.

Важно различать величины, постоянные в том смысле, что они неизменны, и фундаментальные универсальные постоянные. Например, масса Земли приблизительно постоянна, но существуют другие планеты с массами, сильно отличающимися от земной. С другой стороны, масса всех электронов всюду в наблюдаемой Вселенной одинакова. Ни одна из определяющих период колебаний маятника величин L и g не является фундаментальной постоянной, поэтому различные маятники имеют различные периоды колебаний. Маятник не является одной из типичных систем, распространенных всюду во Вселенной.

Число известных фундаментальных универсальных

постоянных невелико. Мы уже встретились с шестью: c , e , h , G , g_w и g_s .

Другие универсальные постоянные — это массы различных элементарных частиц (масса электрона уже упоминалась). Трудность состоит в том, что на современном уровне развития науки не известно, какие частицы являются истинно фундаментальными. Например, свободные нейтроны распадаются на протоны, электроны и антинейтрино. Нельзя считать фундаментальными нейтрон и многие другие нестабильные элементарные частицы. Вероятно, электрон в этом смысле можно сопоставить с кварками, но массы свободных кварков (считают, что число их разновидностей достигает по крайней мере шести) весьма неопределенны. Кроме того, когда кварки объединяются в какую-либо элементарную частицу, их притяжение настолько сильно, что они теряют при этом заметную часть своей массы. Следовательно, из наблюдения, скажем, протона невозможно сделать заключение о точной массе кварков. Дополнительным осложнением является то, что большинство кварковых теорий рассматривают объединение кварков абсолютно устойчивым: считается, что существование свободных кварков невозможно.

Если кварки постоянно связаны в такие частицы, как протоны, то с большим основанием следует принять в качестве фундаментальной единицы массу протона, а не массы кварков. Исходя из этого, примем массы электрона и протона m_e и m_p в качестве двух основных естественных единиц массы, так как электрон и протон — две стабильные частицы, из которых построено все обычное вещество. Если верны современные теории, предполагающие, что протон все же нестабилен, но его период полураспада очень велик, то и тогда имеется все же достаточно оснований, чтобы принять массу протона в качестве фундаментальной единицы массы. Но все же протон — это, несомненно, самая стабильная из всех тяжелых частиц.

В табл. 3 приведены все универсальные постоянные, которые, по-видимому, необходимы для рассмотрения простых характеристик самых известных физи-

ческих структур. Для полноты мы приводим также постоянную Больцмана k , которая дает связь между тепловой энергией и температурой.

Таблица 3

Список фундаментальных констант и производных величин

Величина	Символ	Численное значение в системе СИ
Заряд протона	e	$1,60 \cdot 10^{-19}$
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$
Скорость света	c	$3,00 \cdot 10^8$
Ньютоновская гравитационная постоянная	G	$6,67 \cdot 10^{-11}$
Масса покоя протона	m_p	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Масса покоя электрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}$
Постоянная слабого взаимодействия	g_w	$1,43 \cdot 10^{-62}$
Постоянная сильного взаимодействия	g_s	15
Постоянная Хаббла	H	$2 \cdot 10^{-18}$
Космологическая постоянная	Λ	$< 10^{-53}$
Космическое отношение числа фотонов и протонов	S	10^9
Диэлектрическая постоянная вакуума	ϵ	$8,85 \cdot 10^{-12}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$
Планковская длина $(G\hbar/c^3)^{1/2}$	l_p	$1,62 \cdot 10^{-35}$
Планковское время $(G\hbar/c^5)^{1/2}$	t_p	$5,39 \cdot 10^{-44}$
Планковская масса $(\hbar c/G)^{1/2}$	m_p	$2,18 \cdot 10^{-8}$
Комптоновская длина волны протона $h/m_p c$	l_p	$1,32 \cdot 10^{-15}$
Протонное (ядерное) комптоновское время $h/m_p c^2$	t_N	$4,41 \cdot 10^{-24}$
Время Хаббла H^{-1}	t_H	$5,00 \cdot 10^{17}$
Радиус Хаббла cH^{-1}	r_H	$1,5 \cdot 10^{26}$
Радиус Бора $4\pi\hbar^2/(m_e e^2)$	a_0	$5,29 \cdot 10^{-11}$
Постоянная плотности излучения $\pi^2 \hbar^4 / (15 c^3 \hbar^3)$	σ	$7,56 \cdot 10^{-16}$
Электромагнитная постоянная тонкой структуры $e^2 / (4\pi\epsilon\hbar c)$	α	$7,30 \cdot 10^{-3}$
Постоянная тонкой структуры слабого		

Продолжение

Величина	Символ	Численное значение в системе СИ
взаимодействия $g_w m_e^2 c / \hbar^3$	α_w	$3,05 \cdot 10^{-12}$
Гравитационная постоянная тонкой структуры $G m_p^2 / \hbar c$	α_G	$5,90 \cdot 10^{-39}$

Приведенные здесь фундаментальные постоянные природы в значительной степени определяют существенные свойства большинства известных физических структур. Многие из этих свойств удивительно чувствительны к значениям постоянных и к некоторым, видимо, случайным числовым соотношениям между ними. Заметим, что H (и, вероятно, Λ) не являются постоянными, а изменяются в космологическом масштабе времени, тогда как k и e — просто переводные множители двух систем единиц.

Если величины, приведенные в табл. 3, действительно универсальны, то необходимо убедиться, что они — фундаментальные постоянные. Например, если заряд протона менялся бы в пространстве или во времени, то его нельзя было бы принимать в качестве фундаментальной величины. Чтобы описать вариации заряда протона, потребовался бы некоторый новый закон, который в свою очередь включал бы свои собственные, более фундаментальные параметры. Для проверки неизменности постоянных был выполнен целый ряд экспериментов. Их можно разделить на два класса: локальные эксперименты и космологические наблюдения. В локальных экспериментах ищут следствия изменения постоянных в геологической шкале времени. Например, изменения g , или e сказались бы на стабильности ядер и периоде α -распада ядер. Изменения гравитационной постоянной G повлияли бы на светимость Солнца и орбитальное движение Земли, и можно ожидать, что следствия этого можно было бы найти в геологических данных.

С помощью космологических наблюдений можно исследовать как пространственные, так и временные изменения физических законов, потому что от удаленных областей Вселенной мы сегодня принимаем излучение, испущенное миллиарды лет назад. Изменения e или m_e проявились бы в спектрах далеких галактик, а изменения G вызвали бы заметные эволюционные эффекты в структуре галактик и т. д.

Ни одно из самых тщательных рассмотрений не дало никаких бесспорных свидетельств изменений фундаментальных постоянных. Правда, некоторые авторы утверждают, будто гравитационная постоянная G изменяется менее чем на одну десятиллиардную в год, но эти данные допускают и альтернативные объяснения.

Космологические параметры H , Λ и S составляют исключение. Как уже отмечалось, постоянная Хаббла вовсе не должна быть постоянной: H^{-1} — это приблизительно возраст Вселенной. Считают, что в современную эпоху космологический член Λ меняется крайне незначительно со временем. Однако вполне возможно, что на очень ранней стадии эволюции Вселенной изменения Λ были велики и важны. Этот вопрос будет обсуждаться в разд. 4.5.

Ясно, что отношение S не является строго постоянным, так как фотоны непрерывно испускаются и поглощаются, а звезды непрерывно излучают тепло и свет. Тем не менее количество первичных фотонов во Вселенной значительно превышает количество фотонов, испущенных звездами, так что изменения S даже за космологические времена малы.

2.2. Микромир

В этом разделе будет показано, как характерные размеры основных микроскопических структур во Вселенной определяются постоянными, приведенными в табл. 3. В этом и в двух последующих разделах изложение основано на обзоре Карра и Риса (см. библиографию).

«Пена» пространства-времени. Наименьшие структуры, предсказываемые современной физикой, связаны с длиной Планка $l_P = 10^{-35}$ м. Хотя при таких чрезвычайно малых размерах эксперименты пока невозможны, теоретический анализ свидетельствует о том, что в масштабах l_P необходима кардинальная перестройка традиционных представлений о пространстве и времени. Для описания этого периода необходимо использовать совместно как теорию гравитации, так и

квантовую теорию. Как отмечалось в разд. 1.3, общая теория относительности Эйнштейна описывает гравитацию как искривление пространства-времени. Одной из основных особенностей квантовой теории являются спонтанные случайные флуктуации частиц и полей. Следовательно, в рамках квантовой гравитации, которая, как считается, становится важной в масштабах планковских длины и времени, по-видимому, могут проявляться сильные флуктуации кривизны пространства-времени. Топология пространства-времени может быть очень сложной и содержать «ручки» и «горловины». Выше отмечалось, что пространство-время, сравниваемое с гладким листом бумаги или холстом, на котором изображаются красками явления природы, в эту эпоху имеет больше сходства с губкообразной или пенистой структурой. Другой подход заключается в том, что пространство-время в каком-то смысле состоит из плотноупакованных черных дыр планковского размера.

Каждая из этих картин — лишь очень упрощенное схематическое выражение довольно абстрактных представлений квантовой теории гравитации, разработка которой еще не завершена.

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, связанных посредством сильного ядерного взаимодействия. Поэтому можно ожидать, что массы этих частиц и параметры ядерного взаимодействия определяются размерами ядер. Массы протона и нейтрона различаются меньше чем на 0,1%, так что для описания можно использовать одну только массу протона m_p . Поскольку ядро является квантовомеханической системой, при его описании нужно использовать постоянную Планка $\hbar$. Кроме того, поскольку ядерное взаимодействие сильное, существенная часть массы (около 1%) расходуется на энергию связи, так что для описания ядра теория относительности также необходима.

Из постоянных m_p , $\hbar$ и c можно составить величину с размерностью длины (комптоновскую длину волны протона, см. разд. 1.3)

$$\hbar/m_p c \sim 10^{-15} \text{ м.}$$

Эту длину часто называют размером протона, хотя такое определение вводит в заблуждение. Правильнее говорить, что нельзя локализовать протон в области пространства меньше $h/m_p c$. Такая формулировка следует из принципа неопределенности Гейзенберга

$$\Delta p \Delta x \sim h. \quad (2.1)$$

Это соотношение означает, что если положение частицы определено с точностью Δx , то неопределенность ее импульса p составляет $\Delta p \sim h/\Delta x$. Так, если $\Delta x \sim 10^{-15}$ м, то $\Delta p \sim 10^{-18}$ кг · м/с. Протон может иметь такой импульс только при движении со скоростью, близкой к скорости света. В таком случае кинетическая энергия столь велика, что ее достаточно для рождения новых частиц, например пары протон-антипротон:

$$\text{Энергия} \rightarrow p + \bar{p}.$$

Очевидно, исходный протон, если его запереть в области $\sim 10^{-15}$ м, стал бы порождать другие идентичные протоны (и антипротоны) и, таким образом, потерял бы свою индивидуальность. Ясно, что размер атомных ядер должен превышать комптоновскую длину волны. Легкие атомные ядра ненамного больше комптоновской длины.

Выше ничего не было сказано о силе взаимодействия между нуклонами. Оказывается, что интенсивность ядерного взаимодействия, определяемая постоянной g_s , не является подходящим параметром для описания размера ядра. Ядерные силы действуют только между ближайшими частицами и, следовательно, проявляют свойство насыщения: ядро с большим числом нуклонов обладает такой же энергией связи на нуклон, как ядро с малым числом частиц. Каждая частица просто придерживается своих ближайших соседей. Следовательно, размер ядра в значительной степени определяется общим числом частиц и радиусом действия силы между отдельными частицами. Как отмечалось в разд. 1.2, ядерная сила быстро спадает до нуля на расстоянии больше около 10^{-15} м. Таким образом, радиус действия, а значит, среднее расстоя-

ние между протонами и нейтронами примерно равны $\hbar/m_p c$.

Причину этого совпадения можно объяснить с помощью довольно простой модели происхождения ядерных сил, предложенной в 1930-х годах Юкавой. В этой модели взаимодействие между частицами описывается в рамках квантовой теории поля (разд. 1.3). Взаимодействие возникает из-за обмена переносчиками между протонами и нейтронами (рис. 5). Поскольку ядерная сила является короткодействующей, переносчики взаимодействия должны быть массивными, так как радиус действия приближенно равен комптоновской длине волны этих частиц. Отмеченное выше совпадение наводит на мысль о переносчиках взаимодействия, массы покоя которых не слишком отличаются от массы покоя протонов. И действительно, удалось отождествить переносчики взаимодействия с пи-мезонами, массы которых $\sim 0,1 m_p$. Следовательно, причина совпадения в том, что как переносчики ядерного взаимодействия, так и нуклоны построены из одинаковых кварков.

Атомы и молекулы. Следующие по характерному размеру структурные единицы — это атомы. Электронное облако связано с ядром атома электромагнитными силами, поэтому можно ожидать, что размер атома определяется постоянными e , $\hbar$ и m_e . Из них можно составить величину с размерностью длины (так называемый *радиус Бора*):

$$a_0 = 4\pi\epsilon\hbar^2/(m_e e^2) \sim 10^{-10} \text{ м} \quad (2.2)$$

и величину с размерностью энергии

$$E_{\text{ат}} = m_e e^4/(16\pi^2\epsilon^2\hbar^2) \sim 10^{-18} \text{ Дж.} \quad (2.3)$$

Точные вычисления дают, например, для атома водорода в наинизшем энергетическом состоянии энергию $-m_e e^4/(32\pi^2\epsilon^2\hbar^2)$. (Знак минус указывает, что электрон в атоме водорода связан и нужно приложить энергию, чтобы удалить его.) Эксперименты подтверждают, что диаметры атомов лежат в диапазоне 10^{-10} м.

Атомы связаны в молекулы за счет неполной компенсации электромагнитных сил, связывающих электроны с ядрами. Эти межатомные силы являются до-

вольно короткодействующими, поэтому молекулы, состоящие из малого числа атомов, сравнимы по размеру с самими атомами, т. е. межатомные расстояния незначительно превышают размер атома. Межатомные связи, вызванные этими остаточными эффектами, гораздо слабее внутриаомных связей. Очень приближенно

$$E_{\text{mol}} \sim 0,1 E_{\text{at}}, \quad (2.4)$$

где E_{mol} — энергия связи между атомами в молекуле.

2.3. Макроструктуры

Твердые тела. При рассмотрении больших количеств вещества критическим параметром является температура, так как она определяет, в какой фазе находится вещество: твердой, жидкой или газообразной. При температуре T средняя тепловая энергия молекулы составляет $\sim kT$, поэтому, чтобы вещество было в твердой фазе, kT не должно превышать $0,1 E_{\text{at}}$ (если принять, что молекулярная энергия связи составляет примерно 10% атомной энергии связи). Из формулы (2.3) находим $T \leq 10^4$ К, поэтому в наблюдаемой Вселенной, фоновая температура которой не превышает 3 К, условия благоприятствуют существованию твердых тел.

Когда большое число атомов упаковано вместе, межатомные силы сравнимы с силой связи с ядром периферийного электрона и во многих случаях, например в металлических кристаллах, более правильно считать эти периферийные электроны свободными частицами — электронным газом. Так или иначе, жесткость обычных веществ в значительной мере обусловлена электронами.

Плотность вещества определяется равновесием сил. Электромагнитные и гравитационные силы стремятся собрать вещество, но эта тенденция нейтрализуется направленным наружу давлением, обусловленным в случае твердых тел принципом Паули. Этот принцип утверждает, что два электрона не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии. Иначе говоря,

Таблица 4

Характерные размеры структурных единиц

Система	Размер, м	Признак структуры	Масса, кг	Характерные времена, с
Квантовая гравитация	10^{-35}	Пенистая структура пространства-времени	10^{-8}	10^{-43}
Кварки, лептоны	$< 10^{-18}$	Элементарные бесструктурные частицы	?	$< 10^{-26}$
Нуклоны	10^{-15}	Объединение кварков	10^{-27}	10^{-24}
Ядра	10^{-14}	Объединение нуклонов	10^{-25}	10^{-23}
Атом	10^{-10}	Ядра и электроны	10^{-25}	10^{-16}
Органическая молекула	10^{-7}	Соединение атомов	10^{-20}	10^3
Живая клетка	10^{-5}	Сложная упорядоченная структура	10^{-10}	10^3
Развитая форма жизни	1	Разумное существо	10^2	10^9
Город	10^4	Социальная структура	10^{11}	10^9
Гора, астероид	$10^4 - 10^5$	Неправильная форма	$10^{12} - 10^{13}$	—
Планета	10^7	Преобладание гравитации	10^{24}	10^4
Звезда	10^9	Термоядерные реакции	10^{30}	10^{17}
Планетная система	10^{11}	Звезды и планеты	10^{30}	10^8
Звездное скопление	10^{18}	Связано гравитационно	10^{35}	10^{15}
Галактика	10^{21}	Ядра и спиральные рукава	10^{41}	10^{16}
Скопление галактик	10^{23}	Наибольшая известная структура	10^{43}	10^{17}
Наблюдаемая Вселенная	10^{26}	Однородность и изотропность	10^{53}	10^{18}

В таблице приведены основные структурные единицы, из которых состоит наблюдаемая Вселенная. Числа даны по порядку величины. Характерное время соответствует минимальной длительности, в течение которой система передает заметную часть информации или подвержена значительному изменению структуры. Для первых четырех структурных единиц характерное время равно времени происхождения света через систему. Для биологических и социальных структур принято время воспроизведения или роста. Для звезд дается среднее время жизни, а для других гравитационно связанных систем более подходит время свободного падения (примерно время, за которое система коллапсирует). Для атома приведен период обращения электрона. Последняя строчка дает возраст Вселенной.

имеется разновидность отталкивания, которая стремится держать электроны на расстоянии друг от друга (не имеющая ничего общего с отталкиванием одноименных зарядов).

Чтобы пояснить принцип Паули, рассмотрим элементарную одномерную задачу. Допустим, что отдельный электрон помещен в ящик с жесткими стенками длиной L . Согласно квантовой теории, электрон обладает волновыми свойствами, причем длина волны связана с импульсом электрона p уравнением (1.8). Амплитуда волны вне ящика равна нулю. Из условия непрерывности амплитуда волны должна обратиться в нуль на стенках ящика. Таким образом, наибольшая длина волны и, следовательно, минимальный импульс достигаются, когда половина длины волны соответствует длине ящика L , т. е. когда $\lambda/2 = L$ (рис. 8). В этом «основном» состоянии электрон имеет минимально возможную кинетическую энергию

$$E = p^2/2m_e = h^2/8m_e L^2.$$

Если поместить в ящик второй электрон (и пренебречь электрическим отталкиванием электронов), то

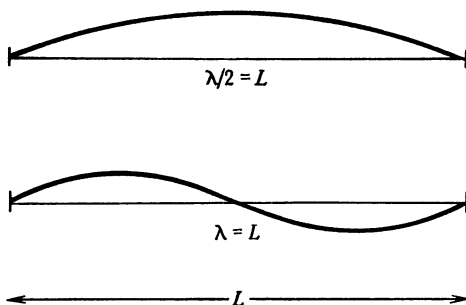


Рис. 8. В одномерном ящике длиной L может существовать только дискретная последовательность волн с длинами волн $\lambda = 2L$, $\lambda = L$, $\lambda = 3L/2$ и т. д. Вследствие принципа Паули волны, описывающие электрон в таком ящике, также должны соответствовать дискретному набору значений параметров. Никакие два электрона не могут иметь волну одинаковой формы. (Спин электрона не учитывается.)

вследствие принципа Паули он не может находиться в основном состоянии. Для него минимально возможной энергией будет первое возбужденное состояние, которое достигается, когда длина волны совпадает с длиной L . В этом случае $\lambda = L$ и $E = 4(h^2/8m_e L^2)$. Каждый последующий вводимый электрон должен занимать все более высокие энергетические уровни, которым соответствуют все меньшие длины волн. Так, k -й электрон будет иметь кинетическую энергию $k^2 h^2 / (8m_e L^2)$.

Если полное число электронов равно N , то их полную энергию можно вычислить, суммируя $k^2 h^2 / (8m_e L^2)$ по всем k от 1 до N . Для больших N результат приближенно равен $N^3 h^2 / (24m_e L^2)$, так что средняя энергия на один электрон составляет $N^2 h^2 / (24m_e L^2)$. Выраженный через плотность числа электронов n (т. е. числа частиц на единицу длины в этом одномерном случае), принцип Паули устанавливает среднюю энергию на электрон около $n^2 \hbar^2 / m_e$. Этот эффект отталкивания обычно называют *давлением вырожденного (электронного) газа*.

При переходе к трехмерному случаю результат остается таким же (с точностью до близких к единице численных множителей), только теперь n — концентрация электронов, поэтому нужно заменить n^2 на $n^{2/3}$. Следовательно, энергия вырождения

$$E_d \sim n^{2/3} \hbar^2 / m_e. \quad (2.5)$$

В теле небольших размеров, где гравитация незначительна, это давление уравнивается электрическими силами притяжения между электронами и положительно заряженными ядрами в веществе. Эти эффекты уравнивают друг друга, когда энергия притяжения на один электрон сравнима с энергией вырождения E_d . В объеме электрически нейтрального вещества число электронов равно числу положительных зарядов ядер. Если среднее расстояние между электронами и ядрами порядка a_0 (формула (2.2)), то электростатическая энергия, приходящаяся на один электрон, составит около $e^2 / 4\pi\epsilon a_0$, потому что взаимное притяжение двух разноименных зарядов будет практически нейтрализовать воздействие каждого из

них на остальные частицы. Если среднее расстояние равно a_0 , то полное число электронов в единице объема n равно a_0^{-3} и для электрической энергии можно записать

$$E_{el} \sim e^2 n^{1/3} / (4\pi\epsilon). \quad (2.6)$$

Приравняв (2.5) и (2.6), найдем концентрацию частиц: $n = e^6 m_p^3 / (64\pi^3 \epsilon^3 \hbar^6)$. При переходе от концентрации частиц n к плотности вещества обратим внимание на то, что большая часть массы твердого тела обусловлена ядрами, концентрация которых также составляет n . Взяв в качестве массы ядра несколько m_p и пренебрегая множителями порядка единицы, получим для плотности

$$\sim e^6 m_p^3 / (64\pi^3 \epsilon^3 \hbar^6) \sim m_p / a_0^3 \sim 10^3 \text{ кг/м}^3,$$

т. е. довольно реалистичную величину.

Планеты. Если рассматриваемое тело достаточно массивно, чтобы гравитация играла важную роль, то проведенные выше расчеты нужно модифицировать. Хотя гравитационное взаимодействие между отдельными атомами примерно на 40 порядков величины слабее электрического взаимодействия или эффекта вырождения, гравитация в отличие от силы электрического притяжения не нейтрализуется соседними частицами, поэтому она увеличивается с ростом числа частиц N . Гравитационная энергия сферического тела массы M и радиуса R составляет $\sim -GM^2/R \sim -GA^2 m_p^2 N^2 / R$, где A — молекулярная масса вещества. Для больших твердых тел, таких, как наша Земля, значение A может быть довольно велико, поэтому мы и включили A как дополнительный множитель. Гравитационная энергия становится сравнимой с электрической и энергией вырождения, если

$$GA^2 m_p^2 N^2 / R \sim Ne^2 / 4\pi\epsilon a_0,$$

или

$$R \sim Na_0 A^2 (4\pi\epsilon G m_p^2 / e^2). \quad (2.7)$$

Величина $4\pi\epsilon G m_p^2 / e^2$ — безразмерное число, играющее фундаментальную роль; оно представляет собой

отношение гравитационной и электромагнитной сил, действующих между двумя протонами. По аналогии с постоянной тонкой структуры α (1.11) для электромагнетизма введем постоянную гравитационной «тонкой структуры»:

$$\alpha_G \equiv G m_p^2 / \hbar c \approx 5 \cdot 10^{-39}. \quad (2.8)$$

Эта фундаментальная безразмерная величина будет часто встречаться в следующих разделах. Выразим радиус планеты через α и α_G :

$$R_{pl} \sim (\alpha / \alpha_G)^{1/2} a_0 / A, \quad (2.9)$$

где использовалось соотношение $N \sim R^3 / a_0^3$.

Для достаточно плотных объектов $A \approx 50$, поэтому

$$R_{pl} \sim 10^7 \text{ м},$$

что сравнимо с радиусом Земли. Отсюда можно сделать вывод, что в подобных телах гравитационные силы вызовут значительное изменение твердой структуры вещества, приводя к ощутимому сжатию и плавлению. Эти явления происходят в земных недрах.

Ускорение силы тяжести на поверхности тела равно

$$g = GM / R^2. \quad (2.10)$$

Если на поверхности тела образуется «выпуклость» (гора) высотой H , то она будет оказывать давление на свое основание, и если это давление достаточно сильно, чтобы расплавить подстилающий материал, то станет возможным опускание горы. Потенциальная энергия составляет $\sim H A \dot{m}_p g$ на молекулу, и если она составляет заметную долю (скажем, 10%) молекулярной энергии связи вещества в основании горы, то будет иметь место переход в жидкую фазу. Такое тело автоматически будет стремиться принять сферическую форму, подобно Земле. Поэтому максимальная высота горы $H_{\max}$ составляет

$$\begin{aligned} H_{\max} &\sim (10^{-2} e^4 m_e / 16 \pi^2 \varepsilon^2 \hbar^2) / (G M m_p A / R^2) \sim \\ &\sim 10^{-2} (\alpha / \alpha_G) (a_0^2 / A^2 R). \end{aligned} \quad (2.11)$$

При выводе формулы (2.11) использовались соотно-

шения (2.4) и $M \sim A m_p R^3 / a_0^3$. Подставляя в формулу (2.11) $R = R_{pl}$ из (2.9), получим

$$H_{\max} \sim 10^{-2} R_{pl} \sim 10^5 \text{ м.} \quad (2.12)$$

Это вполне разумная оценка. Самая высокая гора на Земле ближе к $10^{-3} R_{pl}$, т. е. значительно меньше, чем $H_{\max}$. Но самая высокая гора на Марсе гораздо ближе к $H_{\max}$.

Если масса тела несколько меньше, чем масса планеты, то оно может иметь неправильную форму. Если высота «горы» H становится сравнимой со средним радиусом тела R , то отклонения от сферичности велики. Такая структура будет сохраняться лишь в случае, если

$$H A m_p g \lesssim 0,1 E_{\text{mol.}}$$

Подставляя (2.4) и (2.10) и принимая $H \sim R$, получим

$$R \lesssim 0,1 R_{pl} \sim 10^6 \text{ м.}$$

Объекты неправильной формы меньше этого размера хорошо известны в Солнечной системе: это астероиды.

Звезды. Для планет не учитывались эффекты тепловой энергии. В большом гравитирующем объекте вещество в центре будет сжиматься и, следовательно, будет повышаться внутренняя температура. Если она достигнет нескольких миллионов кельвинов, то начнутся термоядерные реакции и структура объекта изменится коренным образом. При таких температурах тело будет газообразным, а не твердым, а вследствие ядерных реакций оно будет испускать мощный поток излучения. Объект станет звездой.

Газовый шар радиуса R сохраняет равновесие, если его собственное тяготение уравнивается суммой внутреннего теплового давления и давления вырожденных электронов. Это достигается, когда гравитационная энергия на одну частицу сравнима с суммой тепловой энергии kT и энергии вырождения (2.5). Для водорода, исходя из этих соображений, можно получить

$$kT + N_*^{2/3} \hbar^2 / m_e R^2 \sim G M m_p / R \sim G m_p^2 N_* / R, \quad (2.13)$$

где N_* — полное число протонов в звезде.

При низкой плотности (большом R) выражение с R^{-2} в (2.13) мало (давление вырождения незначительно), так что температура T пропорциональна R^{-1} . Такая ситуация имеет место, когда звезда еще только формируется из медленно сжимающегося газового облака. Однако в конце концов по мере уменьшения радиуса слагаемое в (2.13), описывающее вырождение, становится существенным, и температура достигает максимума, когда разность

$$G m_p^2 N_* / R - N_*^{2/3} \hbar^2 / m_e R^2$$

максимальна. Это имеет место при радиусе

$$R = 2 \hbar^2 / G m_p^2 m_e N_*^{1/3};$$

в этом случае температура определяется соотношением

$$k T_{\max} \sim (G m_p^2 / \hbar c)^2 N_*^{1/3} m_e c^2. \quad (2.14)$$

Чтобы сжимающийся объект стал звездой, его температура $T_{\max}$ должна быть достаточно высока для протекания реакций термоядерного синтеза. Требуемая для этого температура зависит от особенностей сильного и электромагнитного взаимодействий, определяющих ядерный потенциальный барьер, сквозь который должны просачиваться энергичные протоны. На первый взгляд кажется, что для этого нужно $kT \sim 10 m_e c^2$ (энергия, выделяемая в процессе термоядерного синтеза). Но в действительности ядерные реакции могут происходить при гораздо более низких температурах благодаря квантовому туннельному эффекту и распределению протонов по энергиям в широком диапазоне при любой заданной температуре. Таким образом, некоторые протоны всегда имеют существенно большую энергию, чем средняя. В разд. 3.3 будет показано, что достаточно

$$kT \sim 10^{-2} m_p c^4 / (4\pi \epsilon \hbar)^2.$$

Можно использовать эту информацию для расчета минимального числа протонов в звезде. Подставляя в (2.14)

$$k T_{\max} \sim 10^{-2} m_p c^4 / (4\pi \epsilon \hbar)^2,$$

получим

$$(10^{-2}\alpha^2 m_p/m_e)^{3/4} \alpha_G^{-3/2} \sim 0,1 \alpha_G^{-3/2} \sim 10^{56} \quad (2.15)$$

и соответствующий минимальный радиус

$$R_{\min} \sim \alpha_G^{-1/2} \alpha a_0 \sim 10^{18} a_0 \sim 10^8 \text{ м.} \quad (2.16)$$

Эта величина сравнима с размером планеты, поэтому можно заключить, что нет резкой границы между большими планетами, такими, как Юпитер, и звездами-карликами. Действительно, в центре Юпитера температура, вероятно, составляет около 25 000 К.

В приведенных выше оценках не учитывались эффекты излучения. Разумно ли это? При температуре T плотность энергии излучения равна σT^4 , где $\sigma = 8\pi^5 k^4 / (15c^3 h^3)$ — постоянная плотности излучения. Полная энергия излучения внутри звезды составляет около $\sigma T^4 R^3$ и сравнима с кинетической энергией частиц $\sim N_* kT$. Если пренебречь давлением вырождения, то из соотношения (2.13) следует

$$kTR \sim Gm_p^2 N_*.$$

Таким образом,

$$\sigma T^4 R^3 / (N_* kT) \sim \alpha_G^3 N_*^2,$$

т. е. величина порядка единицы при $N_* \sim \alpha_G^{-3/2}$.

Для N_* , превышающего это значение, динамика звезды будет определяться излучением, и, вероятно, это приведет к неустойчивостям типа пульсаций, а в итоге — к разрушению звезды. Исходя из этого, $\alpha_G^{-3/2}$ принимается в качестве максимального значения N_* . Оно удивительно близко к минимальному значению N , задаваемому формулой (2.15) и, таким образом, определяет узкий диапазон допустимых значений около $\alpha_G^{-3/2} \sim 10^{57}$. Из этих элементарных представлений можно сделать вывод, что число частиц, содержащихся в типичной звезде, дается, на удивление, простой формулой:

$$N_* \sim \alpha_G^{-3/2}. \quad (2.17)$$

Масса приближенно дается соотношением

$$M_* \sim N_* m_p \sim \alpha_G^{-3/2} m_p. \quad (2.18)$$

Каковы бы ни были условия в недрах звезды, мы

наблюдаем ее поверхность. Наиболее важным параметром поверхности является светимость L — поток энергии в форме излучения, испускаемый в единицу времени. Если звезда стабильна и находится в состоянии равновесия, то у нее, очевидно, темп потерь энергии с поверхности точно уравнивается темпом генерации энергии в недрах. Последний определяется температурой в центре T_c , от которой зависит скорость термоядерного синтеза в ядре звезды. Хотя между ядром и поверхностью звезды существует температурный градиент, можно оценить (по порядку величины) полную лучистую энергию звезды, подставив $T = T_c$ в формулу $\sigma T^4 R^3$. В таком случае светимость дается произведением этой энергии на скорость, с которой энергия переносится наружу. В квантовомеханическом приближении светимость равна энергии всех фотонов в звезде, деленной на время диффузии фотонов внутри звезды.

Генерируемые в ядре звезды фотоны не могут свободно пройти сквозь вещество звезды, так как оно весьма непрозрачно. Они могут пройти только очень короткое расстояние, а затем рассеиваются на ионе или электроне. Для звезд умеренного размера непрозрачность создается главным образом свободными электронами. Если пренебречь отдачей электронов (энергия фотонов относительно низка во внешних слоях звезды, где сосредоточена большая часть вещества), то поперечное сечение рассеяния дается формулой Томсона

$$\sigma_T = e^4 / (4\pi\epsilon m_e c^2)^2. \quad (2.19)$$

В этом случае среднее расстояние, проходимое типичным фотоном между двумя актами рассеяния, составляет

$$\bar{l} \approx 1 / n_e \sigma_T, \quad (2.20)$$

где n_e — средняя концентрация электронов, которая приблизительно равна средней концентрации фотонов, или примерно равна N/R^3 . Таким образом,

$$\bar{l} \sim 16\pi^2 \epsilon^2 m_e^2 c^4 R^3 / N e^4. \quad (2.21)$$

Если бы фотоны свободно проходили сквозь вещество,

то для достижения поверхности им потребовалось бы время R/c . Однако фотоны, рассеиваемые электронами, совершают случайные блуждания внутри звезды, постепенно просачиваясь к поверхности. При этом время выхода оказывается в $R/\bar{l}$ раз больше. Следовательно, светимость составляет

$$L \sim \sigma T_c^4 R^3 / (R/c)(R/\bar{l}).$$

Обычно светимость выражается несколько иначе — через непрозрачность вещества звезды $\kappa \equiv (\bar{l} \times \text{плотность})^{-1}$. Поскольку плотность вещества составляет $\sim M/R^3$, находим

$$L \sim \sigma T_c^4 R^4 / \kappa M. \quad (2.22)$$

Выражение (2.22) является, по существу, отношением полной свободной энергии излучения к времени утечки ее из звезды.

С учетом того, что плотность энергии излучения в типичной звезде не очень отличается от тепловой энергии частиц, можно получить альтернативное выражение для L . Если пренебречь эффектами вырождения, то из уравнения (2.13) следует, что тепловая энергия хаотического движения kT приблизительно равна гравитационной энергии связи на одну частицу. Объединение этих двух приближенных равенств показывает, что полная энергия излучения по порядку величины равна полной энергии связи, или

$$\sigma T_c^4 R^3 \sim GM^2/R. \quad (2.23)$$

Подставляя (2.23) в формулу (2.22), получим так называемую светимость Эддингтона

$$L \sim GMc/\kappa. \quad (2.24)$$

В наших целях уместно показать явную зависимость L от электрического заряда e , поэтому с помощью (2.21) исключим κ из (2.22) и (2.24). Соответственно получаются два выражения для светимости:

$$L \sim 16\pi^2 \epsilon^2 \sigma T_c^4 R^4 m_e^2 c^5 / (Ne^4), \quad (2.25)$$

$$L \sim 16\pi^2 \epsilon^2 GMm_p m_e^2 c^5 / e^4. \quad (2.26)$$

Другая важная характеристика звезды — время ее жизни. Беглый осмотр неба дает впечатление статич-

ной, неменяющейся Вселенной. За исключением новых или переменных звезд, звезды, по-видимому, не меняются на протяжении столетий. В частности, Солнце оставалось стабильным и очень мало изменило свою светимость в течение более 4 млрд. лет. Это следует из данных о том, что жизнь на Земле зародилась свыше 3 млрд. лет назад. Океаны жидкой воды существуют на Земле в течение большей части истории Солнечной системы, что косвенно свидетельствует о довольно ограниченном изменении температуры и светимости Солнца.

Стабильность условий на Земле и в ее окрестностях в течение столь длительного времени является следствием не слишком быстрого сжигания Солнцем запасов водородного топлива. Примерно через пять миллиардов лет, когда эти запасы исчерпаются и ядерные реакции больше не смогут поддерживать его, Солнце вступит в период неустойчивой быстрой эволюции и в конце концов превратится в белый карлик. Подобное поведение характерно для большинства звезд.

Темп, с которым расходуется ядерное топливо в недрах звезды, зависит от ее светимости, которая в свою очередь зависит от гравитации (через G) и электромагнитных сил (через непрозрачность звездного вещества и, следовательно, через e). Приблизительно время жизни звезды можно найти делением ее полной энергии на темп расхода энергии L . Энергия вычисляется исходя из того, что слияние ядер водорода в более тяжелые элементы приводит к высвобождению около 1% массы покоя каждого протона. Если таким путем будет израсходован весь водород в звезде, то высвободится энергия около $10^{-2} Mc^2$. Деля на (2.26), получим, что время жизни звезды составляет около

$$t_* \sim 10^{-2} e^4 / (16\pi^2 e^2 G m_p^2 m_{pc}^3).$$

Это соотношение можно выразить более наглядно через ядерное характерное время $t_N \sim h/m_p c^2$:

$$t_* \sim [10^{-2} \alpha^2 (m_p/m_e)^2] t_N \alpha_G^{-1}. \quad (2.27)$$

Величина в квадратных скобках — порядка единицы, поэтому

$$t_* \sim \alpha_G^{-1} t_N \sim 10^{40} t_N. \quad (2.28)$$

Вновь мы неожиданно встречаемся с «магическим» числом $\sim 10^{40}$. Вспоминая соотношение (1.15), можно записать

$$t_*/t_p \sim (t_N/t_p)^3, \quad (2.29)$$

отсюда

$$t_* \sim t_H, \quad (2.30)$$

т. е. время жизни типичной звезды сравнимо с возрастом Вселенной, и эта оценка представляется справедливой. Из соотношения (2.18) получим дополнительное соотношение

$$M_*/m_p \sim t_*/t_p. \quad (2.31)$$

Из предыдущего обсуждения следует, что если бы гравитация была сильнее, то звезды быстрее сгорели бы дотла. Увеличение G в 10 раз полностью изменило бы строение Солнечной системы за время ее существования. Например, нашей Земли уже не было бы, она испарилась бы, когда Солнце в ходе эволюции достигло стадии красного гиганта, почти израсходовав свои запасы ядер водорода.

Крайняя слабость гравитации — интересное свойство природы. Сила гравитации в атоме водорода примерно в 10^{40} раз слабее электромагнитных сил, и это соотношение прямо влияет на время жизни звезды. Короче говоря, чрезвычайно большое характерное время, необходимое, чтобы в наблюдаемой Вселенной произошли заметные изменения, обусловлено слабостью гравитационного взаимодействия.

2.4. Строение наблюдаемой Вселенной

Самые заметные структурные единицы в масштабах, превышающих звездный, — это галактики. Типичной галактикой является наша Галактика, содержащая около 10^{11} звезд, массы которых сравнимы с массой Солнца $M_\odot$. Как отмечалось в разд. 1.1, сами галактики группируются в скопления полной массой около $10^{14} M_\odot$ и размерами около 10^{23} м.

В отличие от структурных единиц, рассмотренных в разд. 2.2 и 2.3, видимо, невозможно объяснить размеры или массы галактик и скоплений галактик на основании одних только физических постоянных. Приступая к разработке теории расширяющейся Вселенной, ученые надеялись, что существование галактик можно объяснить следующим образом. Принималось, что первичный газ, появляющийся в начале расширения, был однородно распределен по всему пространству. По мере расширения Вселенной плотность газа непрерывно падала.

Статистические флуктуации этого горячего газообразного вещества приводили бы к незначительному увеличению плотности в одних областях и незначительному ее уменьшению в других в результате случайных возмущений в равномерно распределенном газе. В этом случае в окрестности области уплотнений гравитационное притяжение окружающего вещества было бы несколько выше, значит, появилась бы тенденция к накоплению в этой области все большего количества вещества. Таким образом, возникает естественная тенденция роста со временем возмущений плотности. Так в конце концов могли бы образоваться галактики.

Рост областей уплотнений должен противостоять всеобщему космологическому расширению. В результате расширения плотность газа уменьшается, а возмущение плотности сдерживает локальное расширение. Поэтому более плотные области газа растут, но очень медленно — слишком медленно, чтобы этим можно было объяснить образование галактик за время, прошедшее от начала расширения.

Один способ обойти эту проблему — постулировать присутствие значительных неоднородностей плотности уже в начале расширения, так что требовалось лишь небольшое усиление возмущений в ходе последующего расширения. Хотя это предположение и объясняет существование галактик, оно означает, что приходится допустить своевременное появление именно требуемых возмущений в надлежащем масштабе и с плотностью, достаточной для образования галактик, но не настолько большой, чтобы вызвать катастрофический гравита-

ционный коллапс с образованием черных дыр. Таким образом, это объяснение существования галактик и скоплений галактик основывается на начальных условиях, а не на фундаментальных постоянных. Если бы эти условия отличались от требуемых по характерному размеру или амплитуде неоднородности, то крупномасштабная структура наблюдаемой Вселенной была бы совершенно иной.

Следует отметить, что происхождение возмущений плотности искали в свойствах вещества в очень ранние эпохи (< 1 с). Было предложено много механизмов, в том числе иные, чем гравитация, силы. Не исключено, что адронные процессы до 10^{-6} с после начала расширения могли приводить к конденсации вещества в «капли» галактической массы. К сожалению, эти ранние эпохи настолько плохо поняты, что любые попытки объяснить происхождение галактик, основанные на гипотетических физических процессах, протекавших в те эпохи, в высшей степени умозрительны. Мы вернемся к этой теме и обсудим ее подробнее в следующей главе.

Наиболее крупномасштабным структурным элементом, конечно, является сама Вселенная. Как описывалось в разд. 1.1 и 1.5, неожиданно высокая степень однородности Вселенной на очень больших масштабах позволяет характеризовать глобальное поведение Вселенной единственным параметром — масштабным фактором $a(t)$. Исходя из этого параметра, можно найти характерное время $t_H \equiv a/\dot{a}$ — время Хаббла, сравнимое с возрастом Вселенной.

Следующий представляющий интерес динамический параметр — скорость, с которой замедляется расширение Вселенной. Как объяснялось в гл. 1, это замедление обусловлено гравитационным притяжением всех галактик и других видов материи. Следовательно, интенсивность замедления зависит от характера гравитирующей материи. Для обычного вещества применима формула (1.16), а для Вселенной, в которой преобладает излучение, следует применять формулу (1.17). Подробнее мы рассмотрим динамику Вселенной в гл. 4, там будет показано, что и другие соображения могут также повлиять на определение $a(t)$.

Независимо от того, какие эффекты должны учитываться при определении $a(t)$, фактическое замедление можно описать параметром

$$q = -\ddot{a}/\dot{a}^2 \quad (2.32)$$

который принимает значения $1/2$ и 1 соответственно в случаях (1.16) и (1.17).

Силу гравитации космической материи, которой отчасти определяется q , можно выразить через плотность энергии ϱ различных компонентов. Согласно современным наблюдениям, для вещества

$$\varrho_m \approx 10^{-11} \text{ Дж/м}^3, \quad (2.33)$$

для электромагнитного излучения

$$\varrho_\gamma \approx 10^{-14} \text{ Дж/м}^3, \quad (2.34)$$

и эти значения меняются со временем согласно (1.19) и (1.20). Плотность энергии вещества (2.33) относится к энергии массы покоя, вклад которой преобладает в современную эпоху. Приведенные оценки, возможно, следует пересмотреть, исходя из некоторых недавно полученных экспериментальных результатов относительно массы покоя нейтрино (разд. 3.1).

Отношение ϱ_γ/ϱ_m меняется пропорционально $a^{-1}(t)$, поскольку по мере расширения Вселенной ϱ_γ уменьшается сильнее, чем ϱ_m , из-за красного смещения. Значительно большее отношение плотностей излучения и вещества можно получить, если рассматривать не плотность энергии, а концентрацию частиц. В случае нерелятивистского вещества ϱ_m пропорционально концентрации частиц. Поскольку вещество во Вселенной в основном состоит из водорода,

$$\varrho_m \approx m_p n_p \propto a^{-3}, \quad (2.35)$$

где n_p — концентрация протонов.

Плотность излучения равна

$$\varrho_\gamma \approx n_\gamma h\nu, \quad (2.36)$$

где n_γ — плотность числа фотонов, а $h\nu$ — энергия типичного фотона (формула (1.7)). По мере расширения Вселенной длина волны излучения увеличивается

пропорционально $a(t)$, следовательно, $v \propto a^{-1}$. Вспомогая, что $\rho_\gamma \propto a^{-4}$, из (2.36) получим

$$n_\gamma \propto a^{-3} \quad (2.37)$$

Отсюда следует, что отношение n_γ/n_p постоянно и не зависит от времени. Следовательно, оно является фундаментальным безразмерным, очень важным для космологии отношением. Это отношение принято обозначать через S . Из формул (2.33) и (2.34) находим

$$S \equiv n_\gamma/n_p \sim 10^9. \quad (2.38)$$

Хотя S представляет собой отношение только концентраций фотонов и протонов, в радиационную составляющую Вселенной, несомненно, вносят вклад и другие типы частиц (гравитоны, нейтрино). Большинство космологов полагают, что они сравнимы с вкладом фотонов (см. разд. 4.4).

Другой способ определить величину (2.33) — это принять естественную единицу объема и пользоваться полным числом частиц, а не их концентрацией. Очевидное характерное расстояние — это ct_H , расстояние, на которое распространился свет за время Хаббла. Поскольку оно примерно равно расстоянию, пройденному светом с начала расширения Вселенной, то представляет максимальный современный размер области Вселенной, доступной наблюдениям. Согласно формуле (2.33), число протонов, находящихся в области радиуса Хаббла, составляет

$$N \sim 10^{80}. \quad (2.39)$$

Оно ненамного меньше полного числа барионов (протонов и нейтронов) или даже полного числа барионов и электронов. Заметим, что N равно квадрату «магического» числа 10^{40} ; это замечательное и очевидное совпадение будет обсуждаться в гл. 4.

Параметры H , q , S и N вместе характеризуют крупномасштабную структуру Вселенной. Их значения отчасти определяются начальными условиями, которые существовали во Вселенной в начале ее расширения. В последующих разделах мы покажем, как чувствительна структура Вселенной к значениям этих параметров.

ТОНКАЯ ПОДСТРОЙКА ВСЕЛЕННОЙ

В предыдущей главе было показано, что структура многих систем, наблюдаемых в природе, определяется относительно малым числом универсальных постоянных. Если бы эти постоянные имели другие численные значения, чем наблюдаемые, то структура систем была бы иной. И, что особенно интересно, во многих случаях очень маленькое отличие значений приводило бы к радикальному изменению структуры рассматриваемой системы. Очевидно, наблюдаемая структура мироздания обусловлена «тонкой подстройкой» этих значений. В этой и следующей главах будет сделан обзор некоторых наиболее интересных примеров.

3.1. Нейтрино

Самыми многочисленными частицами во Вселенной являются нейтрино. Теория показывает, что после начала расширения на каждый протон и электрон образовалось $\sim 10^9$ нейтрино и теперь Вселенную заполняет «океан» нейтрино. Однако нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с обычным веществом. Земля, например, почти полностью прозрачна для них. Следовательно, утверждение, что Вселенная погружена в «океан» нейтрино, нельзя экспериментально проверить непосредственно на Земле.

Поскольку количество нейтрино столь колоссально, крупномасштабная структура Вселенной очень чувствительна к их свойствам. До недавнего времени полагали, что масса покоя нейтрино равна нулю и, следовательно, они движутся со скоростью света. В 1980 г. экспериментально было показано, что это давнишнее допущение может быть ошибочным. Из предварительных результатов экспериментов следует,

что масса покоя нейтрино может составлять $5 \cdot 10^{-35}$ кг, или около $5 \cdot 10^{-5}$ массы электрона.

Но ситуация осложняется тем, что существует несколько типов нейтрино. В настоящее время рассматриваются три типа этих частиц (разд. 1.4). Одна из неожиданностей недавних экспериментов состоит в том, что нейтрино, очевидно, может осциллировать, превращаясь из одного типа в другой*. Явление нейтринных осцилляций тесно связано с предсказываемой ненулевой массой покоя, по крайней мере для электронного нейтрино.

Хотя масса $5 \cdot 10^{-35}$ кг чрезвычайно мала по сравнению с массами всех других известных элементарных частиц, из высокой концентрации нейтрино во Вселенной (около 10^9 м^{-3}) следует, что полная масса всех нейтрино может превосходить общую массу всех звезд. Если же масса нейтрино равнялась бы, скажем, $5 \cdot 10^{-34}$ кг, то сила гравитации первичного фона нейтрино вызвала бы радикальное изменение процесса расширения Вселенной; возможно, оно давно прекратилось бы. В таком случае столь крошечная добавка привела бы к тому, что современная наблюдаемая Вселенная сжималась бы.

Несколько большая масса покоя нейтрино имела бы также и другие следствия. Современная температура фона нейтрино составляет 2 К. Это значит, что при наличии заметной массы покоя большинство нейтрино были бы нерелятивистскими частицами, а их скорость была бы ниже скорости ускользания из скоплений галактик. Следовательно, нейтрино должны концентрироваться вблизи центров скоплений и создавать «густой туман», в котором галактики вращаются и движутся по замкнутым орбитам. Хотя звезды и газ чрезвычайно слабо взаимодействуют непосредственно с нейтрино (за счет слабого взаимодействия), все же нейтрино могут воздействовать на галактики гравитационно. Результат — трение, тормозящее движение галактик. Вычисления, проведенные группой физиков-теоретиков из Техасского университета в Остине, по-

* К маю 1984 г. нет достоверных экспериментальных указаний на нейтринные осцилляции. — *Прим. ред.*

казывают, что если бы масса нейтрино была несколько больше приведенного значения, то «густой туман» нейтрино угрожал бы наблюдаемой структуре галактик. Будь масса нейтрино чуть больше, это привело бы к изменению структуры галактик.

Следует однако отметить, что слишком большая масса нейтрино (например, сравнимая с массой протона) привела бы к снижению количества первичных нейтрино в соответствии с теоремой Больцмана, согласно которой при распределении энергии предпочтение оказывается самым легким частицам (см. с. 49). В этом случае космический фон нейтрино не играл бы никакой роли.

Интересно также чрезвычайно слабое взаимодействие между нейтрино и обычным веществом. Хотя это взаимодействие незначительно, оно играет большую роль в космологии. В течение горячей ранней эпохи (до истечения первой секунды от начала расширения) температура Вселенной была выше 10^{10} К и в ней содержались в большом количестве позитроны (разд. 1.5). При взаимодействии нейтрино и антинейтрино с электронами, позитронами, нейтронами и протонами происходили следующие реакции:



так что протоны и нейтроны могли превращаться друг в друга. Пока темп этих реакций был значительно выше темпа космического расширения, они могли поддерживать термодинамическое равновесие между нейтронами и протонами.

Как объяснялось в разд. 1.5, в условиях этого равновесия отношение числа нейтронов и протонов определяется фактором Больцмана $\exp(-\Delta mc^2/kT)$, где Δm — разность масс нейтрона и протона. По мере расширения Вселенной темп расширения непрерывно уменьшается. Скорости реакций также уменьшаются, потому что Вселенная охлаждается и концентрации частиц падают. Приведенные выше реакции становятся все более медленными, и так до тех пор, пока в конце концов скорости их не станут ниже скорости расширения. Тогда термодинамическое равновесие нарушится и отношение числа частиц заморозится при

значении, которое они имели при температуре нарушения равновесия.

Температура T_F , при которой нарушается равновесие, определяется условием равенства скоростей расширения ($\dot{a}/a$) и вышеупомянутых реакций. В гл. 4 будет показано, что в ранней Вселенной скорость расширения составляла

$$\dot{a}/a \approx (8\pi G\rho/3c^2)^{1/2}, \quad (3.1)$$

где ρ — плотность полной энергии во Вселенной, в которой в ту эпоху преобладало излучение. Следовательно, для ρ можно использовать закон Стефана — Больцмана с соответствующим численным множителем, учитывающим вклад от различных видов излучения. Этот множитель — порядка единицы. Подставляя вместо постоянной плотности излучения σ ее выражение в явном виде, получим

$$\dot{a}/a \sim (Gk^4 T^4 / \hbar^3 c^5)^{1/2}. \quad (3.2)$$

Перейдем к скорости превращений нейтронов в протоны (и протонов в нейтроны). Она определяется постоянной слабого взаимодействия g_w и температурой T . Объединяя эти величины в выражение с размерностью, обратной времени, получим

$$\text{Скорость реакции} \sim g_w^2 k^5 T^5 / \hbar^7 c^6. \quad (3.3)$$

Приравнявая (3.2) и (3.3), получим следующее выражение для температуры T_F :

$$kT_F \sim G^{1/6} g_w^{-2/3} \hbar^{11/6} c^{7/6}. \quad (3.4)$$

Именно на этой стадии обнаруживается удивительное совпадение. Во-первых, оказалось, что разность масс нейтрона и протона лишь немного больше массы электрона:

$$\Delta m \approx m_e. \quad (3.5)$$

Во-вторых, постоянная слабого взаимодействия g_w , по-видимому, случайно связана с постоянной гравитации G следующим соотношением:

$$(Gm_e^2/\hbar c)^{1/4} \approx g_w m_e^2 c / \hbar^3 \sim 10^{-11}. \quad (3.6)$$

Если эти две случайные числовые зависимости подставить в формулу (3.4), то получится

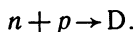
$$kT_F \approx \Delta mc^2. \quad (3.7)$$

Соотношение (3.7) означает, что фактор Больцмана $\exp(-\Delta mc^2/kT_F) \approx e^{-1}$. Этот фактор определяет отношение числа нейтронов к числу протонов во Вселенной, а из вышеприведенного рассмотрения следует, что содержание нейтронов будет составлять значительную, но не подавляющую часть общего числа барионов во Вселенной. Детальные расчеты дают значение около 10%.

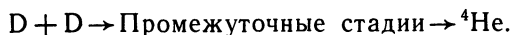
Если бы случайно не оказалось, что $\Delta mc^2/kT_F$ примерно равно единице, то отношение числа нейтронов к числу протонов могло бы быть либо близким нулю, либо к единице. Таким образом, химический состав Вселенной существенно зависит от случайной согласованности численных значений постоянных из различных областей физики.

Какой скрытый смысл в случайных сочетаниях (3.6) и (3.7) фундаментальных постоянных? Если бы kT_F было несколько больше Δmc^2 (или если бы Δm было значительно меньше m_e), то показатель степени в факторе Больцмана был бы мал, а сам фактор — очень близок к единице. Например, если $kT_F = 10\Delta mc^2$, то отношение числа нейтронов к числу протонов было бы равно 0,9. Это оказало бы сильное влияние на будущую структуру Вселенной, и вот почему.

Когда температура упала ниже 10^9 К (т. е. ниже температуры фотодиссоциации дейтерия), свободные нейтроны быстро объединялись со свободными протонами, образовав дейтерий:



При слиянии двух дейтронов образуется ядро гелия:



Ядро ${}^4\text{He}$ содержит равное число протонов и нейтронов. Принимая, что все нейтроны пошли на образование гелия, получим, что водород — это не нашедшие себе пары протоны, избыток которых обусловлен зна-

чением фактора Больцмана. И если бы фактор Больцмана был близок к единице, то осталось бы очень мало водорода.

Водород играет очень важную роль в химии Вселенной. Без водорода не было бы ни органических веществ, ни воды. Не могли бы существовать и планеты, подобные Земле с ее огромными океанами. Но более существенно то, что водород является топливом для большинства обычных устойчивых звезд, таких, как наше Солнце. Конечно, звезды могли бы образовываться и из другого вещества, но их вид и поведение были бы совсем иными. В частности, звезды, состоящие из гелия, слишком рано заканчивали бы свой жизненный путь, взрываясь или полностью сгорая. Из этого следует, что существование наиболее важных макроскопических структур природы — звезд, сжигающих водород, связано со случайным численным соотношением между фундаментальными постоянными, входящими в формулы (3.6) и (3.7).

Существование водорода представляется еще более замечательным, если вспомнить, что нейтроны и протоны — это составные частицы, отличающиеся только содержанием u - и d -кварков. Разность масс Δm составляет около 10^{-3} массы протона, т. е. очень мала. Если бы разность составляла только одну треть этого значения, то свободные нейтроны не могли бы распадаться на протоны, так как избытка массы было бы недостаточно для образования электрона. Более того, если бы масса нейтрона составляла только 0,998 ее значения (т. е. если бы u -кварк был слегка массивнее d -кварка), то свободные протоны могли бы распадаться на нейтроны с излучением позитронов: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$. В таком случае, возможно, атомов не было бы вовсе!

Если бы kT_F было значительно меньше Δmc^2 , то отношение числа нейтронов к числу протонов было бы близко к нулю и во Вселенной было бы очень мало гелия. Это, вероятно, не имело бы важных последствий (хотя существование первичного гелия в звездах все же влияет до некоторой степени на их характеристики). Однако есть другая причина, по которой постоянная слабого взаимодействия g_w не могла, вероятно, меняться слишком сильно в любую сторону без силь-

ного изменения химического состава Вселенной. Это относится к одному из самых важных и эффектных процессов природы — взрывам сверхновых.

Когда массивная звезда исчерпает свои запасы ядерного топлива, ее ядро становится неустойчивым относительно гравитационного сжатия. Ядро звезды, не способное больше генерировать энергию для поддержания внутреннего давления, начинает сжиматься под действием самогравитации. При определенных обстоятельствах сжатие сменяется катастрофическим

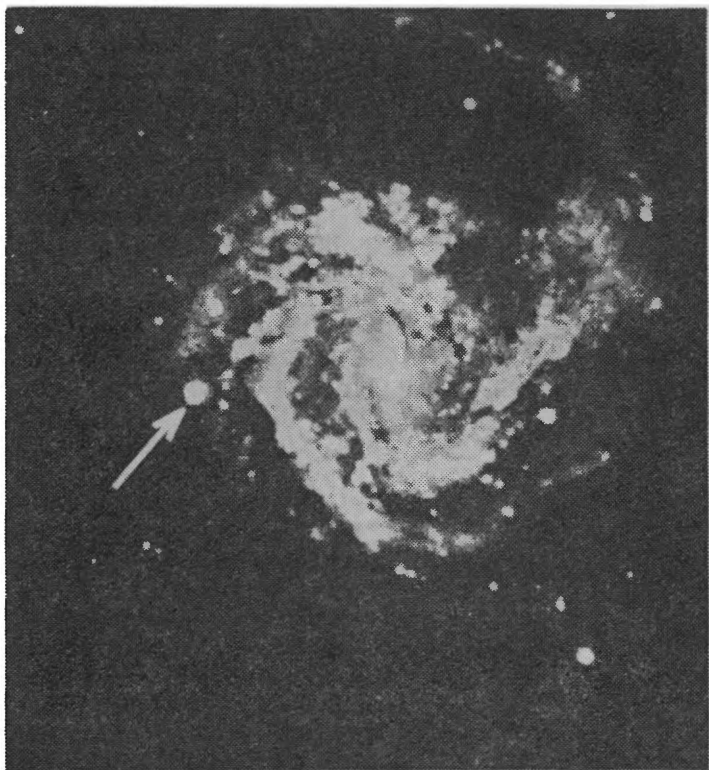


Рис. 9. Сверхновая в спиральной галактике. Фотография регистрирует взрыв одиночной звезды, которая в течение короткого промежутка времени вносит заметный вклад в полную светимость галактики. Размытость изображения вызвана передержкой.

гравитационным коллапсом и за доли секунды вещество в ядре звезды достигает ядерной плотности.

При коллапсе выделяется огромная гравитационная энергия, большую часть которой уносят нейтрино. Хотя обычные звезды прозрачны для нейтрино, очень компактное ядро звезды настолько плотно, что тормозит ускользающие нейтрино. Полагают, что давление, вызываемое потоком нейтрино, способно сбросить внешнюю оболочку звезды. Таким образом, ядро звезды взрывается внутрь, внешние слои — наружу. Взрыв влечет за собой колоссальный рост светимости, так что в течение нескольких дней блеск звезды может быть сравним с блеском целой галактики (рис. 9). Эта грандиозная вспышка называется сверхновой звездой (или просто сверхновой), такие вспышки происходят

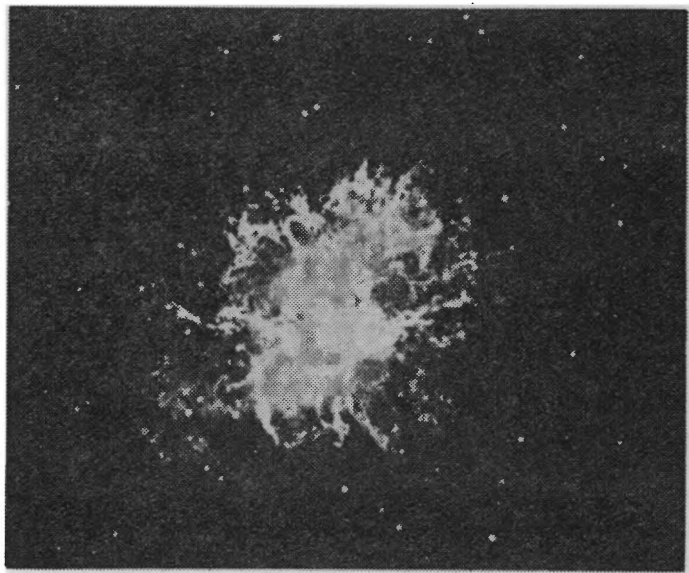


Рис. 10. Остаток сверхновой. В 1054 г. Астрономы Востока были свидетелями вспышки звезды в созвездии Тельца. Остатки этого взрыва в наши дни проявляются в виде огромного облака газа, называемого Крабовидной туманностью. Вблизи ее центра находится быстро вращающаяся нейтронная звезда (пульсар) — остаток ядра взорвавшейся звезды.

в среднем около трех раз в столетие на одну галактику (рис. 10).

Сверхновые играют важную роль в химической эволюции галактик. Вещество, из которого первоначально образовались галактики, состояло из водорода и гелия. Возникает вопрос: откуда взялись все другие, более тяжелые химические элементы? Теперь известно, что они синтезируются в недрах звезд. Но как они попадают наружу? Сильно проэволюционировавшая звезда богата тяжелыми элементами, которые синтезировались в ее недрах в сменяющих друг друга ядерных реакциях. Взрыв сверхновой разбрасывает это обогащенное тяжелыми элементами вещество по галактике. А когда образуются новые поколения звезд и планет, сырьем для них служит вещество умерших звезд. Углерод, который входит в состав живой материи, железо, образующее ядро нашей планеты, и уран, используемый в реакторах атомных электростанций, образовались задолго до нашей Солнечной системы. Без сверхновых планеты земного типа не могли бы существовать.

Если бы слабое взаимодействие было значительно слабее, то нейтрино были бы не в состоянии оказать достаточное влияние на внешнюю оболочку звезды и вызвать взрыв сверхновой. С другой стороны, если бы слабое взаимодействие было значительно сильнее, то нейтрино были бы захвачены внутри ядра звезды и тоже оказались бы бессильными. В любом случае химический состав Вселенной был бы совсем иным.

3.2. Ядра

В предыдущем разделе было показано, что химический состав Вселенной весьма чувствителен к особенностям слабого ядерного взаимодействия. К такому же выводу можно прийти и относительно сильного ядерного взаимодействия.

Благодаря сильному взаимодействию нуклоны образуют атомные ядра, несмотря на электрическое отталкивание протонов. Ядерные силы — короткодействующие и проявляются только между самыми близки-

ми соседними нуклонами, тогда как электрическая сила действует между всеми протонами в ядре. Значит, типичный протон удерживается в атомном ядре ядерной силой только ближайших к нему нуклонов, а отталкивается суммарным электрическим полем всех других протонов. В большом массивном ядре, состоящем из большого числа нейтронов и протонов, связывающая их сила не больше, чем в легком ядре, но электрическое отталкивание сильнее вследствие многочисленности протонов. Если атомное ядро станет достаточно большим, то электрическое отталкивание превысит притяжение частиц за счет ядерных сил и ядро распадется.

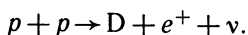
На самом деле неустойчивость возникает задолго до этого крайнего случая. Когда форма ядра отклоняется от сферической, площадь его поверхности возрастает. Частицы, оказавшиеся вблизи поверхности в области деформации, связаны с ядром слабее, чем ранее, когда они были расположены внутри ядра, так как у расположенной вблизи поверхности частицы примерно вдвое меньше соседей, чем у частицы внутри ядра. Следовательно, в ядре увеличивается поверхностная энергия. Однако деформация уменьшает электрическую энергию вследствие увеличения среднего расстояния между протонами. В легких ядрах увеличение поверхностной энергии превышает потерю электрической энергии и они стремятся устранить деформацию и вернуться в самое низкое энергетическое состояние. Но в массивных ядрах при этом преобладает потеря электрической энергии и деформация усиливается, приводя к распаду ядра. Процесс распада несколько ускоряется вследствие квантовых туннельных эффектов, которые могут приводить к образованию даже очень легких ядер, но с меньшей вероятностью. Более вероятен асимметричный распад.

У всех известных ядер тяжелее урана период полураспада значительно меньше, чем возраст Земли. Если сильное ядерное взаимодействие было бы несколько слабее, то в таком случае было бы меньше стабильных элементов. Количественные оценки затруднены, так как ядро — сложная система и природа ядерных сил еще до конца не понята, но если бы постоянная сильного

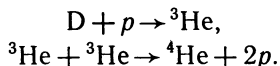
взаимодействия g_s была, скажем, в два раза меньше наблюдаемой, то такие ядра, как ядро железа или углерода, едва ли просуществовали бы долго.

Более серьезные следствия изменений g_s следуют из рассмотрения простейшего ядра — дейтрона, состоящего из протона и нейтрона. Радиус сильного взаимодействия, связывающего дейтрон, составляет около 10^{-15} м. Нахождение частицы внутри области Δx означает, согласно принципу неопределенности Гейзенберга, что частица обладает импульсом не ниже, чем примерно $\hbar/\Delta x$, что соответствует кинетической энергии $\hbar^2/2m(\Delta x)^2$. Кинетическая энергия дейтрона составляет около $6 \cdot 10^{-12}$ Дж, но потенциальная энергия лишь слегка превышает ее. Полная энергия связи равна $3,6 \cdot 10^{-13}$ Дж. Если бы ядерная сила была на 5% слабее, то дейтрон не мог бы существовать: кинетическая энергия превосходила бы энергию связи нейтрона и протона.

Дейтерий играет очень важную роль в качестве источника энергии Солнца и других звезд. Солнце светит благодаря последовательности ядерных реакций, которая начинается со слияния двух протонов с образованием дейтрона, позитрона и нейтрино:



Это процесс слабого взаимодействия с обратным бета-распадом, т. е. превращением протона в нейтрон. Следующая реакция, в которой участвует дейтерий, теперь протекает быстро, например



Эти реакции связаны с процессами сильного взаимодействия, обусловленными только перегруппировками протонов и нейтронов, а не их превращениями, поэтому они протекают значительно быстрее, чем первая реакция. Без дейтерия цепочка ядерных реакций, в ходе которых выделяется энергия, не могла бы протекать и вряд ли вообще могли бы существовать устойчивые долгоживущие звезды. К еще более серьезным последствиям привело бы увеличение постоян-

ной сильного взаимодействия всего лишь на несколько процентов. В таком случае было бы возможно объединение двух протонов. «Дипротон» менее устойчив, чем дейтрон, по двум причинам. Во-первых, между протонами действует электрическое отталкивание. Во-вторых, принцип Паули требует противоположной ориентации спинов протонов, а при этом их ядерное притяжение несколько уменьшается.

Снова описываемая ситуация оказывается критической. Энергия связи «дипротона» не превышает $1,5 \cdot 10^{-14}$ Дж. Для сравнения напомним, что средняя энергия связи на одну частицу составляет в типичном ядре $1,3 \cdot 10^{-12}$ Дж. Если бы постоянная ядерного взаимодействия g_s была больше всего на 2%, то «дипротон» мог бы существовать. Тогда было бы энергетически выгодно, чтобы «дипротон» распадался в процессе слабого взаимодействия с образованием дейтрона.

Фримен Дайсон указал на то, что если бы существовал «дипротон», то обычный водород стал бы катастрофически взрывоопасным. Солнце сжигает свои запасы водорода медленно и устойчиво, так как первое звено описанной выше цепочки реакций обусловлено слабым взаимодействием. Если бы дейтерий мог образовываться через «дипротон», то первая важная стадия реакций определялась бы сильным взаимодействием и была бы примерно в 10^{18} раз более эффективной. В таком случае последовали бы катастрофически быстрый расход водорода и столь же быстрое высвобождение энергии. Причем весьма сомнительно, чтобы водород пережил раннюю горячую стадию эволюции Вселенной. Она почти полностью состояла бы из гелия, что привело бы к следствиям, описанным в разд. 3.1.

Строение атомных ядер и ядерные реакции зависят, конечно, и от интенсивности электрических сил. Если бы заряд протона был больше, то стабильность тяжелых ядер уменьшилась бы в такой же степени, как при уменьшении постоянной сильного ядерного взаимодействия.

3.3. Звезды

Существенные параметры внутреннего строения звезд в общих чертах описаны в разд. 2.3, где было показано, что плотность энергии в типичной звезде сравнима с кинетической энергией частиц. Внутреннее строение звезды довольно сильно зависит от переноса тепла из ее недр посредством излучения. В более массивных звездах энергия излучения преобладает, и тепловая энергия покидает такие звезды в основном именно в виде потока лучистой энергии. Эти звезды называются голубыми гигантами.

В звездах меньших масс такой механизм не осуществим, так как излучение не может переносить энергию достаточно быстро для поддержания поверхности звезды достаточно горячей. Если только вещество на поверхности не остается частично ионизованным, то появляются неустойчивости, которые приводят к возникновению конвекции. Конвективные беспорядочные движения вносят дополнительный вклад в поток лучистой энергии и поддерживают температуру поверхности вблизи температуры ионизации. Следовательно, звезды, в которых конвекция обеспечивает основной перенос энергии, меньше и холоднее, чем голубые гиганты. Они называются красными карликами. Солнце и многие другие стабильные звезды лежат в довольно узкой области, границы которой определяются двумя крайними случаями: голубыми гигантами и красными карликами.

В разд. 2.3 была выведена формула (2.18) для массы типичной звезды. Интересно, что типичная масса M_* попадает в узкий интервал между массами голубых гигантов и красных карликов. Это обстоятельство в свою очередь, по-видимому, является результатом случайного соотношения между соответствующими постоянными гравитации и электромагнетизма, как будет показано ниже. В нашем изложении мы будем следовать Б. Картеру.

Температура поверхности звезды T_s связана с температурой в центре T_c через светимость. Скорость излучения лучистой энергии единицей площади поверх-

ности звезды равна $\sigma c T_s^4/4$, поэтому, используя формулу (2.25), получим

$$\sigma c T_s^4 R^2 \sim L \sim 16\pi^2 \varepsilon^2 \sigma T_c^4 R^4 m_e^2 c^5 / Ne^4.$$

Исключение R с помощью формулы (2.23) дает

$$T_s^4 \sim (4\pi \varepsilon T_c m_e)^2 m_p (Gh^3 c^{11})^{1/2} / e^4 k^2. \quad (3.8)$$

Температура в центре звезды автоматически поддерживается такой, что скорость генерации энергии в ядерных реакциях равна потоку энергии с поверхности звезды. Ядерные реакции начинаются тогда, когда средняя тепловая энергия типичного протона в ядре звезды достигает энергии, необходимой для прохождения сквозь кулоновский (электрический) барьер, создаваемый другими протонами.

Эта энергия определяется двумя конкурирующими факторами. Прежде всего это распределение протонов по энергиям в ядре звезды. Оно дается законом Максвелла — Больцмана, который содержит множитель $\exp(-E/kT)$. Таким образом, число протонов с энергией $E \geq kT$ (которые с наибольшей вероятностью просачиваются сквозь потенциальный барьер) экспоненциально спадает с E . В то же время, чем больше энергия, тем больше вероятность просочиться сквозь барьер. Имеются еще квантовые туннельные эффекты, которые также способствуют просачиванию. Результирующий фактор проницаемости равен $\exp(-b/E^{1/2})$, где $b \approx m_p^{1/2} e^2 / 4\pi \varepsilon \hbar$. Его произведение с коэффициентом Максвелла — Больцмана имеет максимум при $E = (bkT)^{2/3}$. Отсюда следует, что наиболее эффективные при ядерном горении протоны — это те, энергия которых близка к приведенной оценке. Реакции будут идти с максимальной скоростью, если оптимальная энергия не слишком далека от среднего значения в центре звезды, скажем при

$$kT_c \sim 10^{-2} b^2 \approx 10^{-2} m_p e^4 / (4\pi \varepsilon \hbar)^2.$$

Для поддержания достаточного притока энергии нет необходимости, чтобы температура поднялась значительно выше этого значения.

Для звезд, избежавших конвективной неустойчи-

ности, значение kT_s должно превосходить энергию ионизации

$$\sim 0,1e^4 m_e / (4\pi\epsilon\hbar)^2,$$

поэтому из (3.6) следует неравенство

$$(kT_s)^4 \sim 10^{-4} m_p^3 m_e^2 e^4 G^{1/2} c^{11/2} / (4\pi\epsilon\hbar^{5/4})^2 \gtrsim (0,1e^4 m_e)^4 / (4\pi\epsilon\hbar)^8,$$

которое сводится к выражению

$$\alpha_G \gtrsim \alpha^{12} (m_e / m_p)^4, \quad (3.9)$$

где α — электромагнитная постоянная тонкой структуры. Это интересное соотношение сопоставляет «силу» гравитации (слева) с «силой» электромагнетизма и отношением масс электрона и протона. Кроме того, α возведено в 12-ю степень, поэтому неравенство очень чувствительно к значению e .

Подставляя численные значения, получим $5,9 \cdot 10^{-39}$ для левой части неравенства и $2,0 \cdot 10^{-39}$ для правой части. Очевидно, природа выбрала значения фундаментальных постоянных такими, чтобы типичные звезды лежали очень близко к границе конвективной неустойчивости. Тот факт, что обе части неравенства (3.9) — такие чудовищные числа, но в то же время столь близкие друг к другу, сам по себе удивителен. Если бы гравитация была чуть слабее или электромагнетизм чуть сильнее (или электрон чуть массивнее), то все звезды были бы красными карликами. Напротив, едва заметное отклонение в другую сторону — и все они были бы голубыми гигантами. Картер утверждал, что конвекция в приповерхностном слое звезд играет важную роль в образовании планет, поэтому в мире, где гравитация была бы чуть слабее, могло не быть планет. Но в любом случае природа Вселенной была бы иной.

3.4. Галактики

Астрономы все еще не до конца поняли, как образовались галактики. Ясно, однако, что гравитационное сжатие должно было играть при этом важную роль.

Если бы газ, который появился на ранних стадиях эволюции Вселенной, был распределен более или менее равномерно, то по мере расширения Вселенной плотность ее непрерывно бы падала. Однако, как объяснялось в разд. 2.4, там, где случайно оказывались области газа повышенной плотности, сила гравитации способствовала дальнейшей аккреции вещества, усиливая таким образом возмущение плотности. Газ в окрестностях такого возмущения подвергался бы двум противодействующим процессам: космологическое расширение стремилось бы рассеять его, а локальное гравитационное притяжение — удержать.

В результате рост возмущения и его конечное отделение от среды протекали бы весьма медленно. Чтобы принять этот сценарий в качестве возможной модели образования галактик, вероятно, необходимо предположить, что начальные неоднородности плотности были достаточно резко выражены.

При переходе от довольно однородного облака газа к скоплению компактных звезд большое количество гравитационной энергии должно рассеяться. По мере сжатия газовых облаков их температура будет расти. Высокая температура препятствует фрагментации на звезды. Однако в конце концов газовое облако станет излучать и начнет охлаждаться. Если темп охлаждения будет медленным, то звездообразование будет подавляться. Вероятно, облако стало бы распадаться на все более мелкие фрагменты. С другой стороны, если темп охлаждения превосходит темп сжатия облака, то развиваются возмущения и облако быстро распадается на все более мелкие образования, в результате появляются отдельные звезды.

Согласно этому сценарию, имеется верхний предел размера галактики, определяемый временем сжатия t_s , которое требуется для существенного сжатия облака, и временем охлаждения t_c , за которое произойдет значительное охлаждение облака. Из газовых облаков размерами больше этого верхнего предела галактики не образуются.

Время сжатия приблизительно равно времени, затрачиваемому частицей на падение от границы к центру под действием силы гравитации. Для облака

массы M и радиуса R оно составляет (из элементарной теории Ньютона)

$$t_s \sim (GM/R^3)^{-1/2}. \quad (3.10)$$

Характерное время охлаждения определяется сложнее. Если температура газа низка, то он может эффективно охлаждаться такими процессами, как излучение вследствие рекомбинации ионов. Темп охлаждения горячего облака значительно ниже, так как охлаждение вызывается главным образом излучением свободных электронов (тормозным излучением). Простую по своей сути, но довольно громоздкую теорию этого процесса мы здесь приводить не будем. Темп охлаждения, по-видимому, зависит от поперечного сечения томсоновского рассеяния (2.19), массы электрона m_e , концентрации электронов n и температуры T . Объединяя эти величины в выражение с размерностью времени, получим

$$t_c \sim (n\alpha\sigma c)^{-1}(kT/m_e c^2)^{1/2} \approx \\ \approx (16\pi^2 e^2 m_e^2 c^3 / \alpha e^4 n)(kT/m_e c^2)^{1/2}. \quad (3.11)$$

Температура облака связана с его размером. В диффузном газе давление вырождения отсутствует, поэтому уравнение (2.13) дает

$$kT \sim GMm_p/R. \quad (3.12)$$

Хотя эта зависимость была использована в гл. 2 для случая равновесия, она основана на фундаментальной теореме механики (теореме о вириале) и применяется довольно широко. В частности, она должна быть хорошей аппроксимацией для газового облака, подвергшегося значительному сжатию. Согласно главной гипотезе, звезды не могут образовываться в облаках, если $t_c > t_s$. Это условие с учетом формул (3.10) — (3.12) приводит к соотношению

$$R > R_c \sim \alpha^4 \alpha_G^{-1} (m_p/m_e)^{1/2} a_0. \quad (3.13)$$

Только в случае, если бы ионизованное облако могло сжаться до радиуса меньше критического R_c , начался бы эффективный процесс звездообразования.

Радиус R_c не зависит от массы и не очень велик (детальные расчеты показывают, что R_c незначительно

больше нашей Галактики). Из этого следует, что большие массивные облака мало благоприятны для звездообразования.

Однако если облако остывает до стадии рекомбинации газа, охлаждение значительно более эффективно и звезды с легкостью образуются. Из формулы (3.12) следует, что облака малой массы являются холодными, так что существует критическая масса M_g , выше которой фрагментации облака на звезды не произойдет. Эта величина определяется требованием, чтобы kT превосходило энергию ионизации для $R > R_c$. Из формул (3.12), (3.13) и указанного ограничения вытекает соотношение для максимальной массы галактики

$$M_g \sim \alpha_G^{-2} \alpha^5 (m_p/m_e)^{1/2} m_p. \quad (3.14)$$

Какова M_g ? Согласно формуле (2.18), масса типичной звезды $M_* \sim \alpha_G^{-3/2} m_p$. Тогда из (3.14) получим оценку

$$M_g \sim \alpha^5 \alpha_G^{-1/2} (m_p/m_e)^{1/2} M_*, \quad (3.15)$$

или около $10^{11} - 10^{12} M_\odot$, что является правдоподобной оценкой. (Масса Галактики равна $10^{11} M_\odot$.)

В разд. 2.4 был введен важный космический параметр: число протонов N в наблюдаемой Вселенной. Отмечалось, что $N \sim 10^{80}$. Записывая $N \sim \alpha_G^{-2}$ и учитывая (3.14), получим, что число галактик в наблюдаемой Вселенной составляет

$$N_g \sim \alpha^{-5} \sim 10^{10}, \quad (3.16)$$

где принято, что масса типичной галактики составляет

$$\sim (m_e/m_p)^{1/2} M_g.$$

Примечательно, что число звезд в типичной галактике приблизительно равно числу галактик в наблюдаемой Вселенной, — совпадение, которое, как можно теперь видеть, следует из случайного совпадения чисел

$$\alpha_G \sim \alpha^{20}. \quad (3.17)$$

КОСМИЧЕСКИЕ СОВПАДЕНИЯ

В предыдущей главе на ряде примеров убедительно показано, что свойства окружающего нас мира сильно зависят от случайной согласованности постоянных в отдаленных областях физики. В частности, случайные числовые соотношения между такими несвязанными величинами, как постоянные тонкой структуры для гравитации и электромагнетизма или между постоянными ядерных взаимодействий и термодинамическими условиями в ранней Вселенной позволяют предположить, что многие наблюдаемые во Вселенной системы являются следствием чрезвычайно маловероятных совпадений.

Переходя к космологии, науке о строении и эволюции Вселенной, мы сталкиваемся еще и с согласованностью такого же удивительного характера в космических масштабах, поэтому создается впечатление, что здесь проявляется некий основной принцип. Многие примеры, рассматриваемые в этой главе, касаются начальных условий во Вселенной, а не численных соотношений. Однако одно численное совпадение берет свое начало в очень далеком прошлом.

4.1. Большие числа

Во многих рассмотренных выше примерах мы встретили большое число 10^{40} . Перечислим их здесь:

$$\alpha_G^{-1} \sim 10^{40}, \quad (4.1)$$

$$N \sim 10^{80} = (10^{40})^2, \quad (4.2)$$

$$N_* \sim 10^{60} = (10^{40})^{3/2}, \quad (4.3)$$

$$t_H/t_N \sim 10^{40}; \quad (4.4)$$

$$t_N/t_P \sim 10^{40}, \quad (4.5)$$

$$t_H/t_P \sim 10^{60} = (10^{40})^{3/2}. \quad (4.6)$$

Повторение этого числа в нескольких, по-видимому не связанных, аспектах давно подмечено физиками и космологами.

Другие, не столь впечатляющие примеры следующие:

$$\alpha_w \equiv g_w m_e^2 c / \hbar^3 \sim (10^{40})^{1/4}, \quad (4.7)$$

$$S \sim (10^{40})^{1/4}, \quad (4.8)$$

$$N_{*g} \sim N_g \sim (10^{40})^{1/4}, \quad (4.9)$$

где N_{*g} и N_g — число звезд в галактике и число галактик в наблюдаемой Вселенной соответственно.

Прежде чем приступить к обсуждению больших чисел, остановимся на точности, обозначаемой символом $\sim$. Согласно табл. 5, $\alpha_G^{-1} = 1,7 \cdot 10^{38}$. Таким образом, значение $\alpha_G^{-1} \sim 10^{40}$ можно рассматривать как неправильное округление по порядку величины. Однако здесь нужно принять во внимание два соображения. Во-первых, по сравнению с 10^{40} даже 10^2 пренебрежимо мало; во-вторых, выбор множителей, входящих в определение α_G , чисто условный. Например, можно было бы в равной степени использовать h , а не $\hbar$. Тот или иной выбор никоим образом не меняет общих соображений. Привередливому читателю, желающему вывести соотношения с большей точностью, советуем использовать табл. 3 и 4.

В физических теориях числа типа 4π или 3 появляются часто, и это не вызывает удивления. Однако число 10^{40} , которое полностью составлено из фундаментальных постоянных природы и поэтому, вероятно, имеет фундаментальный смысл, невероятно велико по сравнению с любым из этих более привычных значений. Например, колоссальное значение α_G^{-1} отражает чрезвычайную слабость гравитации. Физики давно пытаются выяснить, почему гравитация так слаба по сравнению с другими силами природы, например с электромагнетизмом, для которого $\alpha^{-1} \approx 137$. В последние годы предприняты попытки объединить четыре фундаментальных взаимодействия природы в единой математической теории. В ранних теориях предполагалось, что может существовать связь между грави-

тацией и электромагнетизмом, и давалось соотношение вида

$$\pi \ln \alpha_G^{-1} \sim \alpha^{-1}.$$

В 1976 г. Стивен Вайнберг и Абдус Салам предложили теорию, которая объединила слабое и электромагнитное взаимодействия. В этой теории кроме фотона, который служит переносчиком электромагнитной силы, вводятся другие частицы, названные W - и Z -промежуточными векторными бозонами, которые переносят слабое взаимодействие. Промежуточные векторные бозоны — очень массивные частицы, что объясняет короткодействие слабого взаимодействия (разд. 1.3). В теории Вайнберга—Салама связь между двумя взаимодействиями описывается следующим численным соотношением:

$$\alpha_w \sim (m_e/m_w)^2,$$

где m_w — масса промежуточного векторного W -бозона. Отметим, что благодаря счастливому совпадению (4.7), которое можно представить в виде $\alpha_w^4 \sim \alpha_G$, Вселенная состоит преимущественно из водорода (разд. 3.1).

Успешное описание множества разнообразных субатомных процессов и сведение общего числа известных фундаментальных взаимодействий с четырех к трем в рамках теории Вайнберга—Салама стимулировало усилия, направленные на дальнейшее объединение электрослабого взаимодействия с сильным ядерным взаимодействием. Было предложено несколько схем. В этих так называемых теориях великого объединения помимо фотона и W -бозона вводится еще одна частица, на этот раз очень массивная ($\gtrsim 10^{15} m_p$). Любопытное следствие объединения сильного взаимодействия, связывающего кварки, с электрослабым взаимодействием, связывающим лептоны (а также кварки), состоит в нарушении четкого разделения кварков и лептонов, что при некоторых условиях допускает их взаимные превращения. Например, есть, хотя и ничтожная, вероятность того, что протон (состоящий из кварков) будет распадаться в конечном счете на позитрон (который является лептоном). Время жизни протона, предсказываемое этой теорией, приблизительно

но составляет $t_N(m_X/m_p)^4$, где m_X — масса новой сверхмассивной промежуточной частицы, существование которой следует из теории великого объединения. Для согласия с экспериментом необходимо, чтобы $m_X \geq 10^{15} m_p$, тогда время жизни протона $t_p \geq 10^{30}$ лет.

Большинство теорий великого объединения предсказывают значение m_X в диапазоне $(10^{15} - 10^{16}) m_p$, и, чтобы проверить, действительно ли средний период полураспада протона $\sim 10^{31}$ лет, выполняются все более тонкие эксперименты. Отметим, что если это значение подтвердится, то $t_p/t_p \sim 10^{80}$, т. е. равно квадрату «магического» числа 10^{40} . А причина этого совпадения состоит в том, что значение m_X близко к планковской массе $m_P \equiv (\hbar c/G)^{1/2}$, для которой $G m_P^2/\hbar c = 1$. Считается, что планковская масса, полностью определяемая фундаментальными постоянными гравитации и квантовой теории, должна играть важную роль в любой будущей теории квантовой гравитации. Близость массы m_X к m_P вселяет надежду, что этот подход может привести к синтезу теории великого объединения с гравитацией. Это означало бы, что существует единая фундаментальная сила природы, объединяющая все взаимодействия материи. Очевидное совпадение $m_X \sim m_P$ также найдет объяснение.

Независимо от того, удастся ли, исходя из этих идей, установить фундаментальную причину слабости гравитационного взаимодействия, несомненно одно: будь гравитация значительно сильнее, структура Вселенной коренным образом изменилась бы. Например, как указывалось в разд. 3.3, все звезды были бы тогда голубыми гигантами. Хуже то, что Вселенная в целом была бы неустойчивой по отношению к гравитационному коллапсу и, вероятно, сколлапсировала бы задолго до современной эпохи. Продолжительность ньютоновского свободного падения (продолжительность гравитационного коллапса шарообразного сгустка вещества) составляет примерно $(GM/R^2)^{-1/2}$. Если принять в качестве M массу наблюдаемой Вселенной (около 10^{53} кг), а в качестве R — ее радиус (10^{26} м), то продолжительность коллапса составит около 10^{11} лет (ср. с фактическим возрастом $2 \cdot 10^{11}$ лет).

Очевидно, если бы гравитационная постоянная G была чуть больше, то Вселенной уже не существовало бы.

Таблица 5

Полезные сведения (система единиц СИ)

Большие числа	
$\alpha_G^{-1} \equiv \hbar c / G m_p^2 = 1,7 \cdot 10^{38}$	Величина, обратная гравитационной «постоянной тонкой структуры»
$\hbar c / G m_e^2 = 5,7 \cdot 10^{44}$	
$\hbar c / G m_p m_e = 3,1 \cdot 10^{41}$	
$e^2 / 4\pi\epsilon G m_p m_e = 2,3 \cdot 10^{39}$	Отношение сил в атоме водорода
Малые расстояния, м	
$\hbar / m_p c = 1,3 \cdot 10^{-15}$	Комптоновская длина волны протона
$\hbar / m_\pi c = 8,9 \cdot 10^{-15}$	Комптоновская длина волны пиона
$e^2 / 4\pi\epsilon m_e c^2 = 2,8 \cdot 10^{-15}$	Классический радиус электрона
Малые времена $\sim t_N$, с	
$\hbar / m_p c^2 = 4,4 \cdot 10^{-24}$	
$\hbar / m_\pi c^2 = 3,0 \cdot 10^{-23}$	
$e^2 / 4\pi\epsilon m_e c^3 = 9,3 \cdot 10^{-24}$	
Масса пиона	$2,49 \cdot 10^{-26}$
Разность масс нейтрона и протона	$2,30 \cdot 10^{-30}$
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$
Масса Юпитера	$1,90 \cdot 10^{27}$
Масса Солнца	$1,99 \cdot 10^{30}$
Масса Галактики	$3,6 \cdot 10^{41}$
Масса наблюдаемой Вселенной	10^{53}
Светимость Солнца	$3,90 \cdot 10^{26}$
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$
Радиус Солнца	$6,96 \cdot 10^8$
Энергия связи атома водорода	$2,18 \cdot 10^{-18}$

Поскольку число 10^{40} невообразимо велико, тем более поразительно встречать его в весьма разнообразных ситуациях. Артур Эддингтон и Поль Дирак обратили внимание на то, что возраст Вселенной в некоторых естественных атомных или ядерных едини-

цах также очень близок к 10^{40} . Этот факт выражается отношением (4.4). По-видимому, нет явной связи между возрастом Вселенной и числом частиц в доступной наблюдениям области, что следует из отношений (4.2) и (4.4). Это явное совпадение двух таких невероятно огромных чисел произвело столь сильное впечатление на некоторых физиков, что они приписали ему глубокий физический смысл. В 1938 г. Дирак писал: «Можно предположить, что такое совпадение является следствием некоторой глубокой связи в природе между космологией и атомной теорией».

В этом вопросе есть, конечно, тонкости. Так, возраст Вселенной не является фундаментальной постоянной, а меняется со временем. Величина t_H — это эпоха, в которую нам выпало жить. Поэтому Дирак предположил, что гравитационная постоянная G также не должна быть постоянной величиной, а должна меняться пропорционально $1/t$, так чтобы соотношение

$$t_H/t_N \sim \alpha_G^{-1} \quad (4.10)$$

было справедливым во все эпохи. Теории этого типа, требующие зависимости G от времени, изучались в течение многих лет. И хотя создан ряд подробных теорий, описывающих это явление, нет убедительных данных наблюдений, подтверждающих изменения G (разд. 2.1).

Альтернативное объяснение совпадения больших чисел (4.10) было предложено Дикке. В основе его аргументации — попытка ответить на следующий вопрос: является ли чистой случайностью справедливость отношения (4.10) в современную эпоху или есть некоторая особая причина того, что мы живем именно в данную эпоху, а не в какую-либо другую? Этот вопрос явно подразумевает наличие наблюдателей (людей). Он составляет часть системы аргументации, с помощью которой пытаются связать структуру физического мира с фактом существования человека. Аргументы Дикке и другие подобные соображения будут подробно рассмотрены в следующей главе.

Магическое число 10^{40} неожиданно появляется вновь в совершенно другом виде. Оно связано с полным числом заряженных частиц N в наблюдаемой

Вселенной (разд. 2.4). Вещество в основном состоит из протонов и электронов, поэтому можно найти число N делением массы наблюдаемой Вселенной на массу протона m_p и удвоением частного от деления. Это дает приблизительно 10^{80} , что совпадает с отношением (4.2).

Если это дополнительное совпадение записать с помощью (4.4) в форме

$$N \sim (t_H/t_N)^2 \sim \alpha_G^{-1} (t_H/t_N) \sim 10^{40} \cdot 10^{40}, \quad (4.11)$$

преобразовать его к виду

$$N \alpha_G t_N / t_H \sim 1$$

и подставить вместо t_N , времени прохождения светом комптоновской длины волны протона, его выражение $t_N = h/(m_p c^2)$, то (с учетом $\alpha_G = G m_p^2 / \hbar c$) можно получить важное соотношение:

$$G \rho t_H^2 / c^2 \sim 1. \quad (4.12)$$

Здесь $\rho = N m_p c^2 / (c t_H)^3$ — средняя плотность энергии вещества во Вселенной.

Здесь необходимо уточнить, что подразумевается под наблюдаемой Вселенной. При выводе (4.12) мы приняли, что объем наблюдаемой Вселенной равен $(c t_H)^3$, т. е. хаббловскому объему. Чтобы обосновать это, необходимо обратиться к космологической теории.

4.2. Космическая динамика

В разд. 1.5 указывалось, как описать динамику однородной изотропной Вселенной одним параметром $a(t)$. Масштабный фактор подчиняется уравнению движения, определяемому законами гравитации. Как ни странно, оказывается, что теория Ньютона и общая теория относительности приводят к одному и тому же дифференциальному уравнению:

$$\dot{a}^2 / a^2 c^2 + k / a^2 = 8\pi G \rho / 3c^4. \quad (4.13)$$

В современную эпоху масштабный фактор a принимается равным единице. Параметр k , который не следует путать с постоянной Больцмана, имеет размер-

ность, обратную квадрату длины. В общей теории относительности он допускает простую геометрическую интерпретацию. В любой фиксированный момент времени пространство не обязательно должно быть плоским, для которого справедлива геометрия Евклида. Общая теория относительности Эйнштейна предсказывает, что в общем случае пространство-время искривлено. Кривизна однородной Вселенной должна быть всюду постоянной.

Кривизна может быть положительной или отрицательной. Если $k > 0$, то пространство замкнуто и его объем конечен, подобно тому как поверхность шара имеет конечную площадь и однородна (рис. 11). Поверхность шара не имеет ни границы, ни края, ни центра. Вселенная с положительной кривизной была

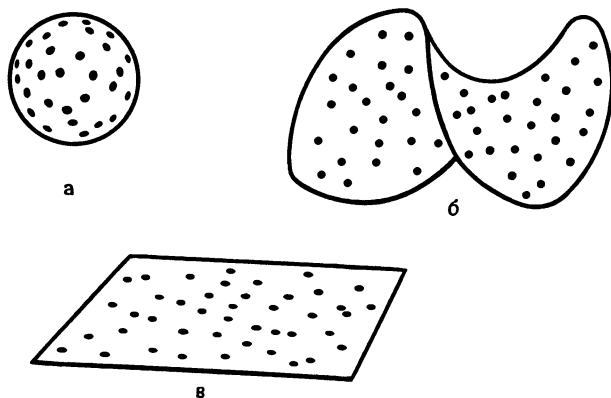


Рис. 11. Кривизна Вселенной. Согласно общей теории относительности Эйнштейна, гравитация вызывает искривление пространства. В однородной Вселенной возможны только три типа кривизны. Рисунки иллюстрируют эти три случая, используя аналогию с двумерной поверхностью, чтобы представить трехмерное пространство. *а* — кривизна пространства положительна, а объем конечен (что соответствует на рисунке поверхности с конечной площадью). Астронавт мог бы совершить кругосветное путешествие в такой Вселенной. *б* — кривизна пространства отрицательна, объем бесконечен. На рисунке показана лишь часть пространства. *в* — пространство плоское и бесконечное, применима евклидова геометрия. Во всех трех случаях следует учитывать, что поверхности расширяются.

бы трехмерной модификацией поверхности шара, и в ней, как и на сфере, можно было бы совершить «кругосветное путешествие». При определенных условиях снаряд, выпущенный из любой точки мира, через достаточно продолжительное время вернется в эту точку с противоположного направления.

Правда, реальная Вселенная расширяется, поэтому она более походит на надуваемый воздушный шарик. Эта наглядная модель позволяет вообразить расширение Вселенной из сингулярного состояния. Когда шарик полностью сдут, площадь его поверхности уменьшается почти до нуля. Аналогично начало расширения Вселенной соответствует внезапному появлению пространства, а также и вещества. Это вовсе не взрыв сгустка вещества в существовавшую до него пустоту.

Случай отрицательной кривизны легче представить себе, так как при $k < 0$ пространство-время бесконечно; соответствующая геометрия иногда иллюстрируется седлообразной поверхностью в случае двумерной аналогии (рис. 11, б).

В частном случае, когда $k = 0$, т. е. кривизна отсутствует, Вселенная плоская и бесконечная и к ней применима обычная геометрия Евклида*. Хотя топология Вселенной с $k > 0$ отличается от случая с $k \leq 0$, локальная геометрия меняется плавно до тех пор, пока рассматривается последовательность моделей с k , изменяющимся в этих пределах. Для k , достигающего нуля от отрицательных значений, пространство постепенно становится плоским, пока при $k = 0$ оно не станет евклидовым. Для малых положительных k кривизна мала, а (конечный) объем пространства очень велик. Когда k возрастает, «радиус» Вселенной и, следовательно, ее объем уменьшаются. Стандартная геометрия дает выражение для объема $2\pi^2 k^{-3/2}$.

Когда $k > 0$ и пространство конечно, понятие полного числа частиц во Вселенной вполне определено, но что можно сказать о случаях бесконечной Вселенной $k \lesssim 0$? На этой стадии необходимо принять во внимание, что наблюдаемая область пространства-вре-

* Но в сопутствующем пространстве. — *Прим. ред.*

мени определяется распространением световых сигналов в искривленной расширяющейся геометрии.

Возвращаясь к аналогии с надуваемым воздушным шариком, представим световой сигнал, излученный из точки *A* (рис. 12). Свет распространяется во Вселенной, а области, отдаленные от *A*, удаляются вследствие расширения. Более далекие области удаляются быстрее, поэтому световому сигналу приходится гнаться вдогонку за удаляющимися от него галактиками. В любой момент времени будут существовать галактики, которых еще не достиг световой сигнал из точки *A*, т. е. свет, испущенный в самый ранний момент — в момент начала расширения Вселенной, — еще не догнал их.

На первый взгляд этот результат кажется парадоксальным, потому что в начальной фазе, когда „лист бумаги сильно смят“, пространство было сжато и все галактики находились близко друг к другу. Создается впечатление, что если пространство было втиснуто в очень малый объем, свет должен был пересекать его очень быстро. Однако необходимо помнить, что на этой ранней стадии эволюции скорость расширения также была гораздо больше, поэтому свету приходилось догонять области Вселенной, которые расширялись много быстрее, чем теперь. Итак, приходится сопоставлять конкурирующие факторы. Чем ближе

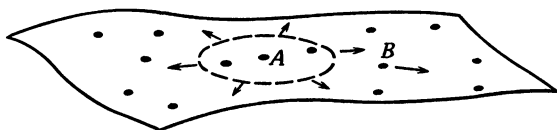


Рис. 12. Горизонт событий. Свет, испущенный из галактики *A*, гонится за удаляющимися галактиками (например, *B*). Конкурируют два эффекта: расширяется наружу волновой фронт света (штриховая линия) и расширяется Вселенная. Свет, испущенный из *A* в самом начале расширения Вселенной, все еще не догнал отдаленных галактик. Поэтому эти галактики в силу симметрии не могут наблюдаться из *A*. Граница наблюдаемой из *A* Вселенной называется горизонтом событий *A*. Поскольку расширение Вселенной замедляется, волновой фронт в конце концов догонит все галактики, поэтому горизонт со временем включает все большее число галактик.

исследуемая эпоха к началу расширения, тем ближе к нулю расстояния, которые проходит свет, но темп расширения возрастает до бесконечности. Какой же эффект окажется преобладающим?

Простой анализ показывает, что, поскольку темп расширения начинает замедляться сразу же при $t = 0$, свет до сих пор не успел еще пересечь всю Вселенную. Поскольку оба выражения, (1.16) и (1.17), предсказывают уменьшение скорости расширения со временем, это почти несомненно имеет место и в реальной Вселенной.

Если свет из A еще не достиг некоторых галактик, то они не получили никакой информации о точке A . И поскольку ни один физический процесс не может распространяться со скоростью, превосходящей скорость света, невозможна причинная связь между A и этими галактиками. Эта ситуация симметрична: такие галактики в свою очередь не могут оказать влияние на события в точке A . Из этого следует, что в любой момент вокруг A существует сфера предельного радиуса, Вселенная за пределами которой не может физически влиять на A . Наблюдатели в A не смогут видеть события за пределами этой сферы, если только они не дождутся, пока в конце концов их достигнет первый луч света. Это разделение на то, что можно, и то, чего нельзя увидеть в данное время, напоминает горизонт Земли и поэтому называется горизонтом Вселенной, а чаще — горизонтом событий, горизонтом наблюдателя или просто горизонтом. Он выделяет вокруг каждой точки частицы, которые можно наблюдать из этой точки и которые недоступны наблюдениям. Горизонт событий расширяется со скоростью света, и в замедляющейся Вселенной в конечном счете можно догнать любую галактику, как бы далеко она ни была. Конечно, если бы темп расширения опять начал ускоряться, то это заключение было бы неверно.

Горизонт событий дает естественное определение того, что подразумевается под понятием «наблюдаемая Вселенная». В любую эпоху t_H наблюдателю доступна только область Вселенной в пределах горизонта, который находится на расстоянии, пройденном светом

с начала расширения Вселенной, или примерно ct_H (называемом радиусом Хаббла). Именно это определение использовалось в конце предыдущего раздела при вычислении объема Вселенной. Ясно, что радиус Хаббла пропорционален времени, как и отношение t_H/t_N . Рассмотрим, с другой стороны, число частиц N , заключенных в пределах горизонта событий в эпоху t_H . Горизонт растет пропорционально времени, так что на первый взгляд N пропорционально кубу времени. Однако концентрация частиц падает по мере расширения Вселенной. Если принять зависимость (1.16), то концентрация уменьшается обратно пропорционально квадрату времени. Следовательно, N пропорционально времени в первой степени, а не кубу его. В таком случае очевидно, что совпадение $N \sim (t_H/t_N)^2$ не будет справедливым во все эпохи, так как левая его часть растет линейно со временем, а правая — по квадратичному закону.

Уместно спросить: будет ли иметь место совпадение (4.11) при $k > 0$, если принять в качестве N полное число частиц во всем (конечном) пространстве, а не только в пространстве, лежащем в пределах современного горизонта? Если k достаточно велико, то в современную эпоху горизонт включает значительную часть пространства и поэтому оба определения Вселенной практически эквивалентны. Однако ниже мы увидим, что $k \approx 0$. Поэтому примем в качестве N число заряженных частиц внутри горизонта событий.

Вернемся к уравнению (4.13), решения которого легко найти в частном случае $k = 0$. Для обычного вещества $\rho \propto a^{-3}$, потому что $\rho a^3/c^2$ — масса вещества в (расширяющемся) объеме a^3 , остающаяся постоянной в однородной Вселенной. В таком случае интегрирование (4.13) дает $a \propto t^{2/3}$, что совпадает с формулой (1.16). В радиационно-доминированной Вселенной $\rho \propto a^{-4}$. Тогда интегрирование (4.13) при $k \approx 0$ дает $a \propto t^{1/2}$.

Хотя эти решения представляют собой частные случаи, они дают хорошее приближение для описания ситуации в течение ранней эпохи. Это объясняется тем, что, когда a мало, слагаемое k/a^2 незначительно

по сравнению с $\varrho \propto a^{-4}$ и можно считать, что зависимость $a \propto t^{1/2}$ хорошо описывает раннюю фазу.

Для $k \neq 0$ существует характерная эпоха $(c^4 k^2)^{-1/4}$, в которую становится существенным слагаемое, содержащее k , и им нельзя больше пренебрегать. При $k < 0$ это слагаемое в конце концов начинает преобладать, и тогда можно полностью пренебречь веществом. Подстановка $\varrho = 0$ в (4.13) приводит к $a \propto t$. Вселенная расширяется с постоянной скоростью без замедления.

При $k > 0$ происходят еще более удивительные явления. Замедление усиливается, что обусловлено слагаемым, содержащим k , и в итоге расширение прекращается в эпоху $\sim 1/ck^{1/2}$. После этого Вселенная начнет сжиматься и в конце концов коллапсирует в сингулярное состояние (процесс, обратный тому, который происходил в начале расширения Вселенной).

Что определяет значение k ? Отношение $\dot{a}/a$ обратно пропорционально времени Хаббла t_H . При $k = 0$ уравнение (4.13) сводится к виду

$$8\pi G \varrho t_H^2 / 3c^2 = 1, \quad (4.14)$$

тождественному зависимости (4.12). Следовательно, уравнение (4.14) дает характерную критическую плотность энергии вещества

$$\varrho_{cr} = 3c^2 / 8\pi G t_H^2, \quad (4.15)$$

при которой геометрия Вселенной является евклидовой и она расширяется по закону $t^{2/3}$, если вещество, а не излучение определяет плотность Вселенной.

Из формулы (4.13) следует, что если $\varrho > \varrho_{cr}$, то $k > 0$, Вселенная замкнута и в конечном счете будет сжиматься. Дополнительная гравитация, связанная с избытком плотности вещества по сравнению с критической, будет притягивать галактики обратно друг к другу. При $\varrho < \varrho_{cr}$ гравитация вещества будет слабее и Вселенная будет беспрепятственно расширяться ($a \propto t$).

Здесь можно провести аналогию с быстро летящим снарядом. Значит, геометрия Вселенной и ее дальнейшая судьба зависят от плотности вещества, или, что

равносильно, от полного числа частиц N в наблюдаемой Вселенной. Теперь мы в состоянии понять истинный смысл совпадения (4.12). Оно утверждает, что природа „выбрала“ такое значение N , чтобы Вселенная была плоской, т. е. $k = 0$ и $q = q_{cr}$.

Анализ уравнения (4.13) показывает, что, поскольку нет свидетельств преобладания члена, включающего кривизну k/a^2 , в современную эпоху, он, должно быть, до сих пор мал по сравнению с другими членами уравнения. В частности,

$$|k|/a^2 < (ct_H)^{-2}, \quad (4.16)$$

где $|k|$ — модуль величины k , которая может быть как положительной, так и отрицательной. Полагая $a = 1$ в современную эпоху, из неравенства (4.16) получаем, что радиус кривизны пространства-времени $r_s \equiv |k|^{-1/2}$ по крайней мере больше современного хаббловского радиуса ct_H .

Интересно рассмотреть, что случилось бы, если бы N было равно, скажем, 10^{86} , а не 10^{80} . В этом случае космологическое расширение длилось бы только 10^8 лет и Вселенная давно бы коллапсировала. Аналогично, если N было бы равно 10^{77} , то вносимое с k вносило бы вклад в динамику Вселенной уже в очень отдаленные эпохи. Более быстрый темп расширения ($a \propto t$, а не $t^{2/3}$) значительно затормозил бы образование галактик. В любом случае, если бы соотношение (4.12) не имело места, структура Вселенной была бы совсем другой.

Каковы следствия совпадения (4.12)? Современные наблюдения показывают, что $0,01 < q/q_{cr} < 10$, так что $(q - q_{cr})/q_{cr}$ лежит в интервале между -1 и $+9$. Возможно, в этом нет ничего примечательного. Однако нужно помнить, что q зависит от времени. Из формул (4.13) и (4.15) получаем

$$(q - q_{cr})/q_{cr} = kc^2 t^2 / a. \quad (4.17)$$

Перейдем к ранним стадиям эволюции Вселенной. Когда в динамике преобладает энергия излучения, $a \propto t^{1/2}$ и, следовательно, отношение (4.17) пропорционально t . Таким образом, даже если современное отношение порядка единицы, то через секунду после

начала расширения Вселенной оно было всего лишь 10^{-18} . В планковскую эпоху, самую раннюю эпоху, для которой мы можем быть уверены в правильности теории, отношение было в лучшем случае почти бесконечно малым: 10^{-60} . Если принять планковскую эпоху в качестве начального момента, определяющего последующую динамику Вселенной, то необходимо предположить, что «природа выбрала» q , отличающееся от q_{cr} не более чем на $1/10^{60}$ часть.

Мы не знаем, в чем физическая причина того, что q не является абсолютно произвольным числом. Очевидно, природа могла «выбрать» любое значение. Быть может, близость q к q_{cr} со столь ошеломляющей точностью — одна из величайших загадок космологии? При очень малом отклонении от этого соотношения структура Вселенной была бы совершенно иной. Так, если бы отношение (4.17) равнялось 10^{-57} , а не $<10^{-60}$, то Вселенная не дожидаясь до современной эпохи, а коллапсировала бы несколько миллионов лет спустя после начала расширения.

Почему q так близко к q_{cr} ? Или, что эквивалентно, почему k так близко к нулю? При отсутствии какой бы то ни было физической причины, объясняющей значение k , нужно исследовать основы теории, чтобы выяснить, определяют ли они характерную кривизну. В таком случае с достаточным основанием можно ожидать, что k отличается от этого характерного значения не более чем на несколько порядков величины.

Параметры, входящие в теорию, — это G , $\hbar$ и c . Характерная кривизна, которую можно образовать из этих величин, есть $c^3/G\hbar \sim 10^{70} \text{ м}^{-2}$. Она приблизительно в 10^{60} раз больше, чем значение k/a^2 в планковскую эпоху. Если бы «естественное» значение k/a^2 было таким, то Вселенная существовала бы только около $t_P \sim 10^{-43} \text{ с}$, а затем коллапсировала бы. Для продолжительности жизни Вселенной, примерно на 60 порядков превышающей естественную фундаментальную единицу времени t_P , q и q_{cr} должны быть сбалансированы с поразительной точностью.

Итак, с физической точки зрения произошло вот что. Плотность энергии вещества во Вселенной q определяет полную силу гравитации Вселенной. При вы-

сокой плотности замедление расширения идет более быстрыми темпами. Если же плотность больше критической ρ_{cr} , то со временем расширение прекратится и сменится сжатием, ведущим к катастрофическому коллапсу. Если ρ значительно превышает ρ_{cr} , то это обращение протекает быстрее. Если же плотность энергии очень низка, то сила гравитации Вселенной мала и расширение протекает более или менее беспрепятственно. Чем ниже плотность энергии, тем быстрее в ходе расширения происходит разрежение вещества. Если ρ очень близко к ρ_{cr} , то Вселенная либо когда-нибудь сколлапсирует, либо будет вечно расширяться.

Эту сбалансированность можно рассматривать и с противоположной точки зрения. Чтобы Вселенная приобрела современную структуру при данной плотности вещества, ее расширение должно происходить с вполне определенной скоростью. Если эта скорость мала, то Вселенная после короткой стадии расширения начнет сжиматься и сколлапсирует. С другой стороны, в случае слишком быстрого начального расширения сгустки вещества разлетались бы друг от друга с большой скоростью и вскоре стали бы изолированными и не способными группироваться в галактики. В действительности начальное расширение происходило как раз с такой скоростью, что в результате возникла ситуация, лежащая между описанными альтернативами.

Можно провести аналогию с движением снаряда, запущенного с поверхности Земли вертикально вверх. Если его скорость слишком мала для преодоления тяготения Земли, то он вскоре упадет обратно на Землю. Если же скорость достаточна, то он унесется в космическое пространство и никогда не вернется обратно. Предел, разделяющий эти случаи, достигается, когда снаряд запущен точно с так называемой параболической скоростью — минимальной скоростью, достаточной для того, чтобы он лишь преодолел земное тяготение. Скорость начального расширения Вселенной оказалась столь точно подстроенной к силе гравитации, что Вселенная почти вырвалась из оков собственной гравитации.

Заканчивая данный раздел, обратим внимание на альтернативный подход к этому интересному обстоятельству. В радиационно-доминированную эпоху температура Вселенной менялась как $T \propto t^{-1/2}$. Энергия kT дает естественную длину $\lambda = hc/kT$ которая равна длине волны типичного фотона. Из неравенства (4.16) получаем другую единицу длины — радиус кривизны пространства-времени, который, как отмечалось, по крайней мере превосходит ct_H . Далее из соотношения (4.16) следует, что для радиационно-доминированной Вселенной $|k| \propto (a/t_H)^2 \propto t^{-1}$, поэтому радиус кривизны пространства-времени $r_s \equiv |k|^{-1/2} \propto t^{1/2}$ меняется со временем точно по тому же закону, что и λ . Следовательно, в радиационно-доминированной Вселенной отношение λ/r_s не зависит от времени. Современное значение λ соответствует типичной длине волны микроволнового фонового излучения с температурой 3 К и составляет около 10^{-3} м. Хаббловский радиус составляет $\sim 10^{26}$ м, поэтому их отношение составляет около 10^{-29} . Однако это завышенная оценка, так как спустя 10^5 лет после начала расширения во Вселенной преобладало вещество, а не излучение. В результате температура уменьшилась примерно на порядок, поэтому более точное значение рассматриваемого отношения есть

$$\lambda/r_s \lesssim 10^{-29}. \quad (4.18)$$

Малость правой стороны — это следствие того, что q близко к q_{cr} . Поскольку это отношение не зависит от времени (по крайней мере пока Вселенная была радиационно-доминированной), оно имеет довольно фундаментальный характер и его, вероятно, нужно включить в список вместе с другими космологическими параметрами как характерное космическое число. Близость его к $(10^{40})^{-3/4}$ можно было бы рассматривать как еще одно совпадение больших чисел. Однако, как мы сейчас покажем, отношение (4.18) не является независимым от других космологических параметров. Положим, что k настолько мало, что в уравнении (4.13) можно пренебречь членом, содержащим k . В предположении, что $q = \sigma T^4$ (уравнение Стефана — Больцмана), соответствующем радиацион-

но-доминированной стадии Вселенной, (4.13) легко проинтегрировать:

$$kT = (45\hbar^3 c^5 / 32\pi^3 G f)^{1/4} t^{-1/2}. \quad (4.19)$$

Этот результат использовался при выводе уравнения (1.23). При выводе формулы (4.19) мы подставили выражение для постоянной плотности излучения σ , принимая во внимание, что может существовать несколько видов излучения. Это отражается весовым множителем f .

В соотношении (4.19) коэффициент при $t^{-1/2}$ полностью выражается через фундаментальные постоянные $\hbar$, c и G . Он совсем не зависит от начальных условий, поскольку мы пренебрегли k . Полагая, что f не слишком отличается от единицы, и используя (4.6), получим, принимая $a=1$ и $t=t_H$, для современной эпохи

$$\lambda/r_s \lesssim (t_P/t_H)^{1/2} \sim 10^{-30}. \quad (4.20)$$

Таким образом, мы получили (4.18), как частный случай совпадения больших чисел (4.6).

Итак, можно сформулировать фундаментальную загадку тонкой подстройки Вселенной следующим образом: почему характерный размер Вселенной столь неимоверно велик по сравнению с типичной длиной волны ее реликтового излучения?

Параметр k примерно на 60 порядков величины меньше «естественного значения», определяемого длиной Планка. Поэтому разумно, по-видимому, предположить, что действует принцип скрытой симметрии, требующий точного равенства величины k нулю. Некоторые авторы пытаются связать условие $k=0$ с принципом Маха (с. 153). Однако мы знаем, что k не может быть точно равно нулю, иначе не было бы галактик: кривизна пространства на относительно малом характерном размере скоплений галактик отлична от нуля. Только в космологических масштабах кривизна сопутствующего пространства действительно в среднем близка к нулю. Трудно представить себе принцип, согласно которому в среднем k так мало, а локально оно еще достаточно велико, чтобы допустить образование галактик.

4.3. Согласование без обмена информацией

Мы уже неоднократно отмечали, что в очень больших масштабах Вселенная удивительно однородна. Естественно, в масштабе галактик наблюдается значительное сгущивание вещества и некоторый разброс скоростей. Но в масштабах, скажем, 10^{24} м и выше распределение материи в высокой степени однородно и изотропно.

Один из лучших способов проверки изотропии — измерение температуры микроволнового фонового излучения. Современные наблюдения показывают, что его температура во всех направлениях одинакова с точностью $1:10^4$. Если только мы не занимаем выделенное положение во Вселенной, то нужно считать, что эта изотропия должна наблюдаться из любой точки, откуда в свою очередь следует однородность. Это также подразумевает, что и космологическое расширение однородно и изотропно.

Почему же Вселенная столь однородна, что для описания ее глобальной динамики достаточно рассмотреть только одну степень свободы $a(t)$? Возможный ответ — просто считать, что так было всегда. Но этим лишь утверждается, что характер расширения Вселенной ныне таков потому, что он был таков и раньше. Вряд ли такое объяснение может удовлетворить.

Загадка становится еще более трудной, когда принимается во внимание горизонт событий. В предыдущем разделе упоминалось, что горизонт растет со скоростью света. Экстраполируя назад во времени к очень ранней Вселенной, найдем, что в эпоху Планка расстояние до горизонта составляло всего около 10^{-35} м (планковская длина) и в его пределах содержалось лишь 10^{-8} кг вещества. А к современной эпохе этот объем пространства раздулся бы примерно до 10^{-15} м³.

Горизонт определяет области пространства, которые связаны причинно. Области, находящиеся вне горизонтов друг друга, не могут «знать», что делается друг у друга. В таком случае у нас нет оснований

считать, что в очень ранней Вселенной поведение областей, разделенных расстоянием больше чем 10^{-35} м, должно быть одинаковым. В частности, нет никакой физической причины, в силу которой скорости расширения должны быть связаны в областях, разделенных более чем 10^{-35} м. Тогда в современную эпоху Вселенная была бы хаотична в масштабах, превышающих $\sim 10^{-5}$ м, либо обнаруживались бы некоторые свидетельства исчезновения хаоса в течение эпохи $t > t_P$, когда между соседними областями устанавливается причинная связь.

Наблюдаемая в настоящее время Вселенная в эпоху Планка делилась горизонтом по крайней мере на 10^{80} изолированных областей, однако, как уже подчеркивалось, Вселенная поразительно однородна. Это справедливо и для областей Вселенной, причинная связь между которыми даже в настоящее время отсутствует.

Для иллюстрации воспользуемся такой аналогией (рис. 13). Представим себе, что корабль *A* плывет в открытом океане. Моряк с наблюдательного поста на мачте обнаруживает на западе другой корабль *B*, показавшийся из-за линии горизонта. Одновременно на востоке он замечает третий корабль *C*, также появившийся на горизонте. Хотя корабли *B* и *C* видны с *A*,

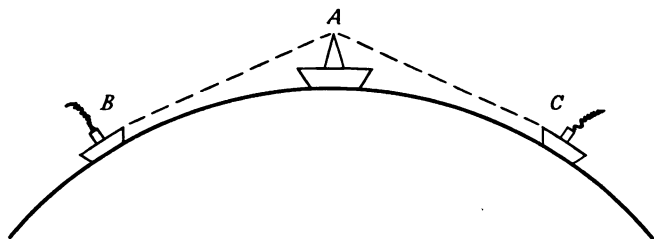


Рис. 13. Горизонт кораблей. Наблюдатель в *A* может видеть как *B*, так и *C*, хотя наблюдатель в *B* не может видеть *C*, а наблюдатель в *C* — *B*. Подобное происходит в космологии: мы можем видеть далекие галактики, которые не попадают в пределы горизонта друг друга. Между этими галактиками никогда не существовало причинной связи, и тем не менее их строение и поведение одинаковы.

с корабля *B* нельзя увидеть корабль *C*, а с корабля *C* — судно *B*, ибо они находятся вне горизонтов друг друга.

Точно так же две далекие галактики, видимые с Земли в противоположных точках неба и близкие к ее горизонту событий, лежат вне горизонтов друг друга и не могут «видеть» друг друга. Однако эти галактики, которые находятся в не связанных причинно областях Вселенной — областях, между которыми никогда не было какой-либо физической связи, — выглядят удивительно похожими. Более того, галактики населяют эти области с одинаковой пространственной плотностью и удаляются от своих соседей с одинаковой скоростью. Как объяснить такую необычайную степень сходства в несвязанных областях?

Одно возможное объяснение связано с допущением, что расширение Вселенной началось в условиях сильной неоднородности, с турбулентным и хаотическим движением и очень неравномерным распределением вещества и энергии. Затем по мере расширения первичный хаос рассеялся и установились наблюдаемая в настоящее время однородная структура движения и однородное распределение вещества. Напрашивается несколько диссипативных механизмов, например превращение турбулентной гравитационной энергии в вещество в результате рождения пар частица — античастица.

Значительные усилия затрачены на исследование теории диссипации первичного хаоса. Одним из важных процессов, несомненно, является рождение частиц из энергии турбулентности. Но все еще не найдено ни одного убедительного механизма, приводящего к наблюдаемой высокой степени однородности распределения вещества. Всегда найдется такая начальная турбулентность, которую нельзя подавить полностью. Кроме того, некоторые анизотропные движения имеют тенденцию вновь возрасть после того, как турбулентность подавлена.

Другая трудность объяснения диссипации первичного хаоса связана с избытком тепла, которое при этом вырабатывается. Все процессы затухания и трения генерируют тепло и, следовательно, увеличивают

энтропию. Большая часть тепла сосредоточена в микроволновом фоновом (реликтовом) излучении с температурой 3 К; это ограничивает турбулентность, диссипирующую в ранней Вселенной.

Основную трудность можно проиллюстрировать, рассматривая эволюцию слабой анизотропии расширения на фоне однородной в остальном Вселенной. Расширение по-прежнему можно приближенно описывать средним масштабным фактором $a(t)$, но уравнения гравитации будут содержать дополнительный член, обусловленный более сложной геометрией. Он пропорционален a^{-6} . Перепишем уравнение (4.13) в виде

$$\dot{a}^2/a^2c^2 + k/a^2 = 8\pi G\rho/3c^4 + A/a^6, \quad (4.21)$$

где A — постоянная, и будем интерпретировать анизотропию как вид энергии турбулентности, который аналогичен плотности энергии вещества ρ . Поскольку $\rho \propto a^{-4}$, ясно, что на ранних стадиях, когда a мало, анизотропия преобладает в динамике. Если пренебречь членами с k и ρ , то получим решение уравнения (4.21) в виде $a \propto t^{1/3}$ в отличие от зависимости $a \propto t^{1/2}$, найденной для простой изотропной модели.

Роль члена Aa^{-6} , связанного с энергией анизотропии, заключается в том, что при $a \rightarrow 0$ он растет быстрее, чем связанный с тепловой энергией коэффициент a^{-4} . Поэтому, чем раньше анизотропия диссипирует, тем больше выделяется тепла. Иначе говоря, по мере расширения Вселенной энергия анизотропии уменьшается быстрее, чем тепловая энергия. Влияние первичной анизотропии будет тем сильнее, чем раньше она диссипирует.

Когда анизотропия должна была диссипировать в тепло? Рассматривавшиеся механизмы затухания наиболее эффективны в самые ранние эпохи. Но это означает максимальную эффективность переработки анизотропии в тепло. Если бы диссипация произошла в эпоху Планка (наиболее благоприятную эпоху для рождения частиц), то тогда диссипация даже очень малой анизотропии (составляющей одну часть на 10^{40} частей) привела бы к выделению избытка тепла. Иначе говоря, современная температура фонового из-

лучения Вселенной требует, чтобы в эпоху Планка темп расширения сохранялся одинаковым независимо от направления с точностью до 10^{-40} . Это еще один ошеломляющий пример «космического заговора».

Приведенная выше аргументация зависит от существования разумной меры энтропии. Мы измеряем плотность тепловой энергии, но необходимо, кроме того, определить фундаментальный объем пространства. Такой объем можно связать с обычным веществом. Средняя концентрация протонов во Вселенной составляет около одной частицы на 1 м^3 , поэтому 1 м^3 может быть выбран как естественный объем.

Однако более уместно использовать число фотонов теплового излучения, приходящихся на один протон, которое (почти) не зависит от времени, чем рассматривать тепловую энергию в 1 м^3 , которая меняется по мере расширения Вселенной. Отношение числа фотонов к числу протонов S было введено в разд. 1.1, оно равно около 10^9 . Именно малость S (по сравнению с 10^{40}) ограничивает начальную анизотропию.

Параметр S имеет смысл лишь до тех пор, пока число протонов во Вселенной остается фиксированным. В разд. 4.1 отмечалось, что некоторые современные теории фундаментальных взаимодействий предсказывают нестабильность протона. Если число протонов (точнее, число барионов) не сохраняется, то использование отношения числа фотонов к числу протонов представляется бессмысленным. В моделях вселенных с несохранением барионного числа приведенная выше аргументация по ограничению анизотропии исходя из распределения трехградусного фонового излучения неприменима.

4.4. Энтропия Вселенной

Одним из фундаментальных космических параметров является S — отношение числа фотонов к числу протонов. Плотность энтропии теплового излучения пропорциональна плотности фотонов, поэтому S является также и мерой энтропии на один протон во Вселенной. Как объяснялось в предыдущем разделе,

эта энтропия могла быть обусловлена диссипацией турбулентности в ранней Вселенной, хотя очень трудно понять, почему S так малó.

Полная энтропия Вселенной несколько больше, чем энтропия фотонов. Возможно, существуют другие виды излучения помимо электромагнитного излучения, скажем нейтринное или гравитационное. Предполагается, что Вселенную заполняют первичные нейтрино, так как примерно до эпохи 10^{-3} с от начала расширения нейтрино были связаны с веществом и, следовательно, с фотонами посредством реакций, приведенных в разд. 3.1. Это обеспечивало тепловое равновесие, поддерживающее фотоны и нейтрино при одинаковой температуре. После отделения нейтрино температура фотонов немного повысилась из-за аннигиляции мюонов и позитронов. Можно оценить, что современная температура нейтринного фона составляет около 2 К.

Если существуют три типа нейтрино, то энтропия нейтрино должна быть сравнима с энтропией фотонов. Подобные рассуждения применимы и к гравитонам. Однако фоновое излучение как нейтрино, так и гравитонов нельзя обнаружить даже в обозримом будущем, и есть лишь косвенные данные о его существовании.

На первый взгляд кажется удивительным, что S не зависит от времени, потому что фотоны непрерывно излучаются и поглощаются. В частности, излучение звезд увеличивает число фотонов во Вселенной.

Для исследования вопроса о фотонах, излученных звездами, можно использовать результаты разд. 2.3 и 3.3. Число звезд в наблюдаемой Вселенной составляет $\sim N/N_*$, а средняя светимость L звезд дается зависимостями

$$L \sim \sigma c T_s^4 R^2, \quad kT_s \sim 0,1 e^4 m_e / (16\pi^2 \epsilon^2 \hbar^2)$$

(разд. 3.3). Среднее время жизни звезды составляет $t_* \sim t_H$ (уравнение (2.30)), а радиус R дается зависимостью $R \sim \hbar^2 / (G m_p^2 m_e N_*^{1/3})$ (см. вывод формулы (2.14)). Объединяя все эти величины и используя (4.10), получим для полного числа фотонов, излученных звездами,

$$10^{-3} (m_e/m_p) \alpha^6 \alpha_G^{-1/2} N \sim 10N, \quad (4.22)$$

а число фотонов первичного теплового излучения $\sim SN \sim 10^9 N$. Ясно, что фотонов звездного происхождения гораздо меньше, однако их энергия примерно в 10^4 раз выше, так что плотность энергии излучения звездного происхождения не на очень много порядков меньше, чем плотность энергии первичного фона.

Отношение S оказывает сильное влияние на строение физического мира. Если бы S было в 10^7 раз больше, то температура пространства была бы выше точки кипения воды. Вода в жидком состоянии не могла бы существовать во Вселенной до тех пор, пока космологическое расширение значительно не понизило бы фоновую температуру. На это потребовалось бы несколько времен Хаббла, а за такое время большинство звезд типа Солнце закончили бы свое существование (если бы они вообще смогли образоваться).

Но важнее то, что даже умеренное возрастание S угрожает существованию галактик. Как обсуждалось в разд. 3.4, галактики образуются благодаря росту возмущений плотности в первичном газе. Эти процессы не могли начаться до тех пор, пока в плотности Вселенной преобладало излучение. Когда стало преобладать вещество?

Плотность энергии фотонов равна $n_\gamma kT$, где n_γ — плотность их числа. Плотность энергии вещества (главным образом протонов) равна $n_p m_p c^2$. Их равенство имеет место, когда $kT \approx m_p c^2 / S$. Подставляя формулу (4.19), чтобы исключить T , найдем, что плотности энергий вещества и излучения были равны в момент

$$t_{\text{eq}} \sim S^2 \alpha_G^{-1/2} t_N \sim 10^{13} \text{ с.} \quad (4.23)$$

Прежде чем мог начаться рост неоднородностей, должно было выполняться еще одно условие. Пока температура Вселенной была выше температуры ионизации водорода, вещество было непрозрачно и, следовательно, подвергалось сильному давлению излучения, которое препятствовало быстрому гравитационному сжатию. Как только температура упала ниже примерно $0,1 e^4 m_e / (16 \pi^2 \epsilon^2 \hbar^2 k)$, вещество и излучение разделились, так как газ стал прозрачным.

При определении эпохи разделения излучения и вещества (эпохи рекомбинации) t_{dec} обратим внимание на то, что при $t > t_{\text{eq}}$ масштабный фактор $a(t)$ меняется по закону (1.16). Однако, до тех пор пока вещество остается ионизованным и, следовательно, связанным с тепловым излучением, его температура зависит от времени по такому же закону, как и температура излучения ($T \propto a^{-1} \propto t^{-2/3}$). Таким образом, полагая, что эпоха рекомбинации наступила после достижения равенства плотности энергии вещества и излучения, получим

$$T(t)/T(t_{\text{eq}}) = (t_{\text{eq}}/t)^{2/3}.$$

Принимая для t_{eq} оценку (4.23), а для $T(t_{\text{eq}})$ выражение $m_p c^2 / kS$, легко решить это уравнение относительно t . Из условия

$$kT(t) \sim 0,1 e^4 m_e / (4\pi \epsilon \hbar)^2$$

получим для t значение

$$t_{\text{dec}} \sim 10 S^{1/2} \alpha \bar{g}^{-1/2} \alpha^{-3} (m_p / m_e)^{3/2} t_N \sim 10^{13} \text{ с.} \quad (4.24)$$

Это численное совпадение t_{eq} и t_{dec} вызвало удивление астрономов. Из него следует, что отношение числа фотонов к числу протонов равно

$$S \sim 10 \alpha^{-2} (m_p / m_e). \quad (4.25)$$

Зависимость (4.23) весьма чувствительна к S . Если бы S было меньше примерно 10^3 , то эпоха t_{eq} наступила бы примерно через 1 с после начала расширения, т. е. раньше начала первичного нуклеосинтеза. Вселенная, в которой преобладает вещество, расширяется с иной скоростью и будет иметь совершенно иное отношение содержаний водорода и гелия. С другой стороны, если бы S было больше, скажем, 10^{11} , то Вселенная осталась бы радиационно-доминированной и, следовательно, в современную эпоху еще не было бы галактик.

Ясно, что некоторые важные свойства Вселенной обусловлены тем, что S попадает в интервал $10^3 < S < 10^{11}$. Но что определяет значение S ?

После того как в 1965 г. было открыто реликтовое излучение, большинство астрономов и космологов по-

лагали, что фактическое значение его температуры (3 К) было произвольным числом, не имеющим особого смысла, как, скажем, число планет в Солнечной системе. Правда, некоторые авторы заметили, что S близко к корню четвертой степени из знаменитого числа 10^{40} (формула (4.8)), но из-за неопределенности его довольно умеренного (по сравнению с 10^{40}) значения это совпадение считалось значительно менее важным, чем другие.

Альтернативой допущению, что S отражает начальные условия, служит предположение о том, что рассматриваемая энтропия каким-то образом накапливалась в течение ранней стадии расширения Вселенной вследствие диссипативных процессов. На начальных стадиях расширения Вселенной S было, скажем, ~ 1 , а при последующей генерации тепла значение S возросло до 10^9 . В таком случае не исключено, что наблюдаемое значение S можно вычислить, исходя из подробного анализа диссипативных процессов.

Один пример таких процессов затухания анизотропии уже обсуждался в разд. 4.3. Другие примеры — диссипация звуковых волн («гул» начала расширения превратился в тепло), эффекты вязкости и фазовые переходы между экзотическими сверхгорячими состояниями вещества. Интересную идею высказал Мартин Рис, предположивший, что могло образоваться и быстро сгореть (до наступления t_{dec} и t_{eq}) поколение больших догалактических звезд, а их излучение термализовалось космическим газом (приобрело тепловой спектр), который был еще ионизован. Приравнивая время жизни типичной массивной звезды (формула (2.28)) и время t_{eq} (формула (4.23)), действительно получим (4.8).

Недавно был разработан значительно более общий подход к пониманию значения S . Появление 10^9 фотонов на каждый протон на ранних стадиях расширения Вселенной — это часть большей тайны образования самих протонов. В лаборатории протоны обычно получают при столкновениях частиц, разогнанных до высоких энергий, но в каждом случае рождаются протон и антипротон (или частица, которая быстро распадается с образованием антипротона). Невозмож-

но создать одиночный протон. Чтобы объяснить это явление, физики ввели величину, названную барионным зарядом (или барионным числом). Протон и многие более тяжелые частицы имеют барионный заряд $+1$, а антипротон -1 . Закон сохранения барионного числа требует, чтобы барионный заряд каждого вновь образовавшегося протона компенсировался появлением другой частицы с барионным зарядом -1 . Подобные представления применяются и к лептонам: рождение электрона должно сопровождаться рождением позитрона. Одновременное образование, скажем, только электрона и протона запрещено законами сохранения барионного и лептонного числа.

По-видимому, целесообразно допустить, что эти законы сохранения применимы к рождению вещества при начале расширения Вселенной. В таком случае на каждый появившийся протон приходился антипротон, а на каждый электрон — позитрон. Далее, при столкновении протона с антипротоном или электрона с позитроном всегда происходит аннигиляция. Следовательно, первичные частицы, смешанные при высокой плотности со своими античастицами, имели бы очень короткое время жизни. Однако при высоких температурах, которые господствовали в горячей Вселенной, быстро рождались бы все новые пары частица — античастица, возмещающая потери на аннигиляцию. При условии термодинамического равновесия, которое, вероятно, преобладало на протяжении большей части периода с 10^{-35} по 10^{-6} с от начала расширения, противоположные процессы рождения и аннигиляции пар были бы точно уравновешены. В таком случае довольно просто вычислить равновесные содержания различных видов частиц. Фотоны, из которых рождаются пары, были бы редки. В эпоху 10^{-6} с приблизительно все вещество состояло бы из протонов, нейтрinov, электронов, мюонов, пионов и их античастиц с очень малой примесью фотонов.

Как только температура упала ниже $2m_p c^2/k$, скорость рождения протонов и антипротонов резко уменьшилась, поэтому их быстрая аннигиляция больше не компенсировалась их рождением. Позднее, примерно к эпохе 1 с, и остальные частицы постигла бы

такая же участь. Почти вся энергия массы покоя всех этих частиц и античастиц превратилась бы в нейтрино и фотоны. Таким образом, относительное содержание фотонов резко возросло.

Очевидно, некоторое количество протонов и электронов избежало аннигиляции. Если допустить, что аннигиляция каждой пары протон-антипротон дает порядка одного фотона, то современное отношение $S \sim 10^9$ свидетельствует о том, что только один протон (и один электрон) на миллиард избежали аннигиляции. В таком случае при разработке этого сценария возникает вопрос: где те антипротоны и позитроны, которые также избежали аннигиляции? Если законы сохранения барионного и лептонного числа справедливы, то каждая частица во Вселенной должна где-то иметь соответствующую античастицу.

На этот вопрос уже есть два традиционных ответа. Первый сводится к утверждению, что античастицы сохранились до нашего времени и Вселенная является смесью одинаковых количеств вещества и антивещества. Самое серьезное возражение против этой идеи заключается в том, что такая смесь исключительно нестабильна, ибо любое столкновение частиц и античастиц приводит к аннигиляции. Если бы такое явление часто происходило в нашей Галактике, то существовало бы фоновое гамма-излучение, которое однако не наблюдается. Оценки Стейгмана дают верхний предел относительного содержания антивещества в Галактике лишь в одну миллиардную долю.

Эту трудность можно было бы обойти, полагая, что между веществом и антивеществом имело место крупномасштабное разделение, приведшее к образованию целых галактик, состоящих преимущественно либо из вещества, либо из антивещества. Однако время от времени сталкиваются даже галактики, и данные измерений гамма-излучения заставляют нас обратиться к разделению вещества и антивещества в масштабе скоплений галактик, а не отдельных галактик.

Представление о симметрии вещества и антивещества во Вселенной, хотя эстетически и привлекательно, начинает казаться довольно надуманным, особенно потому, что не предложено никакого убедительного ме-

ханизма, который мог бы объяснить разделение двух компонентов в столь протяженных областях. Однако и традиционная альтернатива в равной мере неудовлетворительна. Она просто сводится к признанию того, что Вселенная асимметрична и в ней нет существенного количества антивещества. Вселенная образовалась с легким избытком (около одной миллиардной доли) вещества, и именно из этого избытка, возникшего при начале расширения, появились и галактики, и разумные существа.

Согласно такому сценарию, число барионов и лептонов в наблюдаемой Вселенной задается начальным условием. В таком случае отношение числа фотонов к числу протонов S , которое отражает этот начальный избыток вещества над антивеществом, является числом, заложенным в начальные параметры теории, и имеющим такой же статус, как, скажем, отношение m_p/m_e . Мы не знаем, почему S именно таково, но если бы S было другим, то Вселенная выглядела бы совершенно иначе. И снова не вызывающий удовлетворения ответ, что мир именно такой, какой есть, потому, что он был именно таким, каким был.

Значительно более убедительная идея заложена в новых попытках связать слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия в рамках теорий великого объединения. Эти теории предсказывают, что протон может распасться в конечном счете на позитрон (разд. 4.1). При этом нарушаются законы сохранения барионного и лептонного зарядов. Следовательно, возможно образование вещества без равного количества антивещества.

Причина нарушения этих непоколебимых законов связана с природой кварков и лептонов. Многие физики считают эти частицы истинно фундаментальными, поэтому разумно рассмотреть связь между ними. Вероятно, имеется по шесть разновидностей каждого типа частиц. Кварки подчиняются сильному взаимодействию, между тем как лептоны испытывают только слабое и электромагнитное взаимодействия. Однако в теориях великого объединения различие между этими взаимодействиями, прежде считавшимися совершенно самостоятельными, стирается. Более

того, немного стирается также и различие между лептонами и кварками, поэтому-то протон (состоящий из кварков) может превращаться в позитрон (лептон).

При высоких температурах различия между тремя типами взаимодействий, а также между лептонами и кварками полностью исчезают. Вещество переходит в новую, не имеющую резко выраженных особенностей фазу. Температуры должны быть огромны — около 10^{28} — 10^{30} К, а средняя тепловая энергия kT — лишь слегка меньше планковской массы-энергии. Такие температуры преобладали бы примерно до 10^{-35} с после начала расширения, и в ту же эпоху связь между веществом и антивеществом коренным образом изменилась бы.

Согласно теории, переносчиком единой силы великого объединения, которой определялись все взаимодействия частиц (за исключением гравитационного), были сверхтяжелые частицы, выполняющие роль, аналогичную той, которую выполняют фотоны, глюоны и промежуточные векторные бозоны W и Z . По мере того как температура падала, сверхтяжелые частицы распадались на известные более легкие частицы. Вследствие возможного несохранения барионного заряда в продуктах распада мог иметь место легкий перевес вещества над антивеществом, возможно в необходимом отношении $(1 + 10^{-9}) : 1$, что после окончательной аннигиляции всего антивещества привело бы к $S \sim 10^9$.

В этом сценарии особенно привлекает то, что он позволяет вычислить фундаментальный физический параметр S на основе теории великого объединения. Ряд физиков предприняли такие попытки. Типичный ответ следующий:

$$S \sim (\text{Отношения масс кварков}) \times (m_P/m_X), \quad (4.26)$$

где m_X — масса сверхтяжелых частиц. Подстановка подходящих значений дает оценки S , правильные по порядку величины.

Если изложенные идеи окажутся верными, то это будет означать, что обусловленные отношением $S \sim 10^9$ важные свойства Вселенной, такие, как существование галактик и примерно равное четырем отношение коли-

чества водорода к количеству гелия, являются следствием принятых значений фундаментальных параметров теории великого объединения, таких, как сверхтяжелые частицы. Если бы они отличались хотя бы в довольно умеренной степени, то Вселенная была бы совершенно иной. В частности, если бы $m_h \ll m_p$, то Вселенная была бы очень горячей и в ней не было бы галактик.

4.5. Космическое отталкивание

До сих пор в уравнениях, описывающих гравитацию, мы пренебрегали величиной Λ . В гл. 1 отмечалось, что данных наблюдений, указывающих на отличие Λ от нуля, нет. Как объяснялось в разд. 1.2, этот так называемый космологический член был первоначально введен в физику Эйнштейном, пытавшимся построить модель стационарной Вселенной. (Это было еще до открытия Хабблом расширения Вселенной.) Для этого требовалось ввести силу, способную уравновесить силу гравитационного притяжения звезд, что и достигалось введением Λ -члена в уравнения гравитационного поля.

Однако построенная Эйнштейном стационарная модель Вселенной, которая оказалась пространственно замкнутой и конечной по объему, была неустойчивой. Слабые возмущения приводили либо к сжатию, либо к расширению Вселенной с нарастающей скоростью, поэтому Эйнштейн отверг Λ -член. Благодаря открытию космологического расширения отпала необходимость в модели стационарной Вселенной, а в связи с этим и необходимость введения Λ -члена. Под влиянием этой неудачной ранней попытки ввести Λ -член многие космологи, исходя из эстетических соображений, считали, что космологический член должен отсутствовать, т. е. что Λ должно строго равняться нулю.

Современные открытия опять радикально изменили это представление. В гл. 1 отмечалось, что введение Λ -члена эквивалентно действию силы отталкивания, силы в пустом пространстве. Понятие пустого пространства сегодня — сложное понятие. Согласно кван-

товой теории, вакуум (пустота, не содержащая никаких частиц) вовсе не синоним отсутствия всякой активности: даже идеальный вакуум пронизан силами и полями.

Принцип неопределенности Гейзенберга $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ позволяет «одолжить» количество энергии ΔE на время Δt . Если Δt достаточно мало, то эта энергия может пойти на образование так называемых виртуальных частиц, которые затем быстро исчезают, чтобы «отдать долг». Этот механизм объясняет, каким образом может передаваться взаимодействие между обычными частицами с помощью виртуальных частиц, служащих переносчиками (разд. 1.3). Но виртуальные частицы могут появляться и при отсутствии обычных частиц. Следовательно, вакуум содержит неограниченное количество этих недолговечных частиц, которые, существуя лишь мимолетно, тем не менее способны взаимодействовать и участвовать в сложных процессах. Эта кипящая, бурлящая, неустойчивая смесь гравитирует подобно обычному веществу.

Можно вычислить энергию этого сложного вакуумного состояния. Вычисления сложны из-за появления бесконечно больших величин, которые нужно исключить, чтобы получить имеющие смысл результаты. Полная энергия вакуума определяется вкладом всех существующих в природе элементарных частиц: электронов, протонов, фотонов, промежуточных векторных бозонов, глюонов и т. д. Вклад большинства из них довольно просто оценить, но с одним важным классом частиц, называемых скалярными частицами, положение более сложно. Возможно, виртуальные скалярные частицы образуются в вакууме различными способами и их альтернативные состояния сильно различаются по своей энергии, близкой по порядку величины в одном типичном случае к 10^{25} кг/м³. Общий физический принцип состоит в том, что любая система стремится к состоянию с наименьшей энергией, причем этот принцип справедлив и для вакуума. Более высокие энергетические состояния были бы неустойчивыми и, вероятно, произошел бы быстрый переход в состояние с минимальной энергией.

Следствие этой картины — появление Λ -члена. Ди-

намическое поведение вакуума неотличимо от действия космологического члена в уравнениях гравитационного поля Эйнштейна. Таким образом, к обычному Λ -члену (называемому иногда «пустым» Λ_b) следует добавить квантовую поправку вакуума Λ_q . Мы можем наблюдать лишь суммарную величину $\Lambda = \Lambda_b + \Lambda_q$. И здесь мы сталкиваемся с поразительной особенностью. Вклад в Λ -член, обусловленный Λ_q , приблизительно на пятьдесят порядков величины больше, чем максимальный предел, следующий из наблюдений. Очевидно, Λ_b и Λ_q настолько точно подогнаны друг к другу, что почти полностью компенсируют друг друга с точностью лучше 10^{-50} части исходных значений. Таким образом, чтобы полное значение Λ -члена не превышало 10^{-53} м^{-2} (наблюдаемый верхний предел), вклад вакуума Λ_q , скажем 10^{-2} м^{-2} , должен иметь знак, противоположный знаку Λ_b , а по абсолютной величине совпадать с ним с очень высокой точностью.

Значение Λ_q определяется параметрами физики микромира, которые входят в рассматриваемую конкретную теорию поля. Например, скалярные частицы в теории электрослабого взаимодействия Вайнберга — Салама вносят вклад

$$\Lambda_q = -\pi G m_\phi^2 / (\sqrt{2} c^4 g_w) \sim 10^{-2} \text{ м}^{-2},$$

где m_ϕ — масса скалярных частиц. Однако

$$\Lambda_b + \Lambda_q \leq 10^{-53} \text{ м}^{-2}.$$

Если бы G или g_w отличались от своих значений всего на одну из 10^{50} частей, то Λ_q не уравновешивало бы в точности Λ_b и структура Вселенной была иной. Более того, согласно теориям великого объединения, точность подгонки должна составлять одну часть на 10^{100} .

Что было бы, если бы Λ превышало 10^{-53} м^{-2} ? Вспомним, что Λ порождает силу, которая противостоит гравитации и растет по величине с расстоянием. Существование Λ -члена, каким бы малым он ни был, подразумевает в вечно расширяющейся Вселенной, что в конечном счете плотность вещества стала бы настолько малой, что сила отталкивания стала бы преобладать, а темп расширения Вселенной непрерывно нарастал.

Наличие космологического Λ -члена модифицирует уравнение (4.13) следующим образом:

$$\dot{a}^2/a^2c^2 + k^2/a^2 - \Lambda = 8\pi G\rho/3c^4. \quad (4.27)$$

Ясно, что при малом a можно пренебречь Λ , как мы и поступили при обсуждении ранней Вселенной. Однако при больших a вклад Λ становится доминирующим. Если пренебречь слагаемыми, содержащими k и ρ , то уравнение (4.27) имеет решение

$$a \propto \exp(c\Lambda^{1/2}t), \quad (4.28)$$

т. е. Вселенная экспоненциально раздувается. В таком случае кривая, показанная на рис. 3, уже не будет применима к поздним стадиям. Вместо того чтобы постепенно загигаться вниз, кривая опять устремится вверх с увеличивающейся скоростью.

В случае $\Lambda < 0$ связанная с Λ -членом сила «помогает» гравитации, поэтому Вселенная сжимается с характерным временем $\sim 1/c\Lambda^{1/2}$.

Отсутствие какого-либо признака как экспоненциального роста, так и повторного сжатия позволяет астрономам установить предел Λ -члена. Если бы Λ -член был всего на порядок величины больше, то характер расширения Вселенной был бы совсем другим. Но если бы Λ -член был на несколько порядков величины больше и положителен, то расширение Вселенной стало бы взрывообразным и вряд ли когда-нибудь смогли бы образоваться галактики. При отрицательном Λ вместо взрывообразного расширения произошел бы катастрофический гравитационный коллапс Вселенной. Вот к таким драматическим последствиям привело бы изменение менее чем на одну 10^{40} часть либо гравитационной постоянной, либо постоянной слабого взаимодействия.

Можно предположить, что невероятно точная сбалансированность Λ_q и Λ_b свидетельствует о проявлении какого-то фундаментального принципа, требующего точного равенства нулю Λ , как принимал Эйнштейн. Вместо того чтобы приписывать малость Λ случайной сбалансированности огромных величин, ее можно было бы рассматривать как основной принцип физики, проявляющийся в природе.

К сожалению, все не так просто. Квантовое состояние Вселенной не является чисто вакуумным состоянием. Даже пространство между атомами заполнено тепловым излучением. Поэтому приходится исследовать действия конечной температуры на сложные процессы в квантовом вакууме, и оказывается, в конечном итоге Λ_q зависит от температуры. По мере роста температуры энергии различных возможных вакуумных состояний сближаются. Если температура выше некоторого критического значения (10^{15} К в случае слабого взаимодействия), то два вакуумных состояния сливаются в одно. Разность энергий вакуума в фазе очень высокой температуры и в современной фазе низкой температуры (около 3 К) колоссальна. Поэтому, даже если в результате тонкой подстройки в нашу эпоху $\Lambda \leq 10^{-53} \text{ м}^2$, это значение было несравненно больше в горячую раннюю эпоху. Оно не может быть точно равно нулю во все эпохи. Однако есть спасительный выход. Рост Λ -члена по мере возвращения к началу расширения Вселенной сопровождается ростом плотности вещества, и, очевидно, гравитационное притяжение вещества всегда преобладает над отталкиванием даже на ранних стадиях эволюции. Анализ уравнения (4.27) показывает, что при $a \rightarrow 0$ Λ -член гораздо меньше по сравнению с плотностью энергии, обусловленной веществом и меняющейся по закону a^{-4} . Эта особенность, по-видимому, остается в силе даже тогда, когда Λ резко возрастает с температурой при $a \rightarrow 0$. Слабое влияние колоссального первичного Λ выглядит еще удивительнее в свете того, что вклады в Λ вносят различные виды скалярных частиц, причем электрослабые скалярные частицы — лишь один из источников. Но общая сумма всех этих вкладов в Λ точно уравнивается Λ_b , а температурная зависимость набора различных квантовых систем в ранней Вселенной такова, что гравитация преобладает несмотря на быстрый рост Λ с возрастанием температуры*.

* См. предисловие редактора перевода. — Прим. ред.

АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП

Рассмотренные в предыдущих двух главах удивительные совпадения и, по-видимому, случайная согласованность ряда величин производят впечатление, будто «происходит» что-то необыкновенное. В начале гл. 4 было сделано замечание о том, что, по-видимому, действует скрытый принцип, организующий Вселенную определенным образом. Как иначе объяснить, что энергия расширения Вселенной не только согласована с ее гравитационной энергией, обеспечивая существование Вселенной по крайней мере в течение времени в 10^{60} раз большего, чем длительность естественной планковской единицы времени, но и согласована подобным же образом всюду в пространстве-времени, даже в причинно не связанных областях? Как еще объяснить почти полное равенство (с точностью до знака) Λ_4 и Λ_6 или полную изотропию?

Несмотря на очевидную необходимость открыть на основе фундаментальной физики космический принцип, способный объяснить эти поистине чудесные особенности, а также удивительные совпадения физики микромира, обсуждавшиеся в гл. 3, такой принцип не был еще предложен. Единственная систематическая попытка научно объяснить кажущуюся таинственной структуру физического мира основывается вовсе не на фундаментальной физике, а на биологии. Эта система аргументов обращается к неопровержимому и тем не менее на первый взгляд не относящемуся к делу свойству Вселенной — существованию разумной жизни на Земле.

Обычно в физике «наблюдатель» не принимается во внимание. Как правило, полагают, что мы здесь просто «на прогулке». Некоторые ученые подвергли сомнению это предположение, считая, что строение физического мира неотделимо от обитателей, наблю-

дающих его, в самом фундаментальном смысле. Они утверждают, что действительно существует некий принцип, осуществляющий невероятно тонкую подстройку Вселенной. Но это не физический, а антропный принцип.

5.1. Биологические предпосылки

Предыдущие главы должны были убедить читателя в том, что строение физического мира определяется рядом наблюдаемых числовых совпадений. Многие из основных свойств Вселенной определяются, в сущности, значениями фундаментальных постоянных природы, таких, как G , α , m_p и т. д. Эти свойства были бы совершенно иными, если бы перечисленные постоянные имели значения, хотя бы слегка отличающиеся от наблюдаемых. Ясно также, что для возникновения Вселенной, хотя бы отдаленно походящей на наблюдаемую, должны удивительно сложным образом взаимодействовать многие, явно не связанные между собой области физики.

Все это побуждает задать вопрос: почему из бесконечной области всевозможных значений фундаментальных постоянных и из бесконечного разнообразия начальных условий, которые могли бы существовать в ранней Вселенной, реализуются величины и условия приводящие к вполне конкретному набору весьма специфических особенностей, которые мы и наблюдаем? Безусловно, Вселенная — весьма специфический объект: чрезвычайно однородная в большом масштабе, но все-таки не настолько, чтобы не могли образоваться галактики; с очень низкой энтропией, приходящейся на один протон, и, следовательно, достаточно холодная для химических реакций; с практически равным нулю космологическим отталкиванием и со скоростью расширения, согласующейся с энергосодержанием с невероятной точностью; с значениями постоянных взаимодействия, позволяющими существовать ядрам, однако не допускающими выгорания всего космического водорода, и многими не менее очевидными случайностями.

На эти совпадения обращали внимание многие

ученые. На Эддингтона и Дирака произвело весьма сильное впечатление появление числа 10^{40} в различных соотношениях (разд. 4.1), и они построили детально разработанные физические теории, чтобы объяснить эти совпадения. Эддингтон пытался вывести число 10^{40} как следствие новых фундаментальных физических принципов, а Дирак предположил, что это большое число зависит от времени, причем $G \propto t^{-1}$. Впоследствии теория Дирака более детально разрабатывалась П. Иорданом (и самим Дираком). Иордан также пытался объяснить отношение (4.3) путем радикального отхода от общепринятой физики. Позднее Картер обратил внимание на то, что он называл «замечательным совпадением» отношения (3.9), которое определяет, что типичные звезды лежат в пределах между голубыми гигантами и красными карликами.

На многих произвело сильное впечатление то, что даже существование разумных существ сильно зависит от структуры физического мира, который они изучают. Эти авторы утверждают, что если бы любое из точно отрегулированных условий, обсуждавшихся в предыдущих главах, было нарушено, то жизнь, точнее, известная нам форма жизни была бы невозможна.

Картер замечает: «Существование любого живого существа, подходящего в качестве наблюдателя, будет возможно только при вполне определенных сочетаниях параметров». Дж. Барроу сформулировал проблему несколько иначе: «Уже само наше существование влечет за собой строгий отбор типов Вселенной, которую мы могли бы познавать». В статье, которая начинается с весьма примечательного предложения «Мы существуем», Нанопуолос также придает важное значение отношению числа фотонов к числу протонов во Вселенной. «Наше существование, — утверждает он, — накладывает сильные ограничения на это отношение».

Комментарий Картера, по существу, означает, что если бы фундаментальные параметры имели другие численные значения, то нас бы не было и некому было бы комментировать этот факт. Но заявления Барроу и Нанопуолоса более определенны. А именно, что из нашего существования вытекает ограничение на воз-

можную структуру Вселенной, в некотором смысле человек даже «выбирает» ее — идея, сформулированная Джоном Уилером следующим образом: «Вот человек, следовательно, какой же должна быть Вселенная?»

Высказывание Б. де Витта можно рассматривать как поддержку каждой из альтернатив в умышленно двусмысленной и сжатой фразе: «Мир, в котором мы живем, есть мир, в котором живем мы».

Такие взгляды получили название *антропного принципа*. С годами для многих этот принцип стал очень емким. До обсуждения различных его толкований полезно привести пример проявления его в самом подходящем случае, когда нельзя отрицать связь существования человека с проблемой.

5.2. Объяснение совпадений больших чисел

Роберт Дикке одним из первых привлек биологию для объяснения непонятной особенности физической Вселенной. В 1961 г. он заявил об ошибочности поисков Эддингтона и Дирака в области новых фундаментальных принципов физики для объяснения совпадения (4.10). Согласно соотношению (4.10), возраст Вселенной в ядерных единицах — число такого же колоссального порядка величины, как и отношение электрической и гравитационной сил между протонами и электронами.

Очевидно, существование человека связано с возрастом Вселенной. Продолжительность существования технологической цивилизации, включая эпоху измерений обсуждаемых здесь фундаментальных постоянных, составляет ничтожную долю современного возраста Вселенной, и потому его можно принять в качестве характерной эпохи t_{now} . Загадка заключается в том, почему t_{now} находится в таком же численном отношении к t_N , как электрическая сила между протонами и их гравитационное притяжение.

Дикке пришел к выводу, что эпоха t_{now} — это не случайный момент, она непосредственно связана с характерным временем определенных физических про-

цессов во Вселенной, являющихся необходимыми условиями для существования разумной жизни и, следовательно, высокоразвитой технологии. Можно представить ряд таких условий, но Дикке выбрал одно — существование химических элементов тяжелее водорода. В основе живой материи на Земле лежит углерод, хотя азот и кислород также крайне необходимы. Этих элементов не было в первичной Вселенной. Их присутствие в достаточных количествах объясняется нуклеосинтезом, происходящим в недрах звезд.

В начале расширения горячей Вселенной достигались температуры, достаточно высокие для синтеза тяжелых элементов, но только в течение нескольких первых минут. Поэтому в изобилии образовался лишь гелий, не имеющий отношения к жизни. С другой стороны, в недрах звезд достигаются температуры $\sim 10^7$ К и выше, поддерживающиеся в течение миллиардов лет, и тем самым создаются условия для превращения большей части звездного вещества в тяжелые элементы. Но чтобы эти элементы стали химическими строительными блоками жизни, их нужно рассеять по галактике. Как объяснялось в разд. 3.1, это возможно, когда звезда, исчерпав запасы ядерного топлива, достигает конечных стадий своей эволюции. Если звезда не очень массивна, то она, вероятно, взорвется как сверхновая и разбросает свое содержимое по межзвездному пространству. Как однажды заметил Дж. Джинс, наши тела состоят из пепла давно угасших звезд.

Согласно Дикке, жизнь во Вселенной не может возникнуть до тех пор, пока по крайней мере одно поколение звезд не завершит свой жизненный цикл и не рассеет по галактике осколки сверхновых, содержащие углерод. С другой стороны, расход водородного топлива звездами невосполним, так что этот цикл не может повторяться до бесконечности. После смены нескольких поколений звезд галактические запасы ядерного топлива сильно истощатся и «рождаемость» звезд (по крайней мере стабильных звезд, подобных Солнцу) станет довольно низкой. Затем галактика начнет охлаждаться и жизнь, вероятно, станет невозможной.

Такие представления приводят к предположению, что жизнь во Вселенной может существовать только в эпоху от t_* до, скажем, $10t_*$, где t_* — среднее время существования звезды умеренной массы. Эта величина была приближенно вычислена в разд. 2.3. В соответствии с формулой (2.28) имеем

$$t_* \sim \alpha_G^{-1} t_N \sim 10^{40} t_N.$$

Если теперь приравнять с точностью до порядка величины t_{now} с t_* (исходя из того, что разумные существа могут познавать Вселенную только в течение эпохи от t_* до $10t_*$), то одно «совпадение» больших чисел находит объяснение. Итак, это вовсе не случайное совпадение и не проявление до сих пор не известных законов физики, а всего лишь прямое следствие физики и биологии.

Очевидно, биологическое объяснение фундаментального свойства наблюдаемого мира увенчалось успехом там, где теоретическая физика потерпела неудачу. Тот факт, что t_{now} совпадает с t_* только по порядку величины, не является серьезным недостатком этой аргументации, так как в любом случае большие числа равны друг другу лишь приближенно и их можно определить по-разному в зависимости от того, например, используется ли масса электрона или протона. Однако все эти различия очень малы по сравнению с огромным числом 10^{40} . Сам факт, что выраженное в единицах t_N время t_* так близко к этому числу, поразителен.

Можно определить нижний предел t_* другим методом, не привлекающим характерное время звездной эволюции. Б. Карр и М. Рис указали, что жизнь зависит от существования галактик, а они могут образоваться только после завершения эпох t_{dec} и t_{eq} (разд. 4.4). Если следовать теории великого объединения, которая предсказывает отношение фотонов к протонам $S \sim 10^{10} \sim \alpha_G^{-1/4}$ (а не принимать S в качестве начального условия, т. е. как свободный параметр), то уравнение (4.23) непосредственно дает

$$t_{\text{eq}} \sim \alpha_G^{-1} t_N$$

и, следовательно, $t_{\text{now}} \gtrsim t_{\text{eq}} \sim 10^{40} t_N$.

Идея, что наблюдатели занимают положение в пространстве, которое может оказаться нетипичным, противоречит общему направлению революции Коперника. Отрицанием выделенного положения Земли в космической динамике Коперник положил начало традиции, которая оказывала влияние на научную мысль в течение четырех столетий. В большинстве отношений Землю можно рассматривать как самую обычную и типичную планету из огромного числа подобных тел, обращающихся вокруг других звезд типа Солнца в галактиках, похожих на нашу. Однако местоположение человека во Вселенной как биологического вида в некотором смысле нетипично. Хотя Земля и не является особой среди планет, тот факт, что мы живем на твердой поверхности, тогда как вещество во Вселенной в основном находится в форме разреженных газовых облаков или горячих плазменных шаров, и тот факт, что мы находимся вблизи устойчивой звезды, хотя многие звезды нестабильны или входят в кратные системы, не подходящие для планет, не являются случайным стечением обстоятельств. Вряд ли нам удалось бы выжить во враждебном окружении наиболее типичной формы космического вещества. И сама продолжительность существования цивилизации ограничена, поскольку Вселенная эволюционирует и в ходе ее эволюции из горячего плотного состояния к скоплению израсходовавших ядерное топливо разреженных галактик лишь относительно короткий интервал времени подходит для жизни.

Конечно, аргументация Дикке по ряду причин может быть ошибочной. Прежде всего он исходит из представлений об известной нам форме жизни. Не исключены, хотя совсем не обязательны, иные формы жизни, основанные на совершенно других физических процессах. Было бы излишне самоуверенно (особенно при оценке фундаментальных проблем) считать основанную на углероде химическую жизнь единственным носителем разума и технологии.

С другой стороны, не исключено, что жизнь любого вида не может развиваться до уровня разумной, пока не завершатся определенные физические процессы. Жизнь характеризуется высокой степенью сложности

и упорядоченности, для достижения которых необходимы определенные условия. Например, второе начало термодинамики, лежащее в основе всех природных процессов, требует, чтобы до возникновения упорядоченности протекали некоторые неравновесные процессы. Вполне возможно, что весьма простые законы сдерживают скорость установления порядка и накопления информации, а следовательно, и скорость эволюции жизни, в основе которой лежат известные силы природы.

Вероятно, самым слабым местом в используемой в рассмотренном примере антропной аргументации является оценка верхнего предела $t_{\text{пов.}}$. Даже если Галактика в конце концов, когда ее звезды угаснут, станет неподходящей для жизни, можно надеяться, что за отпущенные ей миллиарды лет технологическая цивилизация добьется успеха в преодолении этой трудности. Можно предсказать, что такая цивилизация создаст искусственную среду, пригодную для жизни и позволяющую существовать бесконечно долго. Дайсон выполнил тщательный анализ вопроса о выживаемости и пришел к заключению, что достаточно изобретательная цивилизация, управляя окружающей средой, могла бы достигнуть неограниченной долговечности. Чтобы по возможности сохранить источники свободной энергии и, следовательно, избежать пресловутой «тепловой смерти» Вселенной, являющейся следствием второго начала термодинамики, такая цивилизация должна на все возрастающие по длительности периоды впадать в состояние анабиоза — «зимней спячки». Тем не менее, суммарная продолжительность существования цивилизации была бы практически бесконечной.

Если жизнь будет продолжаться (хотя бы с периодами «зимней спячки») бесконечно долго, то может показаться удивительным, что мы познаем Вселенную конечного возраста. Тогда, несомненно, совпадение больших чисел (4.10) имело бы только нижний предел: поскольку $t_{\text{пов.}}$ не имеет верхнего предела, левая часть (4.10) ограничена только значением t_* и может быть больше 10^{40} .

Это более слабое ограничение применимо только

к открытой Вселенной, т. е. расширяющейся вечно. Если плотность вещества больше критической, то расширение сменится сжатием, которое положит конец всякой жизни. Тот факт, что $t_{\text{пов}}$ не слишком превышает t_* , был бы объясним, если бы можно было показать, что полное время жизни Вселенной не намного больше t_* . Это должно иметь место, если современные эксперименты подтвердят, что масса покоя нейтрино отлична от нуля (разд. 3.1). Однако важно отметить, что не известно ни одной фундаментальной причины, по которой продолжительность цикла в осциллирующей Вселенной должна быть связана с t_* . Если окажется, что время жизни наблюдаемой Вселенной $\sim 10t_*$, то это скорее всего чистая случайность. Продолжительность жизни Вселенной зависит от начальной скорости ее расширения. Возможно, более детальное рассмотрение покажет, что стабильные галактики и звезды образуются только в случае, если q превосходит q_{cr} как раз на величину, необходимую, чтобы обеспечить время жизни Вселенной $\sim 10t_*$.

Важная роль углерода для земной формы жизни побудила Ф. Хойла обратить внимание на следующую любопытную случайность: ядра углерода синтезируются в звездах в результате почти одновременного столкновения трех ядер гелия. Такое тройное столкновение, конечно, довольно редкое явление и ни к чему бы не вело, если бы не случайное свойство ядер углерода. При слиянии двух ядер гелия образуется нестабильное ядро бериллия ^8Be . Вероятность слияния с третьим ядром гелия и образования ядра углерода ^{12}C , прежде чем распадется ^8Be , очень чувствительна к энергии, с которой ядро гелия сталкивается с «виртуальным» ядром ^8Be . Причина здесь в существовании так называемых ядерных резонансов. Когда частота квантовой волны, связанной с налетающим ядром гелия, совпадает с собственной частотой колебаний составного ядра ^8Be , ядерное поперечное сечение для захвата третьего ядра гелия очень резко возрастает. По счастливой случайности тепловая энергия ядер в типичной звезде лежит почти точно в области резонанса ^{12}C . И эта счастливая случайность обеспечивает эффективный синтез углерода в недрах

звезд, иначе скорость образования углерода была бы значительно меньше.

Но это еще не все, ибо необходимо, чтобы синтезированное ядро углерода уцелело несмотря на последующие ядерные реакции в недрах звезды. Запасы углерода были бы исчерпаны по мере того, как из него синтезировались бы более тяжелые элементы. В частности, при следующем столкновении ядра гелия с ^{12}C образуется кислород ^{16}O . В природе, однако, существует еще одна счастливая случайность. Резонансная энергия в ядрах ^{16}O гораздо ниже тепловой энергии, поэтому ^{12}C не может полностью сгореть с образованием кислорода.

Строение ядра безмерно сложно, но в конечном счете расположение ядерных резонансов определяется фундаментальными взаимодействиями, особенно сильным ядерным и электромагнитным взаимодействиями. Не будь «силы» этих взаимодействий весьма точно соразмерены, случайное расположение резонансов в ^{12}C и ^{16}O было бы другим и жизнь, по крайней мере земного типа, была бы чрезвычайно маловероятна.

Возвращаясь к этой теме в недавней публикации, Хойл считает, что совпадение в синтезе углерод—кислород столь удивительно, что кажется «нарочно подстроенным». Касаясь расположения ядерных резонансов, он комментирует: «Если бы вы хотели образовать углерод и кислород примерно в равных количествах в ходе звездного нуклеосинтеза, то должны были бы задать два уровня (резонансов), причем именно там, где эти уровни и найдены... Здравая интерпретация фактов дает возможность предположить, что в физике, а также химии и биологии экспериментировал «сверхинтеллект» и что в природе нет слепых сил, заслуживающих внимания».

5.3. Слабый и сильный антропный принцип

Хотя и Дикке, и Хойл в своих обсуждениях кажущихся маловероятными совпадений в природе обраща-

ются к углероду, есть отчетливое различие между этими двумя аргументациями.

Согласно Дикке, наше существование как наблюдателей, состоящих из соединений углерода, объясняет равенства двух различных отношений 10^{40} . Человек существует именно в эпоху t_* , вот поэтому и совпадают большие числа (4.10).

С другой стороны, пример, рассмотренный Хойлом, не объясняет ядерных резонансов, а только констатирует их удачное совпадение; в противном случае не было бы человека и некому было бы обсуждать эту проблему. Это одна из иллюстраций того, как невероятно нам повезло, что мы живем во Вселенной, структура которой так чувствительна к фундаментальным постоянным.

Первое направление рассуждения Картер назвал слабым антропным принципом. Картер формулирует его таким образом: «То, что мы предполагаем наблюдать, должно удовлетворять условиям, необходимым для присутствия человека в качестве наблюдателя». Короче говоря, самим своим существованием наблюдатель ограничивает предмет наблюдения. По-видимому, слабый принцип не применим к примеру Хойла, поскольку существование человека, очевидно, связано с эпохой t_{now} , но оно, несомненно, не может повлиять на строение ядра.

Однако пример Хойла можно совместить со слабым принципом, если принять, что фундаментальные постоянные, такие, как α и g_s , могут меняться в пространстве или во времени. Тогда наблюдатели возникли бы только в тех областях Вселенной, где расположение ядерных резонансов случайно проявляется как раз должным образом. Хойл предполагал, что такое «непостоянство постоянных» возможно.

Эти замечания применимы и к космологическому отталкиванию, обсуждавшемуся в разд. 4.5. Крайняя малость Λ , обусловленная, видимо, сбалансированностью Λ_g и Λ_b , несомненно, подходит для живых организмов. Легкое несоответствие породило бы Вселенную, которая либо сколлапсировала бы, либо катастрофически взорвалась, исключив любую возможность ее познания. На первый взгляд этот факт,

по-видимому, просто показывает, как нам повезло, что мы живем в нужной Вселенной. Однако если допустить переменность Λ_q , то лишь в довольно ограниченных областях пространства-времени будет иметь место почти полная ее компенсация Λ_b . В этих областях может возникнуть жизнь, поэтому не удивительно, что мы находимся именно в такой области пространства-времени, где $\Lambda \approx 0$. Возможные причины изменения Λ_q в пространстве рассмотрены автором и С. Анвином.

Можно распространить эти идеи на все другие примеры удивительных совпадений, обсуждавшихся в предыдущих главах. Изменения α и g_s привели бы к изменению содержаний первичных водорода и гелия. Изменения начальных условий в горячей Вселенной привели бы к тому, что в некоторых областях Вселенной образовались бы галактики, тогда как в других имелись бы только огромные газовые облака или черные дыры. Те области, которые расширялись как раз с надлежащей скоростью, способствовали образованию жизни, в то время как другие оказались непригодными для жизни из-за коллапса, быстрого расширения или крайней неоднородности и неизотропности и т. д.

Слабость этих аргументов состоит в том, что, по существу, нет серьезных свидетельств изменений как начальных условий, так и фундаментальных постоянных, которые необходимы, чтобы существовал целый набор различных значений постоянных. Сильные ограничения на изменения во времени можно наложить на большинство приведенных в табл. 1 постоянных, тогда как вариации в пространстве выявились бы в поведении далеких галактик, но все они выглядят удивительно похожими на нашу. Только вариации в масштабах, превосходящих радиус Хаббла, были бы необнаружимы.

Для многих удивительных совпадений, которые нельзя объяснить с помощью слабого антропного принципа, принята альтернативная схема рассуждений. Она включает сильный антропный принцип, сформулированный Картером следующим образом:

«Вселенная должна быть такой, что бы в ней на некоторой стадии эволюции мог существовать наблюдатель».

Итак, ясно, что сильный антропный принцип в своей основе совершенно отличен от слабого принципа. Он представляет собой радикальный отход от традиционной общей концепции научного объяснения. По существу, он утверждает, что Вселенная приспособлена для существования жизни и что как законы физики, так и начальные условия подстраиваются таким образом, чтобы гарантировать появление и эволюцию жизни. В этом отношении сильный антропный принцип сродни традиционному религиозному объяснению мира: бог сотворил мир, чтобы люди населяли его.

Поддержку сильному принципу можно найти в позитивизме — направлении философии, которому свойственны черты феноменализма и субъективного идеализма. В рамках этого учения Вселенная, в которой нет места для наблюдателя, бессмысленна; реальна лишь та Вселенная, которая познаваема. Такая Вселенная обязана обладать свойствами, необходимыми для возникновения разума, какими бы неправдоподобными они ни были.

Ряд ученых поддерживал сильный антропный принцип. При обсуждении того, каким образом соотношение (3.14) с неизбежностью должно осуществляться во Вселенной, в которой могут образоваться галактики, Дж. Силк замечает: «Гравитационная неустойчивость и фрагментация должны вести от гигантских скоплений к галактикам, а от них — к звездам и в конце концов к планетам и среде, подходящей для развития жизни. Эта непрерывная цепь обязательна в любой познаваемой вселенной и, следовательно, может дать ключ к пониманию смысла фундаментальных безразмерных чисел астрофизики и космологии». Обратите внимание: Силк полагает, что именно познаваемость объяснит большие числа, а не наоборот.

Уилер обсуждает «Вселенную с нашим участием», в которой именно существование наблюдателя на некоторой стадии ее эволюции несет прямую ответствен-

ность за образование как раз такого типа Вселенной. Например, обсуждая, почему наблюдаемая Вселенная так огромна, он пишет: «Что толку от Вселенной, которую некому познать?» Уилер отмечает, что если бы размер горизонта не превышал 10^9 световых лет, то Вселенная коллапсировала бы за время меньше t_* , исключая таким образом жизнь. Он приходит к выводу, что Вселенная так велика ($\approx 10^9$ световых лет) «потому, что только тогда может существовать человек».

Барроу вновь подтверждает мысль о том, что существование человека в некотором смысле ответственно за очень специфическую структуру наблюдаемой Вселенной, когда пишет: «Многие наблюдения естественного мира, несмотря на *априорную* необычность, представляются в этом свете как неизбежные *последствия* нашего существования» (курсив мой. — П. Д.).

Со строго физической точки зрения представляется по меньшей мере необъяснимым, что существование разумных существ может привести к знаменитым совпадениям. Несомненно то, что любая прямая причинная связь здесь невозможна. Сложившиеся физические условия могли бы привести к появлению человека, но вряд ли можно приписать человеку возможность формулировать требования, обязательные для окружающей среды.

Но есть одна область физики, в которой наблюдатель действительно играет центральную роль, — это квантовая теория. Процесс измерения в квантовой механике, терзавший парадоксами в течение длительного времени, по-видимому, требует участия мыслящего наблюдателя на основном уровне. И хотя нельзя сказать, что наблюдатель в квантовой механике создает свою собственную Вселенную в общепризнанном смысле слова «создавать», анализ измерений квантовой теории открывает реальный путь, представляющий правдоподобное физическое (в противоположность философскому) свидетельство в пользу сильного антропного принципа.

5.4. Теория множественности вселенных

Слова «совпадение», «необычный», «удивительный», то и дело встречающиеся при обсуждении различных связей, описанных в этой книге, создают впечатление чего-то невероятного. Однако само понятие вероятности имеет смысл лишь тогда, когда есть ряд альтернатив, из которых делается выбор.

Игрок в гольф, сделавший первый удар наугад и тут же выигравший очко, должен считать себя удачливым, потому что *a priori* такой исход в высшей степени маловероятен. Дело в том, что на площадке для игры в гольф лунка находится в середине зеленого поля, а мяч, посланный наугад, с равной вероятностью мог попасть в любую точку поля. Из простой статистики следует, что шансы попадания в лунку незначительны. Напротив, можно утверждать, что из огромного числа случайных передач лишь незначительная доля приведет к попаданию мяча в лунку с одного удара. Итак, можно утверждать, что любое расположение мяча на площадке для игры в гольф одинаково маловероятно. Однако дело в том, что лунка в середине зеленого поля имеет совершенно особое значение (по крайней мере для игроков в гольф) в отличие от любого другого небольшого участка площадки (вот почему все аплодируют, когда мяч попадает туда). Аналогично существование жизни имеет совершенно особое значение для нас.

Можно вообразить «коллекцию» возможных вселенных (ансамбль миров), каждая из которых чем-то отличается от других, так что всегда найдется вселенная, в которой с определенной точностью достигается всякое мыслимое значение для каждой фундаментальной постоянной и всякое мыслимое начальное распределение вещества и движения. В таком случае известные совпадения обрели бы значительно более конкретный статус. Представим себе вооруженного фишкой Творца, произвольно и наугад выбирающего одну из вселенных среди многочисленных кандидатов. Тогда шансы на то, что он выберет вселенную, в которой

возможна жизнь, как мы знаем, чрезвычайно малы.

Трудно количественно определить, какова вероятность выбрать познаваемый мир. Ведь хотя мы и знаем, как измерить относительные вероятности, скажем, выпадения орла и решки при подбрасывании монеты, мы не знаем, как измерить относительные вероятности выпадения возможных вселенных. Тем не менее понятие ансамбля миров позволяет, исходя из априорных соображений, отстаивать общий вывод, что наш мир действительно чрезвычайно маловероятен и нам безмерно повезло, что мы существуем, хотя и не можем точно оценить свою удачливость.

Многие религиозные люди найдут в этих идеях поддержку своей вере, считая, что Творец бросил космическую фишку не наугад, а с тонким расчетом, чтобы выбор пал на вселенную, подходящую для жизни.

Те же, кто предпочитает научные интерпретации и язык, могут обратиться к квантовой теории с присущей ей вероятностной структурой. В принципе квантовая теория должна обеспечить определенную меру вероятности различных возможных начальных движений во Вселенной, с тем чтобы мы могли вычислить, например, вероятность достижения очень низкой степени анизотропии из некоторого квантового состояния Вселенной.

К сожалению, понятие квантового состояния Вселенной в целом неопределенно, даже неоднозначно в традиционной (так называемой копенгагенской) интерпретации квантовой теории. Основная проблема в том, что квантовое состояние может совмещать суперпозицию нескольких взаимно исключающих возможных миров. На основе измерений произвольно выбирается один конкретный мир — реально существующий мир. Можно вычислить вероятность появления данного конкретного результата, но вообще говоря возможен любой результат в области исходов.

Рассмотрим акт измерения более подробно. Для измерений нужен некоторый измерительный прибор, не являющийся частью системы. Измерение состоит во временном соединении прибора с интересующей системой и в фиксации происшедших при этом изме-

нений в приборе. Но если система — это целая Вселенная, понятие измерительного прибора, не являющегося частью системы, становится бессмысленным, ибо Вселенная — это все, что существует. С другой стороны, если нечем измерить состояние Вселенной, то как может Вселенная совершить переход от суперпозиции многих возможных миров к одному, конкретному, фактическому миру?

Этот парадокс на протяжении десятилетий докучал специалистам по квантовой теории. Только одно исчерпывающее решение было предложено за это время. Основная его идея — в признании одновременного существования всех мыслимых вселенных. Предложенная Х. Эвереттом в 1957 г., эта исходящая из концепции множественности вселенных интерпретация квантовой теории создает естественную основу для сильного антропного принципа.

Прежде чем переходить к обсуждению связи с антропным принципом, полезно рассмотреть в качестве иллюстрации простой эксперимент по рассеянию частиц. Пусть электрон попадает прямо в протон. Связанная с электроном квантовая волна подвергается дифракции на протоне и распространяется за его пределы, подобно звуковым волнам, отражающимся во все стороны от твердой преграды. Волна дает меру вероятности обнаружения электрона в данном месте, причем там, где возмущение волны максимально, наиболее вероятно обнаружить и электрон.

Волна рассеивается как влево, так и вправо. Но электрон лишь один, и он не способен разделиться. Поэтому он может рассеяться либо влево, либо вправо с определенной вероятностью. Измерение покажет, какая из возможностей осуществилась, но после измерения структура волны тотчас должна измениться, ибо, если электрон обнаружен справа, то вероятность найти его слева равна нулю. В таком случае распространяющаяся влево волна должна внезапно исчезнуть.

Это внезапное затухание волны составляет сущность квантового парадокса измерения. Ибо если прибор также описывается волной (как это и должно быть, поскольку и он подчиняется квантовому прин-

ципу), то даже тогда, когда волна электрона затухает, волна прибора не будет затухать до тех пор, пока сам прибор не окажется измеряемым добавочным прибором, и т. д.

При обычной интерпретации квантовой теории не делается никаких реальных попыток рассмотреть космологические вопросы. Измерение положения электрона трактуется как проекция мира либо на состояние с движущимся вправо электроном, либо на состояние с движущимся влево электроном, но не оба сразу. Состояние же прибора остается неопределенным.

Интерпретация Эверетта состоит в том, что при измерении Вселенная как бы делится на две: одна из них содержит электрон, движущийся вправо, а другая — электрон, движущийся влево. Каждый мир одинаково реален. Оба мира сосуществуют, но, по крайней мере на макроскопическом уровне, не взаимодействуют друг с другом. Мыслящий наблюдатель также расщепляется на две копии, и в каждом мире обитает одна из них.

Тогда каждый атом в каждой галактике непрерывно участвует в такого рода столкновениях с последующим рассеянием, а значит, мир то и дело расщепляется на громадное число сходных копий его самого. Следовательно, Вселенную можно уподобить развесистому дереву, причем соседние «ветви» мало отличаются друг от друга, вероятно различаясь только расположением нескольких отдельных атомов. Тем не менее среди бесконечного множества миров будут представлены все возможные физические вселенные.

Этот «квантоворожденный» ансамбль миров содержит все возможные начальные структуры вещества, энергии и движения. Можно было бы расширить это представление и допустить, что существуют также все возможные значения фундаментальных постоянных (хотя это не было частью исходной теории). Следовательно, считается реальным то, что прежде было исключительно умозрительной схемой для обсуждения вероятности наблюдаемой Вселенной. Согласно теории Эверетта, наблюдаемая Вселенная — это лишь один пример из бесконечного многообразия реально существующих вселенных.

Если принять предложенную Эвереттом интерпретацию квантовой теории, то отпадает необходимость в сильном антропном принципе. Чтобы объяснить все неоднократно обсуждавшиеся совпадения, достаточно слабого принципа, ибо среди громадного множества различных сосуществующих вселенных всегда (хотя и в очень небольшом количестве) будут и вселенные с надлежащими численными совпадениями и условиями. Только в таких вселенных может зародиться и развиваться жизнь. Только те вселенные, в которых удовлетворены численные соотношения, и являются познаваемыми. Не удивительно в таком случае, что мы познаем Вселенную со столь многочисленными особыми условиями, ибо мы выбрали ее из ансамбля миров самым фактом своего существования, так же как выбрали поверхность планеты среди огромного множества безжизненных областей Вселенной.

Согласно этой теории, столь необычные свойства наблюдаемой Вселенной теперь нужно рассматривать не как удивительные, а как неизбежные. Их кажущаяся невероятность является исключительно отражением их нетипичности. Подавляющее большинство вселенных не обладает условиями, подходящими для жизни. Только те редкие вселенные, которые обладают ими, наблюдаемы.

Теория Эверетта не единственно возможный путь придания реальности умозрительной схеме ансамбля вселенных. Уилер обсуждал концепцию последовательного ансамбля в осциллирующей Вселенной. Следует напомнить, что такая Вселенная расширяется из исходного сингулярного состояния до максимального объема, а затем коллапсирует вновь в сингулярное состояние. В такой сингулярности совершенно неприменимы известные нам законы физики. Исходя из этого, Уилер предполагает, что некоторый тип вселенной проходит через стадию сингулярности и появляется вновь после своего рода вторичной «переработки» с новыми значениями фундаментальных постоянных, новой структурой движения и, вероятно, новыми законами физики.

Таким образом, сколлапсировавшая Вселенная возрождается в новом цикле расширения и сжатия,

чтобы за ним последовал следующий и так далее *ad infinitum*. В каждом цикле структура Вселенной будет иной. Если циклы воспроизводятся произвольным образом, то чисто случайно в конце концов Вселенная приобретет нужную структуру и числовые совпадения и появятся различные наблюдаемые числовые зависимости. В одном из циклов появятся на свет космологи, которые напишут книги о необычайной тонкой подстройке, создавшей условия, подходящие для жизни.

Б. Колинз и С. Хокинг в рамках идеи ансамбля миров рассмотрели вопрос: почему Вселенная изотропна? В разд. 4.3 утверждалось, что в анизотропной Вселенной генерировались бы большие количества тепла, что привело бы к сильному давлению излучения и препятствовало бы образованию галактик. Ясно, что такие условия не благоприятствовали бы известной нам форме жизни. Колинз и Хокинг рассмотрели вопрос с другой точки зрения. Они показали, что по мере расширения Вселенной анизотропия в общем должна усиливаться. Однако если темп расширения строго согласуется с гравитацией так, что $k = 0$ (т. е. выполняется условие (4.14)), то изотропия сохранится. Они утверждают, что только во Вселенной, близкой к состоянию $k = 0$, могут образоваться галактики, способные существовать длительное время. Когда k много меньше нуля, расширение слишком сильно, чтобы происходило сгущивание под действием сил гравитации, а когда k много больше нуля, Вселенная довольно быстро коллапсирует. Колинз и Хокинг приходят к выводу, что только во Вселенной с $k \approx 0$ и, следовательно, способной оставаться изотропной в течение долгого времени, возникнет жизнь. Из ансамбля вселенных, в котором очень мало объектов с $k \approx 0$ и которые в высшей степени анизотропны, мы выбрали изотропную Вселенную, в которой существование галактик обеспечивает подходящие условия для существования жизни. На вопрос, почему Вселенная так изотропна, Колинз и Хокинг отвечают: «Потому, что существует человек».

Концепцию ансамбля миров можно критиковать по ряду причин, как философских, так и физических.

Может показаться сомнительным, что природа должна потворствовать такому расточительному повторению. Можно ли верить в бесчисленные вселенные, существующие, но никогда не наблюдавшиеся и не служащие никакой другой цели, кроме обеспечения вероятности того, что где-то среди безбрежного их множества изредка возникает познаваемый мир? Объяснить совпадения, обращаясь к бесконечности бесполезных вселенных, — это все равно что перевозить ненужный груз на большое расстояние. В то же время нужно согласиться и с тем, что альтернативы — вселенная, специально созданная для жизни, или вселенная, в которой особая структура рассматривается как чудо, — также философски спорны.

Антропный принцип, основанный на случайно упорядоченном ансамбле миров, также критиковался с физических и математических позиций. Эта проблема восходит к старой идее Л. Больцмана, что наблюдаемая высокая степень космической упорядоченности — результат невероятно редкой статистической флуктуации от значительно более вероятного состояния беспорядка, лишенного каких-либо характерных черт, и единственная причина того, что мы свидетели этого очень маловероятного явления, заключается в том, что наше существование связано с условиями, которые установились только благодаря этой замечательной флуктуации. Это ранняя формулировка слабого антропного принципа.

Флуктуация, о которой говорит Больцман, — это просто разновидность того вида флуктуаций, которые вызывают броуновское движение крошечных частиц, взвешенных в жидкости, но в космическом масштабе. В результате случайного упорядоченного действия большого числа атомов через невероятно большой промежуток времени из хаоса может самопроизвольно возникнуть порядок (подобно шимпанзе, которая после долгого брелканья на фортепьяно вдруг случайно исполнит сонату Бетховена!). Простой пример — сосуд, наполненный газом: если подождать достаточно долго, то чисто случайно все молекулы газа одновременно устремятся в один его конец. И хотя такое ожидание может оказаться невероятно долгим, все же

такая ситуация может осуществиться через бесконечное время.

Далее, существенная особенность самопроизвольного установления порядка посредством случайных флуктуаций состоит в том, что при этом малая степень упорядоченности более вероятна, чем большая. Гораздо более вероятно, что шимпанзе в своих опытах исполнит первый такт «чижика-пыжика», а не сонату. Это — еще одно доказательство того, что флуктуация, следствием которой будет появление, скажем, одной галактики, неизмеримо более вероятна, чем та, которая ведет к миллиардам их. Но и одной галактики достаточно для появления разумных наблюдателей. Так почему же, проникая все дальше в глубины Вселенной, мы открываем все новые галактики?

Критика концепции ансамбля миров может быть направлена и непосредственно против антропного принципа. Вероятно, гораздо больше таких вселенных, которые „точно настроены“ на образование единичной галактики, чем вселенных с многочисленными галактиками. Следовательно, на первый взгляд гораздо более вероятно, что «типичный» наблюдатель попадет во вселенную с единственной галактикой. Поэтому распространенность галактик в наблюдаемой Вселенной загадочна.

Это возражение, выдвинутое Р. Пенроузом против антропного принципа, пренебрегает всякой связью, которая может существовать между локальной и глобальной структурами. Не исключено, что есть связь между образованием галактик и крупномасштабной структурой Вселенной. Связь такого рода обеспечивается так называемым принципом Маха, который объясняет инерцию взаимодействием с далекими галактиками. Р. Дикке и Ф. Дж. Э. Пиблс, указывая, что Вселенная выглядит предназначенной для немногих разумных наблюдателей, замечают, что вселенную с одной галактикой можно отвергнуть, исходя из принципа Маха.

Исходя из гипотезы ансамбля миров совместно со слабым антропным принципом, можно подыскать разумные доводы, обосновывающие значения почти всех фундаментальных параметров, которые, как обсужда-

лось в гл. 2, в той или иной степени определяют структуру физического мира. Не исключено, что более глубокий анализ ограничит и другие свойства, такие, как размерность пространства-времени, числа кварков и лептонов, число типов фундаментальных взаимодействий и т. д.

Конечно, такие аргументы не подходят для точной физической теории. Например, трудно придумать, как использовать антропный принцип, чтобы дать проверяемый прогноз, так как любая физическая теория, которая противоречит существованию человека, очевидно, неверна в любом случае. Кроме того, не имея примеров внеземной жизни, мы располагаем только довольно общими доводами относительно физических предпосылок для биологии. Вероятно, жизнь может возникать в гораздо более широком диапазоне условий, чем считалось до сих пор.

Весьма возможно, что в будущем будут найдены объяснения некоторых из рассмотренных численных совпадений в рамках теоретической физики, а не биологии. Например, отношения «сил» фундаментальных взаимодействий, быть может, объяснит включение в теорию великого объединения теории гравитации. В этом случае таинственное число 10^{40} будет выведено математически. Подобного рода объяснения, возможно, будут найдены для однородности и изотропии Вселенной. Происходившие в недостаточно изученной очень ранней Вселенной и до сих пор еще неизвестные процессы могли бы привести к необычной симметрии Вселенной, которая иначе необъяснима.

Возможно, благодаря будущим успехам фундаментальной физики в объяснении кажущегося случайным строения Вселенной антропный принцип утратит всякое значение для объяснения мира. Однако не менее замечательно, если окажется, что законы фундаментальной физики благоприятствуют жизни. Независимо от того, могут ли законы природы привести к совпадениям больших чисел или нет, тот факт, что эти совпадения необходимы для существования человека, несомненно, одно из самых красивых открытий современной науки.

К главе 1

В книге

Davies P. C. W. The Forces of Nature, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1979

дается введение в квантовую теорию, квантовые поля и современную физику элементарных частиц на уровне, примерно соответствующем этой книге.

В качестве введения в современную космологию (с особым акцентом на ранние стадии Вселенной) рекомендуем монографии:

Weinberg S. The First Three Minutes, Basic Books, New York, 1977, (Имеется перевод: С. Вайнберг. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. — М.: Энергоиздат, 1981)

или

Davies P. C. W. The Runaway Universe, London, J. M. Dent, New York: Harper and Row, 1978.

Более подготовленному читателю рекомендуем:

Berry M. Principles of Cosmology and Gravitation, Cambridge: Cambridge Univ. Press., 1976.

Sciama D. W. Modern Cosmology, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1971. (Имеется перевод: Д. Шама. Современная космология. — М.: Мир, 1973,)

Хорошим и всеобъемлющим введением в астрофизику и космологию является сборник:

The State of the Universe, ed. G. T. Bath, Oxford: Clarendon Press, 1980.

В частности, статья Риса, посвященная образованию галактик, статья Тейлера, посвященная образованию химических элементов в начальной стадии расширения горячей Вселенной и в недрах звезд, и статья Шамы, в которой излагаются основы космологии, особенно подходят к теме этой книги.

К главе 2

Эта глава основана на превосходном обзоре Карра и Риса «Антропный принцип и структура физического мира»

Carr B. J., Rees M. J. Nature, 278, 605, 1979,
в котором можно найти дальнейшие ссылки.

Проблема «постоянства постоянных», исследована Дайсоном:

Dyson F. In Aspects of Quantum Theory, eds. A. Salam E. P. Wigner, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1972;

см. также обсуждения в гл. 38 книги:

Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A. Gravitation, San Francisco: Freeman, 1973. (Имеется перевод: Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. А. Уилер. Гравитация. — М.: Мир, 1976.)

К главе 3

Подробное описание термодинамических свойств космологического вещества на ранних стадиях эволюции Вселенной, особенно вопросы разведения нейтрино и нуклеосинтеза, дается в книге:

Weinberg S. Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity, New York: Wiley, 1972. (Имеется перевод: С. Вейнберг. Гравитация и космология. — М.: Мир, 1976.)

Рассмотрение проведено на довольно высоком уровне; элементарное и более доступное описание читатель может найти в книге:

Rees M. J., Ruffini R., Wheeler J. A. Black Holes, Gravitational Waves and Cosmology, New York: Gordon and Breach, 1974. (Имеется перевод: М. Рис, Р. Руффини, Дж. А. Уилер. Черные дыры, гравитационные волны и космология: Введение в современные исследования. — М.: Мир, 1977.)

и в монографии:

Sciama D. W. Modern Cosmology, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1971. (Имеется перевод: Д. Шама, Современная космология. — М.: Мир, 1973.)

Замечания Фримена Дайсона по поводу дипротона см. в статье: *Dyson F.* Scientific American, **225**, 25, September, 1971.

Обсуждаемый в разд. 3.3 анализ Б. Картера внутреннего строения звезд резюмируется в его статье:

Carter B. In Confrontation of Cosmological Theories with Observation, ed. M. S. Longair, Dordrecht: Reidel, 1974.

Изложенный в разд. 3.4 анализ строения галактик основан на работе:

Silk J. Nature, **265**, 710, 1977.

К главе 4

Обширная литература посвящена знаменитым совпадениям больших чисел. По-видимому, первые работы следующие:

Eddington A. S. Proc. Cam. Phil. Soc., **27**, 15, 1931;

Eddington A. S. Relativity Theory of Protons and Electrons, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1936;

Dirac P. A. M. Nature, **139**, 323, 1937;

Dirac P. A. M. Proc. Roy. Soc., **165A**, 199, 1938.

Последующее развитие нашло отражение в работах:

Jordan P. Schwerkraft und Weltall, Braunschweig: Vieweg und Sohn, 1955;

Dicke R. H. The Theoretical Significance of Experimental Relativity, New York: Gordon and Breach, 1964;

Hayakawa S. "Atomism and Cosmology", Progr. Theor. Phys. Suppl., Yukawa 30th anniversary issue, 532, 1965;

Carter B. Large Numbers in Astrophysics and Cosmology, Cambridge Preprint, Institute of Theoretical Astronomy, 1968.

См. также гл. 18 («Большие числа»: совпадение или следствие?) в монографии:

Rees M. J., Ruffini R., Wheeler J. A. Black Holes, Gravitational Waves and Cosmology, New York: Gordon and Breach, 1974. (Имеется перевод: М. Рис, Р. Руффини, Дж. Уилер, Черные дыры, гравитационные волны и космология: Введение в современные исследования. — М.: Мир, 1977.)

Обзор вопросов объединения фундаментальных взаимодействий и возможности распада протона см. в

Weinberg S. Scientific American, **224**, 52, June 1981.

О соотношении (4.12) и его связи с принципом Маха см.

Sciama D. W. The Unity of the Universe, New York: Anchor, 1961.

Хорошее элементарное рассмотрение вопросов космической динамики приводится в классической книге

Bondy H. Cosmology, Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2nd ed., 1966

и в монографии

Berry M. Principles of Cosmology and Gravitation, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1976.

Несколько сложнее книга

Rindler W. Essential Relativity, New York: Springer-Verlag, 1977.

Но в ней четко обсуждается горизонт событий, а также рассматривается вопрос о космологической постоянной. Монография

Peebles P. J. E. The Large Scale Structure of the Universe, Princeton: Princeton Univ. Press, 1980 (Имеется перевод: Ф. Дж. Э. Пиблс. Структура Вселенной в больших масштабах. — М.: Мир, 1983.), в которой также рассматривается образование галактик и анизотропия, является хорошей современной книгой.

Обсуждающийся в разд. 4.2 вопрос о тонкой подстройке ρ и ρ_{cr} иногда называется проблемой кривизны, а отсутствие причинной связи между далекими галактиками называется «проблемой горизонта». Обе проблемы глубоко анализируются (и предлагаются возможные решения) в статье

Guth A. Phys. Rev., **D23**, 347, 1981.

Эти вопросы также рассматриваются в

Dicke R. H., Peebles P. J. E. The Big Bang Cosmology Enigmas and Nostrums, In General Relativity: an Einstein Centenary Survey, eds. S. W. Hawking, W. Israel, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1979.

Вопрос о диссипации первичной турбулентности подробно излагается в статье

Barrow J. D., Matzner R. A. Mon Not. Roy. Astron. Soc., **181**, 719, 1977.

Имеется много теорий происхождения энтропии на один барион. В разд. 4.4 реферировалась работа

Rees M. J. Nature, **275**, 35, 1978.

Изучение S с точки зрения несохранения барионов в духе антропного принципа проведено в статье

Nanopoulos D. V. Physics Lett., **91B**, 67, 1980.

В этой статье также даны ссылки на первоначальные вычисления, в которых получены приводимые значения *S*.

Три важные статьи посвящены космологической постоянной и ее связи с квантовыми эффектами вакуума:

Kirzhnits D. A., Linde A. D. Ann. Phys. (N. Y.), **101**, 195, 1976;

Canuto V., Lee J. F. Physics Lett., **72B**, 281, 1977;

Coleman S., De Luccia, Phys. Rev., **D21**, 3305, 1980.

К главе 5

Хотя термин «антропный принцип» не нов, впервые в современном контексте он использован Картером. В его статье

Carter B. In Confrontation of Cosmological Theories with Observation, ed. M. S. Longair, Dordrecht: Reidel, 1974

впервые ясно различаются слабый и сильный принципы и устанавливается их связь с астрофизическими процессами.

Наиболее полное обсуждение вопроса, включающее обширные исторические материалы, содержится в книге:

Barrow J. D., Tipler F. J. The Anthropic Principle, Oxford: Oxford Univ. Press, 1982.

Философские аспекты изучались Лесли в его статье

Leslie J. Anthropic Principle, World Ensemble and Design, Amer. Phil. Quart.

Объяснение Р. Дикке одного из совпадений больших чисел, приведенное в разд. 5.2, опубликовано в короткой статье

Dicke R. Nature, **192**, 440, 1961.

Обзор многих ранних работ вместе с новыми идеями дан в статье *Carr B. J., Rees M. J.* Nature, **278**, 605, 1979.

Другой разнообразный обзор представлен в

Розенталь И. Л. Успехи физ. наук, **131**, вып. 2, 239, 1980.

Анализ Дайсона перспектив выживания для разумных существ в сильно проэволюционировавшей Вселенной дается в статье

Dyson F. Rev. Mod. Phys., **51**, 447, 1979.

На решающее значение ядерных резонансов для синтеза углерода в звездах указал Ф. Хойл в статье:

Hoyle F. Astrophys. J. Suppl., **1**, 121, 1954.

См. также

Hoyle F. Galaxies, Nuclei and Quasar, New York: Harper and Row, 1964. (Имеется перевод: Ф. Хойл, Галактики, ядра и квазары. — М.: Мир, 1968.)

Цитата в конце разд. 5.3 заимствована из неопубликованного препринта

Hoyle F. Universe: Some Past and Present Reflections, The Univ. of Cardiff preprint.

Возможная зависимость Λ от координат обсуждалась в статье *Davies P. C. W., Unwin S.* Proc. Roy. Soc., **A377**, 147, 1981.

Другая модель неоднородной Вселенной рассмотрена в статье *Ellis G. F. R.* Gen. Relativ. Gravit., **9**, 87, 1978.

Концепция Уилера циклически перерабатываемой Вселенной описана в гл. 44 монографии

Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A. Gravitation San Francisco:

Freeman, 1973. (Имеется перевод: Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. А. Уилер. Гравитация. — М.: Мир, 1977.)

Центральная роль наблюдателя объясняется в рамках квантовой теории в его статье в

Some Strangeness in the Proportion: A Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein, ed. H. Woolf, Mass: Addison-Wesley, Reading, 1980.

Интерпретация квантовой механики с помощью концепции ансамбля вселенных берет начало с работы

Everett H. Rev. Mod. Phys., **29**, 454. 1957.

Она интенсивно развивалась:

De Witt B. S. Graham N. In the Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics, Princeton: Princeton Univ. Press, 1973,

Объяснение изотропии Вселенной с помощью антропного принципа можно найти в статье

Collins C. B., Hawking S. W. Astrophys. J., **180**, 317, 1973.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора перевода	5
Предисловие	10
Система единиц и обозначения	13
Глава 1. Основные компоненты природы	15
1.1. Системы разных характерных размеров	15
1.2. Основные типы взаимодействий	23
1.3. Квантовая теория и теория относительности	28
1.4. Строение ядра: «перепись» фундаментальных частиц	36
1.5. Краткая история Вселенной	41
Глава 2. Характерные размеры структурных единиц Вселенной	52
2.1. Роль фундаментальных постоянных в физической теории	53
2.2. Микромир	57
2.3. Макроструктуры	61
2.4. Строение наблюдаемой Вселенной	73
Глава 3. Тонкая подстройка Вселенной	78
3.1. Нейтрино	78
3.2. Ядра	86
3.3. Звезды	90
3.4. Галактики	92
Глава 4. Космические совпадения	96
4.1. Большие числа	96
4.2. Космическая динамика	102
4.3. Согласование без обмена информацией	114
4.4. Энтропия Вселенной	118
4.5. Космическое отталкивание	127
Глава 5. Антропный принцип	132
5.1. Биологические предпосылки	133
5.2. Объяснение совпадений больших чисел	135
5.3. Слабый и сильный антропный принцип	141
5.4. Теория множественности вселенных	146
Литература	155

Разнообразие и сложность физических систем, из которых состоит наблюдаемая Вселенная, столь поразительны, что задача открытия простых законов, способных описать все эти системы, кажется безнадежной. Примечательно все же, что фундаментальные законы, управляющие столь несходными объектами, как атомы и звезды, достаточно хорошо поняты, чтобы большинство наиболее распространенных систем можно было описать единым образом.

Большинство явлений, описанных в этой книге, обусловлены универсальностью физических законов. Читатель узнает, что если детальные свойства физических систем можно установить только путем сложного анализа, то их общие свойства определяются преимущественно из нескольких элементарных соображений. И эти соображения открывают Вселенную, полную неожиданностей.

