

И. Л. РОЗЕНТАЛЬ

**ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ  
ЧАСТИЦЫ  
И СТРУКТУРА  
ВСЕЛЕННОЙ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА ·

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
Серия «Планета Земля и Вселенная»

И. Л. РОЗЕНТАЛЬ

# ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ

Ответственный редактор  
доктор физико-математических наук  
М. И. ПОДГОРЕЦКИЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1984

Р 64 Розенталь И. Л. **Элементарные частицы и структура Вселенной.** — М.: Наука, 1984. — (Планета Земля и Вселенная). — 112 с.

В книге рассматриваются достижения физики элементарных частиц и космологии. Две главы посвящены роли симметрии в физике элементарных частиц и фридмановской космологии. В третьей главе излагаются новые проблемы — проблемы связи структуры Вселенной и фундаментальных постоянных. Демонстрируется неустойчивость структуры Вселенной относительно численного значения фундаментальных постоянных и приводятся возможные интерпретации этого факта.

Книга рассчитана на читателей, знакомых с курсом физики в объеме втуза, а также на всех интересующихся проблемами физики макро- и микромира.

Ил. 12. Табл. 8. Библиогр. 11 назв.

17.5.7

Рецензенты:

доктор физико-математических наук

А. Д. ЛИНДЕ,

доктор физико-математических наук

В. В. УСОВ



Scan AAW

**Иосиф Леонидович Розенталь**

**ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ**

Утверждено к печати редколлегией

серии научно-популярных изданий Академии наук СССР

Редактор В. Х. Козловский. Редактор издательства Э. С. Павлинова

Художник С. Б. Воробьев

Художественный редактор Н. А. Фильчагина

Технический редактор Н. П. Переверза.

Корректоры М. В. Борткова, Н. Г. Васильева

ИБ № 27955

Сдано в набор 20.02.84 Подписано к печати 29.06.84.

Т-09682. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 1.

Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 5,88.

Уч.-изд. л. 6,5. Усл. кр.-отт. 6,2. Тираж 14 400 экз. Тип. зак. 13

Цена 40 коп.

Издательство «Наука»

117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90

2-я типография издательства «Наука»

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

Р 170507(00-364  
042(02)-84

Издательство «Наука», 1984 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В предисловии обычно автор освещает цель книги и рисует образ «идеального» читателя, для которого она написана. Первая задача — сформулировать основную идею книги — проще. Вторая затрагивает личность читателя, и любые характеристики не могут гарантировать автора от обвинения в снобизме, недооценке читателей или иных подобных грехах.

Естественно начать с первой задачи. В последние два десятилетия наметился необычайный, хотя и несколько неожиданный прогресс в объединительных тенденциях фундаментальных физических теорий. В этот же период почти вырисовалась сравнительно стройная картина ранних этапов эволюции Вселенной, начиная с времени  $\sim 1$  с, отсчитываемого от начала расширения.

Эти вопросы порознь неоднократно освещались на самых различных уровнях. Систематическое их изложение стало достоянием монографий, иногда весьма солидных, со множеством формул, сквозь чащу которых неспециалисту пробиться невозможно.

Более новым, мало затронутым в научно-популярной литературе предметом являются результаты, полученные в более общем направлении, — в области синтеза микро- и макрокосма. В этом процессе проявляются общие черты физики элементарных частиц и космологии. Неожиданным результатом этого симбиоза стали наметившиеся надежды на понимание природы фундаментальных физических постоянных, проблемы, которая до последнего времени казалась совершенно неразрешимой. Эти надежды обусловлены следствием наметившегося синтеза космологии и физики элементарных частиц. Структура Вселенной неустойчива относительно численного значения фундаментальных постоянных в следующем смысле: небольшое изменение их значений приводит к кардинальному, качественному изменению структуры Вселенной.

В соответствии с общими тенденциями фундаментальной физики книга состоит из трех частей. В первых двух главах освещены объединительные тенденции в физике элементарных частиц и прогресс космологии. Третья глава посвящена синтезу физики элементарных частиц и космологии. Разумеется, излагаются не все элементы этого синтеза. Многие из них носят слишком гипотетический характер; другие (например, проблема физического вакуума) находятся вне сферы интересов автора.

Наконец, наступило время коснуться второй, более щекотливой задачи — нарисовать образ «идеального» читателя этой книги. Автор, не являющийся профессиональным популяризатором, для решения этой задачи пошел по самому проторенному пути — по пути знакомства с признанными образцами. К таковым следует причислить недавно вышедшую книгу известного физика и популяризатора, лауреата Нобелевской премии С. Вайнберга «Первые три минуты» (М.: Энергоиздат, 1981). С. Вайнберг отмечает в предисловии: «Я писал для читателя, который хочет разобраться в ряде подробно изложенных доводов, но который при этом плохо знаком с математикой или физикой. Хотя мне пришлось объяснить несколько довольно сложных научных идей, в основном тексте книги не используется математика, кроме арифметики, и почти не предполагается знание читателем физики или астрономии».

Книга «Первые три минуты» построена следующим образом. В основном тексте отсутствуют математические формулы, которые вынесены в Дополнение. В Приложении приводится словарь терминов. В частности, поясняется, что такое нейтрон, протон и электрон. После знакомства с построением этой книги мне стало ясно, что избранную мной тему так излагать нельзя. Подобное негативное заключение — одно из впечатлений, возникших от чтения весьма увлекательной книги С. Вайнберга. Использованное им построение книги, возможно, приемлемо для отображения отдельной конкретной темы — раннего этапа эволюции Вселенной. Однако форма книги С. Вайнберга совершенно неприемлема для более широкой темы синтеза модернистских течений физики и космологии, охватывающей научный прогресс физики последних десятилетий и намечающей определенные его перспективы.

Приведем другой пример, поясняющий авторскую позицию. Можно объяснить вдумчивому читателю, не знающему, что такое протон, его распад, но представляется

невозможным продемонстрировать впечатляющее значение этого явления для прогресса фундаментальной физики. В такой ситуации доказательство этого тезиса подменяется звучными определениями («эксперимент века», «эксперимент тысячелетия» и т. д.).

Автор не склонен использовать подобный путь, ибо на этом пути сквозит недооценка читателя и ограниченность цели: устранить фон, на котором вырисовывается отдельный конкретный факт.

Кажется неоправданным и введение терминологического словаря. Автор убежден, что, если бы нашелся чужак, не знакомый с Шекспиром и английским языком, но пожелавший прочитать «Гамлета» в подлиннике с помощью словаря, он решительно не согласился бы с высочайшей оценкой этого произведения. Для такого человека «Гамлет» превратился бы в заурядную пьесу о неудачном дворцовом перевороте. Все усилия читателя свелись бы к пониманию сюжета, и едва ли он прочувствовал бы титаническую борьбу Гамлета с роком и самим собой, борьбу, обреченную на трагическую развязку, или действие, облеченное в совершенную литературную форму. Монолог «to be, or not to be» нужно читать человеку, знающему английский язык в совершенстве. Однако, если читатель и не обладает подобным достоинством, у него есть простой выход: прочитать «Быть или не быть» в превосходных переводах.

К сожалению, для понимания увлекательнейших, но весьма глубоких современных физических идей такой путь недоступен. Нельзя без значительного ущерба устранить математику ее «переводом» на простую разговорную речь. Математика давно из послушного орудия в руках физиков превратилась в определенную форму мышления.

Вспоминается эпизод, который произошел около ста лет назад. Дж. В. Гиббс — один из основоположников статистической физики — был членом ученого совета Йельского университета. Гиббс обычно не участвовал в прениях. Но однажды возник ожесточенный спор: что важнее — преподавание языков или математика? Потребовали от Гиббса высказаться по этому вопросу. Гиббс сказал: «Математика — это язык». Время подтвердило необычайную актуальность этого афоризма.

Учитывая эти соображения, автор полагает, что единственное средство избежать профанации темы книги — это разделить с читателем бремя ответственности. Пред-

полагается, что будущий читатель этой книги прослушал курсы физики и математики в объеме технических вузов, физико-математических факультетов педвузов или университетов и ему не следует объяснять законы Ньютона или что такое протон и электрон.

В заключение подчеркнем, что ограниченное использование математики не позволяет доказать все положения, приведенные в книге, достаточно строго. Некоторые утверждения читателю придется принять на веру.

Разумеется, автор не рассчитывает, что изложение затронутых в книге вопросов безукоризненно. Он будет весьма благодарен читателям, сообщившим свои замечания или пожелания.

## Глава I

### ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

#### 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Твердо установлено существование четырех фундаментальных взаимодействий. Наиболее хорошо изучены два из них: гравитационное и электромагнитное. Основы классических (неквантовых) теорий обоих взаимодействий заложены давно (Ньютон, Эйнштейн и Максвелл) и известны в общих чертах из школьной физики.

*Гравитационное* взаимодействие, управляющее движением небесных тел и силой тяжести на Земле, характеризуется константой Ньютона  $G = 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ г}^{-1} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-2}$ . Прекрасное приближение, описывающее гравитационное взаимодействие двух точечных тел с одинаковыми массами  $m$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга, — формула Ньютона

$$F = Gm^2/r^2.$$

*Электромагнитное* взаимодействие определяет движение заряженных тел. В общем случае их закон движения описывается уравнениями Максвелла — Лорентца, однако в квазистатическом приближении превосходно «работает» аналог закона Ньютона — кулоновское приближение

$$F = e^2/r^2$$

( $e$  — заряд каждого из двух точечных тел). Величины  $Gm^2$  и  $e^2$  зависят от выбора единиц измерений, и это препятствует анализу общности обоих взаимодействий. Чтобы облегчить сравнение и решение задач в рамках квантовой теории поля, из этих величин с помощью универсальных констант — постоянной Планка  $\hbar$  и скорости света  $c$  образуются безразмерные постоянные. Таким образом, безразмерны гравитационная постоянная  $\alpha_g = Gm^2/\hbar c$ , электромагнитная константа  $\alpha_e = e^2/\hbar c$ , где  $e \cong 10^{-19}$  Кл — заряд электрона (протона).



Отметим различие между определением обеих постоянных. В некотором смысле константа  $\alpha_e$  более универсальна, чем  $\alpha_g$ . В определение числа  $\alpha_e$  входят только фундаментальные постоянные; константа  $\alpha_g$  характеризуется, вообще говоря, произвольной массой  $m$ . Чтобы устранить подобный произвол, в константе  $\alpha_g$  обычно фиксируют значение массы  $m$ , полагая ее равной  $m_p$  (масса протона). Этот выбор вполне естествен: протон — одна из двух устойчивых частиц, составляющих все тела во Вселенной. Другая стабильная частица — электрон с массой  $m_e$ . Выбор между  $m_p$  и  $m_e$  в значительной степени условен. В тех редких случаях, когда он приобретает определенный физический смысл, мы отметим это различие.

Перейдем к описанию свойств двух других взаимодействий, обнаруженных лишь в XX столетии. Одно из них — *слабое* — управляет распадом более тяжелых частиц на более легкие. Исторически первым был обнаружен распад нейтрона в атомных ядрах ( $\beta$ -распад), который происходит по схеме

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (1)$$

( $n$ ,  $p$ ,  $e^-$ ,  $\bar{\nu}$  — нейтрон, протон, электрон и антинейтрино).

Впоследствии выяснилось, что распад нейтрона не уникален. Одну за другой открывали новые элементарные частицы. Этот процесс особенно интенсифицировался в результате прогресса ускорительной техники. Выяснилось, что все вновь открытые частицы обладают одним общим свойством: тяжелые частицы распадаются на более легкие. В результате многочисленных исследований выяснилось, что многие распады управляются единым, так называемым слабым взаимодействием, которое характеризуется константой Ферми  $g_F \cong 10^{-49}$  эрг·см<sup>3</sup>. Безразмерная константа слабого взаимодействия  $\alpha_w = g_F m^2 c / \hbar^3$ . Слабое взаимодействие также определяет процессы столкновения нейтрино с веществом.

Наименее ясна ситуация с *сильным* взаимодействием. Еще 10—15 лет назад сильное взаимодействие отождествляли с ядерным, определяющим состояние протонов и нейтронов в атомных ядрах. Однако создать сколько-нибудь законченную теорию ядерного взаимодействия не удалось. В настоящее время утвердился феноменологический уровень, когда взаимодействие протонов и нейтронов описывается с помощью потенциалов, форма которых

подгоняется для оптимального описания экспериментальных данных.

Просвет, казалось, наступил в связи с прогрессом динамической теории кварковых систем, который привел к созданию квантовой хромодинамики. В этой схеме ядерное взаимодействие отождествлялось с взаимодействием многокварковых систем. Однако возникшие в начале 70-х годов надежды на построение замкнутой теории ядерного взаимодействия на основе кварковой модели пока не сбылись.

Полезно и поучительно проследить эволюцию кварковой интерпретации ядерного взаимодействия. Для этого следует сделать отступление, чтобы кратко напомнить модель кварков, введенную Геллманом и Цвейгом в 1964 г. В соответствии с этой моделью протоны и нейтроны состоят (каждый) из трех точечных частиц — *кварков*, обладающих дробными (сравнительно с зарядом  $e$  электрона), зарядами  $\pm 1/3e$ ,  $\pm 2/3e$ . Этот теоретический вывод, казалось, находился в противоречии со всей совокупностью экспериментальных данных, согласно которым все наблюдаемые элементарные частицы обладают целочисленными электрическими зарядами. Тем не менее многочисленные подтверждения гипотезы кварков на опыте (систематика частиц, величины магнитных моментов, отношения сечений взаимодействий и т. д.) вынудили отнестись к ней достаточно серьезно.

Но тогда возник следующий глубокий вопрос: как примирить факт существования кварков с другим фактом: их непосредственной ненаблюдаемостью? Нужно отчетливо понимать, что эта проблема (так называемая проблема невылетания кварков) не имеет сейчас строгого решения. Пока формулируется постулат, имеющий, скорее, характер заклинания: «Кварки существуют, но в связанном состоянии». Правда, если решение проблемы невылетания и отсутствует, то все же существуют и некоторые надежды, связанные с созданием математической модели, которая претендует на роль теории взаимодействия между кварками. Это взаимодействие и отождествляется с сильным взаимодействием, которое в конечном счете и обуславливает ядерное взаимодействие (см. ниже).

Здесь необходимо сделать одно отступление. В 1954 г. Янг и Миллс создали теорию, существенно отличную от электродинамики, но соответствующую взаимодействию, обусловленному переносом частиц с нулевой массой. Однако в те времена знали лишь одну такую частицу — *фо-*

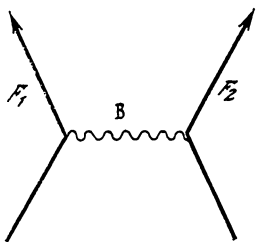


Рис. 1. Схема взаимодействия между частицами  $F_1$  и  $F_2$

Взаимодействие осуществляется путем переноса частицы В. Она переносит энергию, импульс и массу, а также внутренние квантовые числа

тон. Фотон — частица, определяющая электродинамику (более подробно см. разд. 4 наст. гл.). Поэтому теорию Янга — Миллса сочли лишь математической экзотикой.

Картина радикально изменилась, когда потребовалась теория, описывающая динамику кварков. Безмассовые частицы, введенные Янгом и Миллсом, естественно было считать ответственными за взаимодействие кварков. Эти частицы были названы *глюонами*, а один из вариантов теории Янга — Миллса, описывающих само взаимодействие, — *квантовой хромодинамикой* (по аналогии с квантовой электродинамикой). Когда (начало 70-х годов) созрела эта идея, уравнения Янга — Миллса начали исследовать более детально. При этом выяснилось (в противоположность квантовой электродинамике) весьма примечательное поведение константы  $\alpha_s$ , определяющей взаимодействие между кварками, которое по современным воззрениям и является истинным сильным взаимодействием.

Напомним (рис. 1), что с точки зрения современной теории поля взаимодействие переносится частицами — *квантами* соответствующего поля.

Естественно, что вместе с квантом переносится энергия-импульс, а следовательно (в соответствии со специальной теорией относительности), и масса. В результате сложных расчетов выяснилось, что константа  $\alpha_s$  сильного взаимодействия существенно зависит от переданной энергии-импульса или массы  $m$ .

В известном смысле с зависимостью констант  $\alpha$  от массы мы встречались и ранее (постоянные  $\alpha_g$ ,  $\alpha_w$ ), однако в данном случае (квантовая хромодинамика) есть существенное различие. В этой теории зависимость  $\alpha_s(m)$  выводится из квантовой теории поля, а не постулируется, как это было сделано ранее для констант  $\alpha_g$ ,  $\alpha_w$  на основе соображений размерности. Кроме того, изменение константы  $\alpha_s$  с массой  $m$  обладает характерной особенностью: константа  $\alpha_s$  уменьшается при увеличении  $m$ .

Здесь уместно сделать одну оговорку. Мы неоднократно употребляем терминологию, которая внешне кажется противоречивой. С одной стороны, говорим о постоянных  $\alpha$ , с другой — неизменно подчеркиваем их зависимость от  $m$ . В действительности константы  $\alpha$  — постоянные лишь при заданном  $m$ ; при изменении  $m$  меняются и постоянные  $\alpha$ . Поэтому их называют «бегущими» константами. С этой оговоркой следует привести окончательное выражение для зависимости  $\alpha_s$  от  $m$ . В асимптотическом приближении, когда  $m \gg m_p$ ,

$$\alpha_s \sim \frac{a}{\ln \frac{m}{m_p}}. \quad (2)$$

Величина  $a$  зависит от числа  $N_q$  сортов кварков, и для стандартной теории ( $N_q = 6$ )  $a \sim 1$ . Из этой формулы следует, что при  $m \rightarrow \infty$   $\alpha_s \rightarrow 0$ . Это и есть знаменитое явление асимптотической свободы. В противоположном случае, когда  $m \sim m_p$ ,  $\alpha_s \rightarrow \infty$ . Аналогичная зависимость получается и в более точном выражении. К сожалению, и оно получено методами, которые становятся некорректными, когда  $m \leq m_p$ . «Истинное» выражение для  $\alpha_s$  при малых  $m$  отсутствует именно потому, что  $\alpha_s$  велика, и стандартные методы вычислений становятся непригодными. Можно лишь утверждать: при малых характеристических массах  $m$ , что соответствует размерам протона (нейтрона)  $r_N \sim 10^{-13}$  см, константа велика. Это обстоятельство и есть источник надежд на решение проблемы невылетаия кварков. Поскольку  $r \sim \hbar/mc$ , то, как усматриваем из (2), величина  $\alpha_s$  при возрастании расстояния между кварками возрастает, и притом настолько, что их взаимодействие препятствует их разлету. К сожалению, иногда от надежд до их осуществления дистанция весьма значительная. И в данном случае: трудная и важная проблема невылетаия кварков еще окончательно не решена.

С другой стороны, быстрое увеличение постоянной  $\alpha_s$  по мере приближения  $r$  к размерам  $r_N$  препятствует и продвижению решения другой проблемы — проблемы ядерных сил. По существу, успехи в развитии квантовой хромодинамики практически не сказались на прогрессе в понимании природы ядерных сил. При расчетах используют феноменологические потенциалы, с помощью которых интерпретируют экспериментальные данные. Например, для описания взаимодействия между двумя протонами (нейтронами) или протоном и нейтроном используется потен-

циал, который в несколько упрощенной форме имеет вид

$$V = \alpha_s m_\pi c^2 \exp(-r/r_N), \quad (3)$$

где  $m_\pi$  — масса пиона,  $\alpha_s \sim 1$ .

## 2. КВАНТОВЫЕ ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

### Спин

Совокупность внутренних квантовых чисел элементарной частицы полностью ее определяет. Термин «внутренние» оттеняет принадлежность квантовых чисел собственно частице; эти квантовые числа не связаны со свойствами однородности времени и однородности и изотропности пространства, которые предопределяют привычные сохраняющиеся величины: энергию, импульс и момент количества движения. Наиболее известными (привычными) характеристиками элементарных частиц являются их масса и электрический заряд. Эти величины пришли в физику элементарных частиц из классической физики, и их появление не было связано с развитием квантовой механики.

Принципиально новым было появление специфически квантовых чисел. Здесь в первую очередь следует назвать *спин* частиц<sup>1</sup>. Первоначально спин вошел в физику как собственный момент количества движения  $M_e$  электрона со значением:  $M_e = \hbar/2$ . Однако такая трактовка спина встречает решительные возражения. Дело в том, что по современным представлениям размеры элементарных частиц, не имеющих внутренней структуры (а электрон относится именно к разряду таких частиц), равны нулю. Но момент  $M_e = [\mathbf{r}_e \mathbf{p}_e]$  ( $\mathbf{p}_e$  — импульс частицы). Поскольку  $\mathbf{r}_e = 0$ , то и момент  $M_e = 0$  и, следовательно, не равен  $\hbar/2$ . Поэтому отождествление спина с образом вращающегося в пространстве электрона хотя и весьма наглядно, все же неправомерно.

Более последовательной представляется трактовка спина в рамках квантовомеханических представлений с учетом того, что спиновое состояние системы (в данном случае электрона) определяется вектором в некотором пространстве. Тогда длина (норма) вектора задается так, чтобы его проекция на одну из осей равнялась  $\pm \hbar/2$ . Спиновое

<sup>1</sup> В этом разделе мы ограничимся определениями квантовых чисел, наиболее существенных для темы книги.

<sup>2</sup> Отметим, что, хотя спины элементарных частиц могут отличаться от значения  $\hbar/2$ , они всегда кратны этой величине.

состояние электрона определяется вероятностью того, что проекция спина имеет определенный знак. Все же следует отметить разницу между обычными векторами и вектором, характеризующим спин. Для этого вектора определено лишь вращение вокруг заданного начала, в то время как обычный вектор может перемещаться также в пространстве.

Весьма популярно теоретико-групповое определение спина<sup>3</sup>. Спин — неприводимое представление группы вращения  $SU(2)$ <sup>4</sup>. К сожалению, к этому определению можно отнести известную остроту героя Отечественной войны 1812 г. генерала А. П. Ермолова: «В этой фразе русские слова звучат, как иностранные». Знакомым с теорией групп это определение покажется тривиальным; для незнакомых оно непонятно.

Более важно другое: спин — величина, имеющая размерность момента количества движения, и может складываться с ним по стандартным квантовомеханическим правилам.

Далее следует перейти к другим квантовым числам, никак не связанным с привычным физическим пространством.

### Изотопический спин

В 1932 г. Гейзенберг обратил внимание на удивительную близость масс протона ( $m_p$ ) и нейтрона ( $m_n$ ):  $m_p = 938,3$  МэВ, а  $m_n = 939,6$  МэВ<sup>5</sup>. В этой связи Гейзенберг выдвинул в 1932 г. идею, которая по своей значимости (по крайней мере в области элементарных частиц) едва ли уступает сформулированному им принципу неопределенности. Гейзенберг предположил, что протон и нейтрон — различные состояния одной и той же частицы, названной им нуклоном. Наблюдаемое различие между

<sup>3</sup> К сожалению, тема книги слишком далека от теории групп. Поэтому мы вынуждены ограничиться лишь некоторыми ссылками. Первое знакомство с этой теорией дает книга: *Александров П. С. Введение в теорию групп.* — М.: Наука, 1980. Приложение теории групп к элементарным частицам хорошо изложено в книге: *Берестецкий В. Б. Проблемы физики элементарных частиц.* — М.: Наука, 1979.

<sup>4</sup>  $SU$  — аббревиатура термина «специальная унитарная».

<sup>5</sup> Здесь и в дальнейшем массы элементарных частиц даны в энергетических единицах. Напомним, что  $1 \text{ МэВ} \sim 10^{-6} \text{ эрг}$  и соответствует приблизительно массе  $2 \cdot 10^{-27} \text{ г}$ . Масса пиона  $m_\pi$  в этих единицах  $m_\pi \sim 140 \text{ МэВ}$ .

протонным и нейтронным состояниями нуклона, с точки зрения Гейзенберга, сводится к разнице значений электрического заряда ( $e_p = e$ ,  $e_n = 0$ ), которая и обуславливает небольшое различие в массах  $m_p$  и  $m_n$ . Если бы Гейзенберг удовлетворился констатацией этого факта, то она не оставила бы никакого следа в физике. Однако Гейзенберг сформулировал квантовую интерпретацию этого явления, которая, разумеется существенно расширенная, и лежит в основе теории элементарных частиц.

Эта концепция базируется на следующей идее: различие в состояниях протона и нейтрона характеризуется новым внутренним квантовым числом, названным им *изотопическим спином*. Слово «спин» в этом термине подчеркивает то обстоятельство, что математический метод, описывающий изотопический спин, близок к таковому, описывающему обычный спин.

Существует вектор изотопического спина  $I$ , проекция которого  $I_z$  на ось  $z$  может принимать два значения  $\pm 1/2$  в соответствии с тем, как проекция обычного спина также принимает эти значения. Условились полагать, что значение  $I_z = 1/2$  соответствует протонному состоянию нуклона, а  $I_z = -1/2$  — нейтронному. Однако в рамках этой концепции возникает следующий вопрос: в каком пространстве существует вектор изотопического спина? Как мы установили ранее, вектор обычного спина можно было связать с обычным физическим пространством (спин и момент количества движения имеют одинаковую размерность). В концепции изотопического спина эта связь полностью утрачивается. Пространство изотопического спина — абстрактное пространство в том смысле, что оно не связано с тем физическим пространством, в котором существуют макроскопические тела и функционируют описывающие их динамические законы. Изотопический спин — внутреннее квантовое число, для описания которого вводится специальное математическое («воображаемое»<sup>6</sup>) пространство. Кардинальность идеи изотопического спина и состояла в том, что впервые в физику элементарных частиц с необходимостью (а не только для удобства вычислений) вводилось нефизическое пространство, в котором определялся вектор изотопического спина. Формализм (метод) изотопического спина впоследствии превосходно оправдал-

<sup>6</sup> Под физическим пространством здесь понимается макроскопическое пространство. В рамках механики Ньютона это трехмерное пространство Евклида. В рамках специальной теории относительности — четырехмерное пространство Минковского.

ся при интерпретации многочисленных экспериментов и послужил образцом для описания совокупности других квантовых чисел.

Сделаем два заключительных замечания.

1. Концепция изотопического спина приводит к тому, что в сильных взаимодействиях появляются две сохраняющиеся величины: норма вектора изотопического спина и полная проекция  $I_z$  системы элементарных частиц (аналогично обычному спину).

2. Пространство, в котором функционирует изотопический спин, является двумерным комплексным евклидовым пространством. Такое пространство можно представить себе как пространство двух измерений, в котором каждая точка  $x$  — комплексное число. Евклидовость означает, что модуль вектора  $(x_1, x_2)$  в этом пространстве задается суммой  $x_1^2 + x_2^2$ .

## Странность

В начале 50-х годов было обнаружено следующее явление. Вновь открытые элементарные частицы ( $K$ -мезон и  $\Lambda$ -частица) не рождались порознь. Например, реакция  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$  ( $\pi$ -пион), которая, казалось бы, не была запрещена никакими физическими законами, не осуществлялась на опыте. Однако, например, превосходно наблюдалась следующая реакция:  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ . В физике элементарных частиц существует «золотое» правило: все, что не запрещено, должно осуществляться в природе. В макроскопической физике такого категорического правила нет. Категорическое отрицание в микрофизике означает, что существует некое правило запрета. По этой причине отсутствие реакций с появлением одной  $\Lambda$ -частицы и обязательное парное рождение должны были найти свое отражение в конкретном правиле. Геллман и Нишиджима сформулировали это правило в 1952 г. В этом правиле  $K$ - и  $\Lambda$ -частицам приписывалось новое квантовое число — *странность* ( $S$ ), которое строго сохраняется в сильных взаимодействиях. Для простоты было предложено характеризовать странность целыми числами. Для  $\Lambda$ -частицы  $S = -1$ , для  $K$ -мезонов  $S = +1$ , странность нуклонов и пионов равна нулю. Тогда легко объясняется «странное» поведение новых элементарных частиц. В реакции с одиночным рождением  $\Lambda$ -частиц странность не сохраняется; такая реакция запрещена. При



царном рождении странности  $\Lambda$ - и  $K$ -частиц компенсируются, и, следовательно, такие реакции разрешены.

Отметим, что впоследствии были обнаружены элементарные частицы с большими (по абсолютной величине) значениями странности. Общее ограничение на величину странности  $|S| \leq 3$ .

На следующем этапе возникла необходимость в едином описании трех сохраняющихся величин:  $I$ ,  $I_z$ ,  $S$ . Однозначный метод восстановления симметрии динамических уравнений по сохраняющимся величинам отсутствует. Однако самое простое обобщение схемы изотопического спина оказалось весьма плодотворным. Вместо двумерного пространства изотопического спина было предложено для описания всех трех сохраняющихся величин использовать трехмерное комплексное евклидово пространство. Вектор, соответствующий всем квантовым числам, функционировал именно в таком пространстве <sup>7</sup>.

## Цвет

Среди квантовых чисел особое место занимает электрический заряд элементарных частиц. С одной стороны, это типично квантовое число. Все заряженные элементарные частицы имеют заряд, кратный величине  $e$ . Введение в физику кварков с их дробным зарядом, по существу, не изменяет этой ситуации. Надо лишь считать за единицу заряда («квант») электрический заряд кварков.

С другой стороны, электрический заряд несет и другую функциональную нагрузку. Заряд электрона — характеристика электромагнитного взаимодействия, определяющая константу  $\alpha_e$ , а следовательно, и само взаимодействие.

В этой двойственной роли электрического заряда заложено, например, его отличие от массы, которая не имеет квантовой природы в том смысле, что отсутствует «квант» массы.

Сильное взаимодействие — типично микроскопическое взаимодействие. Поэтому естественно допустить по аналогии с электромагнитным взаимодействием, что существует квантовое число — «сильный» заряд. Однако сильные взаимодействия нуклонов не являются дальнodelствующими — сильные заряды не проявляются на больших рас-

<sup>7</sup> На теоретико-групповом языке подобное описание соответствовало группе преобразований  $SU(3)$ , в то время как (изо)спиновая симметрия — группе  $SU(2)$ .

стояниях. Поэтому следствием гипотезы «сильного» заряда является (опять-таки по аналогии со свойством ненаблюдаемости кварков) допущение, что внутри нуклона «сильные» заряды трех кварков компенсируют друг друга, так что результирующий сильный заряд нуклонов равен нулю.

Казалось бы, простейший вариант такой гипотезы (по аналогии с электромагнетизмом) — приписать «сильному» заряду три значения:  $\pm 1$  и 0. Однако такое простейшее допущение противоречит установившемуся представлению о симметрии частиц с различными знаками электрических зарядов. В соответствии с современной теорией системы, в которых электроны (заряд  $-e$ ) заменены на позитроны (заряд  $+e$ ), эквивалентны (так называемая зарядовая инвариантность). Очевидно, что такая эквивалентность исчезает, если заряженные частицы заменить на нейтральные. Поэтому для характеристики «сильного» заряда нужно придумать величину, которая в трех модификациях была бы полностью эквивалентна, и, кроме того, сумма трех различных зарядов обращалась бы в нуль, так как «сильный» заряд (в отличие от электромагнитного) никогда не наблюдался.

Оба названных условия исключали использование простых математических образов — аналогов электромагнетизма, где для описания огромной совокупности данных использовали двузначность шкалы реальных чисел. По этой причине аналогом и термином, определяющим «сильный» заряд, послужил физический образ — *цвет*. Общеизвестно, что именно три цвета (например, красный, желтый и синий) имеют свойство дополнительности, т. е. их совокупность образует белый цвет. Белый цвет — образ обесцвеченности — соответствует отсутствию «сильного» заряда у наблюдаемых элементарных частиц. Кварки в нуклонах обладают сильным зарядом — «цветом», различие в цветах кварков, входящих в состав одной и той же частицы, таково, что в результате она обесцвечивается, т. е. сильный заряд (цвет) этих частиц обращается в нуль. Поле нуклона — результирующее поле кварков — быстро убывает с расстоянием и аналогично полю электрического мультиполя, формирующего взаимодействие Ван-дер-Ваальса (поле диполя убывает обратно пропорционально кубу расстояния). Подчеркнем, что термин «цвет», употребляемый как характеристика сильного взаимодействия, не имеет никакого отношения (кроме терминологического) к оптическим цветам.

Симметрия кварков относительно трех цветов (в отличие от симметрии электрических зарядов относительно знаков  $+$  и  $-$ ) приводит еще к одному важному нововведению. Частицы, переносящие взаимодействие между кварками, — *глюоны* (см. схему, представленную на рис. 1) обладают цветом и, следовательно, переносят его, изменяя цвет (но не сорт) кварка. Например, «красный» кварк во время подобного взаимодействия превращается в «желтый». В этом проявляется коренное отличие квантовой хромодинамики<sup>8</sup> от квантовой электродинамики, в которой частицы — переносчики взаимодействия (фотоны) — электронейтральны и, следовательно, не изменяют характеристики электрического заряда — его знак.

Наличие цвета у глюонов приводит к взаимодействию между ними и, следовательно, к кардинальному различию уравнений квантовой электродинамики и квантовой хромодинамики. Электромагнитные уравнения, как правило, линейные; уравнения квантовой хромодинамики принципиально нелинейные. Последнее обстоятельство существенно усложняет их решение. В частности, проблема невылетаия кварков (о которой говорилось выше) связана с нелинейностью уравнений квантовой хромодинамики, описывающих взаимодействие кварков.

### 3. ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Элементарные частицы классифицируются по различным параметрам. Пожалуй, самая общая основа классификации частиц — значение их *спина* ( $s$ ). Именно: поведение частиц существенно зависит от того, какое число, целое (0, 1, 2, . . .) или полуцелое ( $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ ), характеризует спин. Частицы с полуцелым спином называются *фермионами*, с целым — *бозонами*. В рамках квантовой механики различие в поведении фермионов и бозонов проявляется в типе симметрии волновых функций, описывающих эти частицы. Мы не будем приводить формальные основы этой теории, ограничимся главным выводом: система, состоящая из фермионов, подчиняется *принципу запрета Паули*, а для системы из бозонов этот запрет отсутствует. Напомним, что принцип Паули гласит: *два фермиона не могут существовать в одинаковом состоянии*.

---

<sup>8</sup> Таким образом прояснилось происхождение этого термина: chromatic — цветной.

Таблица 1

Наименование частиц	Спин	Взаимодействия, в которых участвуют частицы	Масса
Фермионы Бозоны	Полуцелый Целочисленный	Определение не зависит от взаимодействия частиц и их масс	
Адроны (фермионы или бозоны)	Определение не зависит от спина	Сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное	Определение не зависит от масс частиц
Лептоны (фермионы)	Полуцелый	Электромагнитное, слабое, гравитационное	Определение не зависит от масс частиц
Мезоны (разновидность адронов)	Целочисленный	Сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное	Определение не зависит от масс частиц
Барионы (разновидность адронов)	Полуцелый	Сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное	Масса $m \geq m_p$

Прекрасной и, пожалуй, важнейшей иллюстрацией принципа Паули является структура атомных уровней, определяющих периодическую систему Менделеева. Известно, например, что первый период этой системы состоит из двух элементов — водорода и гелия. В первом периоде главное квантовое число равно единице. Поэтому состояния атомов первого периода определяются исключительно значениями проекции спинов орбитальных электронов. Таких значений, как мы выяснили в предыдущем разделе, два. Поэтому в первом периоде могут существовать лишь два элемента. Во втором периоде главное квантовое число равно двум, что приводит к возможному существованию восьми различных состояний, соответствующих восьми элементам, и т. д.

Важно подчеркнуть, что именно принцип Паули — одна из основ всей структуры периодической системы. Если бы этот принцип «не работал», то все атомарные электроны заняли бы основной (водородный) энергетический уровень и, следовательно, исчезла бы периодичность системы и валентность химических связей. Именно принцип Паули препятствует атомарным электронам занять наиболее выгодное, наинизшее энергетическое состояние.

Другой основой классификации элементарных частиц является их взаимодействие. Все частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии, называются *адронами*. Все фермионы, не участвующие в сильном взаимодействии, называются *лептонами*. Особое место в подобной классификации занимают бозоны — переносчики взаимодействий (см. след. разд.). Приведем наиболее известные примеры частиц в рамках такой классификации. Типичными адронами являются нуклоны и пионы; лептонами — электроны и мюоны. Типичный переносчик взаимодействий — фотон. Адроны в свою очередь разделяются на *барионы* и *мезоны*. Барионы — фермионы; наиболее легкий барион — протон. Мезоны — адроны с целочисленным спином; самый легкий мезон — пион ( $m_\pi \sim 140$  МэВ).

В табл. 1 (см. с. 19) приведена классификация элементарных частиц.

#### 4. КАК ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Как упоминалось в разд. 1 настоящей главы, частицы взаимодействуют посредством обмена (см. рис. 1). Однако в процессе взаимодействия происходит не только обмен энергией, импульсом и массой, но и внутренними квантовыми числами: спином, изотопическим спином, зарядом и цветом.

Свойства обменных частиц в рамках квантовой теории поля в значительной степени определяют взаимодействие. В частности, задавая свойства фотона (все квантовые числа равны нулю, кроме спина  $s = 1$ ), можно вывести уравнения электродинамики.

Каково общее свойство обменных частиц? Все обменные частицы — бозоны. Свойства обменных частиц сведены в табл. 2. Из всех обменных частиц непосредственно обнаружен и хорошо изучен лишь *фотон*.

*Гравитон* — квант гравитационного поля — не обнаружен вследствие своего исключительно слабого взаимодействия. Хотя большинство физиков не сомневаются в существовании гравитонов с указанными свойствами, тем не менее следует соблюдать определенную осторожность в этом вопросе, поскольку сама квантовая теория гравитации далека от завершения. К сожалению, из-за упомянутой слабости гравитационного поля нет надежды на быстрый экспериментальный прогресс в обнаружении и исследовании гравитонов. Хотя промежуточные  $W^\pm$ ,  $Z^0$ -бозоны тоже сложно обнаружить, их статус гораздо более

Таблица 2

Взаимодействие	Обменная частица	Масса, Гев	Спин обменной частицы	Электрический заряд	Изотопический спин	Наличие цвета
Гравитационное Слабое	Гравитон	0	2	0	0	Нет
	Промежуточные бозоны *					
	$W^{\pm}$	80	1	$\pm 1$	1	Нет
Электромагнитное Сильное	$Z^0$	90	1	0	1	Нет
	Фотон	0	1	0	0	Нет
	Глюон	0	1	0	0	Да

\* Промежуточные бозоны образуют изотопический триплет.

определенен. Имеется ряд экспериментальных следствий (прежде всего связанных с взаимодействием нейтрино с веществом), прекрасно согласующихся со свойствами промежуточных бозонов.

Отсутствие непосредственных экспериментальных доказательств их существования связано с большой массой промежуточных бозонов. Энергии существующих до последнего времени ускорителей не хватало для порождения столь тяжелых частиц. Лишь в 1981 г. в ускорительном центре ЦЕРН (Швейцария) заработал ускоритель на встречных пучках — коллайдер — с энергией, достаточной для образования  $W^{\pm}$ ,  $Z^0$ -бозонов. Эту задачу надеялись решить в 1983—1984 гг. <sup>9</sup>

Глюоны, так же как и кварки, ненаблюдаемы в свободном состоянии. Однако в конце 70-х годов при изучении аннигиляции позитронов и электронов больших энергий в адроны наметился существенный прогресс в косвенном обнаружении глюонов. Оказалось, что в таких процессах возникают три струи адронов. Две струи приписывают кваркам, а третью — глюонам. Экспериментальные данные о трехструйных процессах при аннигиляции позитронов и электронов хорошо согласуются с предсказаниями квантовой хромодинамики и, следовательно, являются косвенным подтверждением существования глюонов — одного из основных элементов этой теории.

<sup>9</sup> В последнее время (март 1983 г.) появились экспериментальные указания в пользу существования тяжелых бозонов, а к середине 1983 г. существование  $W^{\pm}$  и  $Z^0$ -бозонов установлено достоверно.

Таблица 3

Взаимодействие	Константа $\alpha$		Радиус взаимодействия, см
	буквенное выражение	численное выражение при $m = m_p$	
Гравитационное	$Gm^2/\hbar c$	$0,6 \cdot 10^{-38}$	$\infty$
	$g_F m^2 c/\hbar^3$	$10^{-5}$	$10^{-17}$
Электромагнитное	$e^2/\hbar c$	$1/137$	$\infty$
	$a$	$1$	$10^{-13}$
	$\ln(m/m_p)$		
Сильное	$m \gg m_p$		

После этих замечаний полезно свести в единую таблицу свойства четырех взаимодействий. Данные, содержащиеся в табл. 3, являются, по существу, итогом предшествующих обсуждений. Новая графа — величина радиуса взаимодействия. Для гравитационного, слабого и электромагнитного взаимодействий величина радиуса  $r$  определяется из соотношения неопределенности  $r = \hbar/m_{BC}$  ( $m_B$  — масса обменной частицы). Для сильного взаимодействия его радиус  $r_N$  можно рассматривать либо как эмпирическую величину, либо как значение расстояния, при котором величина константы  $\alpha_s$  сравнивается с единицей <sup>9a</sup>.

## 5. ЕДИНЫЕ ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Кажется несомненным, что конечная цель физики элементарных частиц и квантовой теории поля — создание единой теории всех взаимодействий. Пытаясь кратко оценить современную ситуацию, можно сказать, что мы находимся в начале туннеля, в конце которого видны ослепляющие блики солнечных лучей.

Мечта Эйнштейна — объединение взаимодействий — начинает претворяться в жизнь, однако на основе, весьма отличной от его идеологии, — на основе квантовой теории поля.

Для современного читателя это утверждение звучит тривиально. Базироваться на квантовой теории кажется сейчас настолько естественным, что всякие иные пути представляются совершенно необоснованными. В дейст-

<sup>9a</sup> Сильное взаимодействие обусловлено обменом цветными частицами.

вительности история прогресса в фундаментальной физике отнюдь не столбовая дорога с ясными указателями. Многие десятилетия (вплоть до конца 60-х годов) казалось, что традиционная квантовая теория поля не в состоянии справиться с трудностями, возникающими даже при описании отдельных взаимодействий, в особенности сильного. Прогресс наметился в связи с серьезными достижениями: построением теории, объединяющей электромагнитное и слабое взаимодействия, созданием модели кварков и формулировкой квантовой хромодинамики.

Квантовая хромодинамика — один из вариантов теории поля, и поэтому представляется сейчас естественным и даже очевидным, что объединение взаимодействий должно проходить в рамках квантовой теории поля. Для дальнейшего полезно пояснить, что подразумевается под единой теорией поля. По существу, это теория (совокупность уравнений), описывающая единым образом все существующие взаимодействия и элементарные частицы.

Подобная формулировка содержит одно не вполне определенное понятие: «единым образом». Поясним его. Уравнения единой теории должны описать общие свойства взаимодействий и частиц, оттенив, однако, и их различие. Разумеется, здесь создается впечатление подмены одного неясного понятия другим («общие свойства»). Поэтому требуются дальнейшие пояснения. В этом понятии есть два аспекта: 1) единое взаимодействие должно характеризоваться общей константой или совокупностью общих констант; 2) взаимодействие должно соответствовать единому типу симметрии, который и характеризует общность свойств системы разных частиц. На математическом языке подобная общность соответствует общей симметрии или группе преобразований, относительно которой инвариантны уравнения единой теории поля. Рассмотрим по очереди оба аспекта единой теории.

### Единая константа

С первого взгляда кажется, что сама постановка вопроса о единстве константы для всех взаимодействий абсурдна. Однако такое заключение неверно, если вспомнить (см. табл. 3), что постоянные взаимодействий  $\alpha$  — бегущие константы, т. е. зависят от передаваемой массы  $m$  (импульса) обменных частиц.

Константы  $\alpha$  зависят в большей или меньшей степени от величины  $m$ . Однако постоянная электромагнитного



взаимодействия  $\alpha_e$  зависит от  $m$  весьма слабо <sup>10</sup>, и мы в дальнейших рассуждениях этой зависимостью пренебрежем, полагая  $\alpha_e(m) = \text{const}(m)$ . Далее, из сопоставления различных постоянных (см. табл. 3) следуют значения характеристических масс  $m_{we}$ ,  $m_{wes}$ ,  $m_{wesg}$ , при которых произойдет объединение констант. Эти величины сведены в табл. 4.

Таблица 4

Объединяемые взаимодействия	Символ массы — переносчика объединенного взаимодействия	Численное значение массы, при которой происходит объединение, ГэВ
Слабое, электромагнитное	$m_{we}$	$10^2$
Слабое, электромагнитное, сильное	$m_{wes}$	$10^{15}$
Слабое, электромагнитное, сильное, гравитационное	$m_{wesg}$	$10^{19}$

Наименее разработаны объединения всех четырех взаимодействий. Чтобы не возвращаться к гравитационному взаимодействию, отметим лишь, что обычно полагают значение массы  $m_{wesg} = (\hbar c/G)^{1/2} = \alpha_g^{-1/2} m_p$ . Масса, при которой происходит такое объединение, определяется величинами универсальных постоянных. Эта масса была определена в начале столетия Планком и, по мнению многих физиков, должна играть решающую роль в объединении всех взаимодействий.

Но вернемся к нашей основной теме — объединению остальных трех взаимодействий. Поскольку наименьшее значение объединяющей массы относится к совокупности слабого и электромагнитного взаимодействий ( $m_{we} \sim \sim 100$  ГэВ), естественно начать именно с их объединения.

В нашем приближении ( $\alpha_e = \text{const}$ ) возникает одна константа  $\alpha_{we} \sim \alpha_e$  при  $m > m_{we} \sim 100$  ГэВ, где зависимость  $\alpha_{we}(m)$  не выражена в значительной мере. Зависимость констант  $\alpha_e$  и  $\alpha_w$  представлена на рис. 2. Однако следует отметить, что из-за специфической структуры поля, передающего слабое взаимодействие (см. далее), реально объединенное электрослабое взаимодействие харак-

<sup>10</sup> Мы ранее не упоминали об этой зависимости.

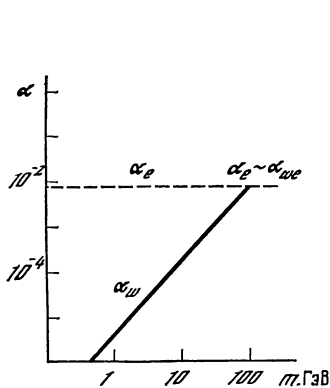


Рис. 2. Схема зависимости констант  $\alpha_w$  и  $\alpha_e$  от передаваемой массы  $m$ . В этой схеме пренебрегается слабой зависимостью константы  $\alpha_e$  от  $m$ .

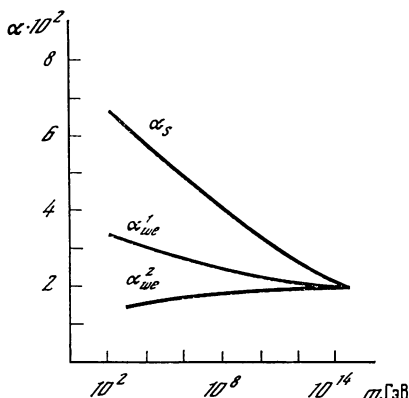


Рис. 3. Схема зависимости констант объединенного электрослабого взаимодействия и константы  $\alpha_s$  от  $m$ .

теризуется двумя общими константами и двумя массами (см. табл. 2), незначительно отличающимися друг от друга и изменяющимися далее совместно. Характер зависимости этих двух постоянных ( $\alpha_{we}^1$  и  $\alpha_{we}^2$ ), а также константы  $\alpha_s$  от  $m$  (при  $m > m_{wes}$ ) изображен на рис. 3. Весьма симптоматично, что все три бегущие константы сравниваются при значении  $m_{wes} \sim 10^{15}$  ГэВ. Это обстоятельство кажется неслучайным и является серьезным подкреплением идеи объединения трех взаимодействий: сильного, электромагнитного и слабого — так называемого *большого объединения*. Приблизненно значение  $m_{wes}$ , при котором происходит объединение трех констант, можно получить из следующих соображений (см. табл. 3). Полагая  $\alpha_s = \alpha_e$ , получаем

$$m_{wes} \sim m_p \exp(a/\alpha_e), \quad (4)$$

где  $a \sim 1$  зависит от числа  $N_q$  сортов кварков. Оценить более точно значение  $a$  можно из строгого выражения, связывающего константу  $\alpha_s$  с массой  $m_{wes}$ : при  $N_q = 6$

$$\ln \frac{m_{wes}}{m} = \frac{\pi}{11} \left[ \frac{1}{\alpha_e} - \frac{8}{3\alpha_s(m)} \right]. \quad (5)$$

Из опыта следует, что  $\alpha_s(m_p) \sim 1$ . Поэтому, полагая  $m = m_p$  и  $\alpha_s(m_p) \sim 1$ , это выражение, учитывая, что  $1/\alpha_e$  ( $\alpha_e = 1/137$ ) намного больше, чем  $8/3\alpha_s(m)$ , можно

приближенно представить в форме

$$\ln \frac{m_{wes}}{m_p} \sim \frac{1}{4\alpha_e}. \quad (6)$$

Тогда окончательно получается

$$m_{wes} = m_p \exp(1/4\alpha_e) \sim 10^{15} \text{ ГэВ}. \quad (7)$$

В рамках большого объединения возникает огромный масштаб масс. Напомним, что в настоящее время (1983 г.) на ускорителях можно в принципе изучать частицы с массой  $\sim 100$  ГэВ (коллайдер). Быть может, еще более впечатляет, что даже свершение фантастически трудного подвига — строительства кольцевого ускорителя, опоясывающего земной шар, привело бы к генерации частиц с энергией  $\sim 10^7$  ГэВ, т. е. на много порядков меньшей, чем масса  $m_{wes}$ . Тем не менее (как мы увидим далее) существует экспериментальный подход к исследованию некоторых характеристик частиц с массой  $m_{wes}$  (распад протона).

### Единый тип симметрии

Сейчас кажется тривиальным утверждение: в основе динамических уравнений находится некоторый тип их симметрии. Идея объединения базируется на двух постулатах: 1) существует единый тип симметрии взаимодействия; 2) существует единый тип симметрии, характеризующий фундаментальные элементарные частицы<sup>11</sup>.

Остановимся вначале на первом вопросе. Ранее приводились примеры симметрий — геометрической и внутренней. Однако геометрические симметрии определяют лишь законы сохранения энергии, импульса и момента, т. е. общие законы, справедливые для любых динамических уравнений и в этом смысле никак не способствующие поискам уравнений единой теории. Существенно большую ограничивающую роль играют внутренние квантовые числа. Уже упоминалось, что квантовые числа обменных частиц определяют характер взаимодействия. Однако при таком подходе создается впечатление изолированности взаимодействий, поскольку квантовые числа обменных частиц кажутся весьма различными. Это верно лишь с одной оговоркой: спины обменных частиц трех взаимодействий одинаковы и равны единице (см. табл. 2). Это обстоя-

<sup>11</sup> Мы в дальнейшем поясним понятие фундаментальности частиц.

тельство и есть та общность, которая весьма способствует объединению. Спин гравитона (гравитационное взаимодействие) равен 2, что затрудняет включение гравитационного взаимодействия в объединенную теорию.

Вернемся, однако, к анализу возможной формулировки общего динамического принципа. Сейчас особые надежды возлагают на *принцип калибровочной инвариантности*, которому подвластны все четыре взаимодействия.

Остановимся подробнее на этом принципе. Простейшей его иллюстрацией являются школьные эксперименты по электромагнетизму. Можно взять голый рукой один из проводов, по которому протекает ток, но, вероятно, каждый читатель испытывал весьма неприятные ощущения при прикосновении одновременно к обоим проводам. Как известно, этот простой эмпирический факт имеет элементарное объяснение: сила тока определяется разностью потенциалов, а не значением потенциала. Прибавляя постоянную величину к значению потенциала или отнимая ее, мы не меняем физической картины. Иными словами, в теории существуют величины (потенциалы), абсолютное значение которых не влияет на измеряемые параметры. Последние определяются разностью потенциалов, и, следовательно, теория инвариантна относительно изменения потенциалов на постоянную величину. В электродинамике обобщением элементарных школьных представлений о потенциале является понятие вектор-потенциала, составленного из четырех компонент, преобразующихся как компоненты 4-вектора. Это же свойство независимости физических следствий и от более общих (градиентных) преобразований называется в электродинамике калибровочной инвариантностью.

Можно привести еще один пример, заимствованный из радиотехники. Интерференция радиоволн зависит от разности фаз, а не от их абсолютного значения.

Приведенные примеры — частные случаи калибровочного принципа, который можно определить как инвариантность физически измеряемых величин относительно преобразований других (потенциалов), не измеряемых на опыте. Простые преобразования связывают потенциалы и измеряемые величины, например силы. Детальные исследования продемонстрировали, что калибровочная инвариантность имеет универсальный характер. И далее: задавая форму калибровочной инвариантности и параметры частиц-переносчиков взаимодействия, можно полностью определить все свойства этого взаимодействия.

Универсальность калибровочной инвариантности — одна из основ объединения взаимодействий.

Вторая основа связана с обобщением свойств фундаментальных элементарных частиц. Уже само сочетание эпитетов «фундаментальный» и «элементарный» не вполне определено. Можно все же попытаться лаконично определить это понятие. *Фундаментальные элементарные частицы* — точечные фермионы, т. е. частицы, пространственная протяженность которых равна нулю. Разумеется, возникает вопрос о физических основах этого определения. Под фундаментальными частицами понимают объекты, из которых состоят все остальные элементарные частицы. Ясно, что такими частицами должны быть фермионы. Действительно, из частиц с полуполым спином можно образовать бозоны с целым спином ( $1/2 + 1/2 = 1$ ), но невозможно из бозонов составить фермионы ( $1 + 0 \neq 1/2$ ). Протяженные частицы не могут быть фундаментальными (истинно элементарными) частицами.

Оказывается, под наше определение фундаментальных частиц попадают очень немногие частицы из большого их числа. К таким частицам относятся прежде всего лептоны (сейчас их насчитывается пять) и, может быть, кварки. Элементарность лептонов следует из экспериментальных данных, свидетельствующих, что размеры электронов и мюонов  $< 10^{-15}$  см, и теоретических соображений. Квантовая электродинамика — теория, описывающая поведение заряженных лептонов, базируется на представлении об их точечности и превосходно согласуется с экспериментом.

Более проблематично допущение о фундаментальности кварков. Разумеется, измерить надежно размеры кварков невозможно. Однако нет экспериментов, противоречащих их точечности. То обстоятельство, что все многочисленные адроны состоят из кварков, — серьезный аргумент в пользу их «фундаментальности».

Итак, постулируется, что объединение должно осуществляться на основе лептонов и кварков. Электрослабое взаимодействие не включает сильное. Поэтому электрослабое должно включать лишь лептоны. Простейший вариант объединения — допущение, что каждый лептон и соответствующее ему нейтрино образуют аналог изотопического семейства:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix},$$

$\nu_\tau$  — нейтрино, соответствующее  $\tau$ -лептону, еще не обнаружено, однако нет сомнений в его существовании.

Более сложным является объединение обменных частиц. Нужно (в рамках электрослабого взаимодействия) объединить фотон, переносчик электромагнитного взаимодействия, и тяжелые бозоны (с массой  $m_{we} \sim 100$  ГэВ), переносящие слабое взаимодействие. Существовали две основные схемы объединения частиц-переносчиков в единое семейство. В первой схеме перенос электрослабого взаимодействия осуществлялся фотоном и изотопической тройкой ( $W^\pm$ ,  $Z^0$ )-бозонов. Во второй переносчики электрослабого взаимодействия составляли изотопический триплет, состоящий из двух заряженных ( $W^\pm$ )-бозонов и фотона, который играл роль третьей компоненты изотопического триплета. Эксперимент продемонстрировал справедливость первого варианта, что и принесло его создателям (Вайнбергу, Глешоу и Саламу) Нобелевскую премию в 1979 г.

Таким образом, в современной схеме электрослабого взаимодействия при малых энергиях электромагнитное взаимодействие переносится фотоном; слабое —  $W^\pm$ ,  $Z^0$ -бозонами. При больших передаваемых массах  $m \gtrsim m_{we}$  существует единое взаимодействие, которое передается всеми четырьмя частицами.

Большое объединение включает также и сильное взаимодействие. Следовательно, в единую группу включают лептоны и кварки. Из симметрии между лептонами и кварками естественно допустить, что их числа равны. Сейчас обычно считают, что число  $N_q$  сортов кварков равно шести. Пока имеются весьма серьезные аргументы в пользу существования пяти сортов кварков. Полагают, что шестой кварк имеет очень большую массу и будет обнаружен с помощью новых ускорителей.

Перейдем далее к частицам — переносчикам универсального взаимодействия. Оказывается, что даже в простейших схемах большого объединения, помимо четырех частиц, переносящих электрослабое взаимодействие, и восьми глюонов, переносящих сильное, должны существовать 12 сверхтяжелых  $X$ -частиц с массой  $m_{wes} \sim 10^{15}$  ГэВ, переносящих одновременное слабое, электромагнитное и сильное взаимодействие.

## 6. РАСПАД ПРОТОНА

Протон — очень стабильная частица. Его время жизни  $t_p$  заведомо превышает  $10^{15}$  лет, что уже на пять порядков превышает время существования Вселенной  $10^{10}$  лет. Об этом очевидном факте свидетельствует наше существование. В человеческом теле  $\sim 10^{29}$  протонов. Если время  $t_p$  было бы меньше  $10^{15}$  лет, то за год распадалось бы более  $10^{14}$  протонов. Ионизации, произведенной этими распадами, было бы вполне достаточно для уничтожения всех сколько-нибудь крупных живых существ, и, разумеется, человеческого рода. Время  $t_p \sim 10^{15}$  лет — огромный масштаб, даже сравнительно с временем существования Вселенной. Поэтому естественно было полагать, что это время равно бесконечности, т. е. полагать, что протон — абсолютно стабильная частица. К такому утверждению привыкли почти все физики. Лишь изредка раздавались тихие голоса скептиков, вопрошавших: почему протон не распадается? Вопрос основывался на следующей дилемме. С одной стороны, опыт и общественное мнение утверждали, что протон стабилен, с другой — весь накопленный экспериментальный материал (кроме стабильности протона) давал веские основания для утверждения: все, что не запрещено, должно осуществляться в природе (см. также разд. 2 наст. гл.).

Во Вселенной существуют две стабильные частицы с массой, отличной от нуля: электрон и протон. Почему не распадается электрон, понятно. Электрон — самая легкая заряженная частица. Все более легкие частицы (фотон, нейтрино) электронейтральны. Закон сохранения электрического заряда препятствует распаду электрона. А почему не распадается протон, непонятно. Существует много потенциальных каналов распада (например, на пион и нейтрино), а протон все же не распадается. Чтобы совместить этот факт с правилом «все, что может происходить в мире элементарных частиц, происходит», придумали, так сказать, *post factum закон сохранения барионного заряда*, приписывая всем барионам (в том числе и протону) барионное число  $+1$ , а антибарионам  $-1$ . Тогда этот запрет просто «объяснял» стабильность протона. Его заряд равен  $+1$ , а заряд всех более легких частиц равен нулю. Например, в реакции  $p \rightarrow \pi^+ + \nu$  барионный заряд в левой части равен  $+1$ , а в правой — нулю. Поэтому распад протона оказывается невозможным. Такое простое правило формально снимало все сомнения, тем не менее все

же и в этой ситуации раздавались приглушенные скептические голоса.

Закон сохранения барионного заряда был введен по аналогии с законом сохранения электрического заряда. Но электрический заряд, помимо того, что он сохраняющаяся величина, несет и другую важнейшую функцию. Электрический заряд — количественная мера электромагнитного взаимодействия. Барионный заряд эту функцию не выполняет. С большой степенью точности на опыте удалось показать непричастность барионного заряда к дальнедействующим взаимодействиям. Это обстоятельство подрывало доверие к аналогии между электрическим и барионным зарядами. Именно поэтому иногда высказывались сомнения в абсолютной стабильности протона и проводились специальные эксперименты по ее проверке. Так, в начале 70-х годов было получено, что  $t_p \gtrsim 10^{29}$  лет.

Так складывалась ситуация с вопросом о стабильности протона до середины (точнее, второй половины) последнего десятилетия, когда эта проблема вышла на авансцену физики элементарных частиц.

Это коренное изменение точки зрения произошло вследствие значительного успеха в объединении взаимодействия, и в частности большого объединения. Предыдущий раздел, посвященный этому вопросу, мы закончили утверждением, что в рамках большого объединения существуют обменные  $X$ -частицы, обладающие дробным зарядом и способные одновременно переносить слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия. Протон состоит из трех кварков (рис. 4);  $X$ -частица, покидая один из кварков, уносит его характерные квантовые числа: электрический заряд и цвет, тем самым открывая возможность превращения этого кварка в лептон; два остальные кварка образуют легкий адрон, например пион. Так в рамках большого объединения вырисовывается нестабильность протона. С первого взгляда этот вывод кажется неожиданным, противоречащим экспериментальным данным о стабильности протона. Однако (и в этом заключается величайшее интригующее значение предсказания большого объединения) время жизни протона  $t_p = 10^{31 \pm 2}$  лет, с одной стороны, оказалось близким к экспериментальной границе значения  $t_p$ , с другой — теоретическое значение  $t_p$  находится в пределах современных экспериментальных возможностей. Неудивительно, что теоретическое предсказание, следующее из теории большого объединения, вызвало сенсационную реакцию у научной и не только на-



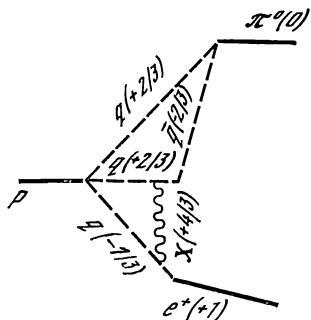


Рис. 4. Схема распада протона

Протон вначале распадается на три кварка с электрическими зарядами  $2/3e$ ,  $2/3e$  и  $-1/3e$ . Два кварка взаимодействуют между собой посредством обмена тяжелым бозоном с зарядом  $4/3e$ . В процессе этого обмена один из кварков приобретает целочисленный заряд и превращается в позитрон. Кварк с зарядом  $2/3e$  превращается в антикварк (заряд  $-2/3e$ ) и, объединившись с другим кварком с зарядом  $1/3e$ , образует пион

учной общественности. Дискуссия о распаде протона выплеснулась даже на страницы средств массовой информации.

Далее возникает важнейший вопрос: откуда берется огромный масштаб времени  $t_p$ ? Окончательный ответ гласит: время  $t_p$  связано с большим значением массы  $X$ -бозона:  $m_{wes} \sim 10^{15}$  ГэВ. Действительно, вероятность  $W_d$  распада пропорциональна произведению сечений испускания и поглощения  $X$ -бозона. Сечение имеет размерность квадрата длины. При больших массах  $m_{wes}$  есть одна характеристическая длина — комптоновская длина  $X$ -бозона  $\hbar/m_{wes}c$ . Поэтому  $W_d \propto (m_{wes})^{-4}$ . Время жизни обратно пропорционально  $W_d$ . Следовательно,  $t_p \propto (m_{wes})^4$ .

Это качественное рассуждение. Более точное выражение можно получить, если учесть, что время  $t_p$  приблизительно пропорционально  $\alpha_e^{-2}$  и характеристическому для всех распадов времени  $\hbar/m_p c^2 \sim 10^{-24}$  с. Тогда можно получить

$$t_p \sim A \alpha_e^{-2} (m_{wes})^4 \frac{\hbar}{m_p c^2}. \quad (8)$$

Из соображений размерности следует, что размерность  $[A] = [m^{-4}]$ . Характеристической массой в мире элементарных частиц является масса протона; полагая  $m = m_p$ ,  $A \sim 1/m_p^4$ , а  $m_{wes} = m_p \exp(1/4\alpha_e)$  (см. формулу (7)), получим элегантную аппроксимацию для времени  $t_p$ :

$$t_p \sim \alpha_e^{-2} \exp(1/\alpha_e) \frac{\hbar}{m_p c^2} \sim 10^{32} \text{ лет}. \quad (9)$$

Большое значение времени  $t_p$  в конечном счете определяется малостью (сравнительно с единицей) значения константы  $\alpha_e$ .

Таким образом, большое объединение приводит к совершенно неожиданному выводу: протон должен распадаться с очень большим временем жизни  $t_p$ . Этот вывод имеет принципиальное значение по многим направлениям: 1) обнаружение распада свидетельствовало бы о правильности принципа большого объединения; 2) распад доказал бы, что уравнения хромодинамики правильны и применимы к кваркам, которые являются истинно элементарными частицами; 3) более детальное исследование распада протона позволило бы заглянуть в мир частиц с фантастически большой массой  $\sim 10^{16}$  ГэВ.

Неудивительно, что в поиски распада протона включилось много больших групп физиков. В настоящее время (вторая половина 1982 г.) насчитывается 11 групп почти на всех континентах, занимающихся или собирающихся заниматься поисками распада протона. Сейчас функционируют семь установок с весом мишени, в которой должен распадаться протон, порядка 100 т. Ранее всех запустили установки советские физики (Баксанская нейтринная обсерватория) и японо-индийская группа (японские университеты и Тата-институт фундаментальных исследований), работающая в золотоносных шахтах в Индии. По последним данным,  $t_p \geq 10^{31}$  лет. Впрочем, результаты, полученные японо-индийской группой, можно трактовать двояко. По данным этой группы зарегистрировано несколько случаев, которые можно интерпретировать как распад протона. Если эта интерпретация правильна, тогда японо-индийская группа измерила не предел времени  $t_p$ , а его значение, которое оказалось равным  $t_p \sim 5 \cdot 10^{30}$  лет. Казалось бы, наступило время проявить оптимизм, популяризируя открытие распада протона. К сожалению, ситуация не столь проста. Случаи, которые интерпретировались как распад протона, происходили внутри установки, вблизи ее границ, что не исключало влияния краевых эффектов, обуславливающих неточность интерпретации<sup>12</sup>. Дискуссия, развернувшаяся вокруг этих немногих «кандидатов» в распадающиеся протоны, свидетельствует: а) вопрос о распаде не решен окончательно; б) атмосфера

<sup>12</sup> По данным, которые были доложены японо-индийской группой на конференции «Нейтрино-82», происходившей в июне 1982 г. в Будапеште, зарегистрировано три события вдали от границы установки, которые, по-видимому, трудно объяснить фоновыми эффектами. Если отнести эти события к распадам протона, то  $t_p \sim 6 \cdot 10^{30}$  лет. Впрочем, и относительно этих событий существует серьезный скепсис в интерпретации их как распадов протона.

ожидания этого открытия весьма напряженная. Вот-вот будет обнаружен распад протона. Далее возникает естественный вопрос: почему столь большое число групп не может ответить на ясно сформулированную проблему: распадается ли протон? Трудность обуславливается именно большим значением времени  $t_p$ . Например, если  $t_p \sim 10^{30}$  лет, за год в тонне вещества произойдет один распад. Если  $t_p \sim 10^{32}$  лет, то один распад произойдет уже в 100 т вещества. Таким образом, нужно уверенно регистрировать чрезвычайно редкие события в больших массах вещества. Однако решение этой проблемы лишь часть возможного успеха. Дело в том, что в любой установке всегда будет существовать более или менее значительный фон имитирующих событий, порожденный радиоактивными примесями и космическими лучами. От этого фона полностью избавиться невозможно, однако можно его существенно уменьшить. Для уменьшения фона, обусловленного космическими лучами, установки располагают глубоко под землей, поглощающей космическое излучение. Например, упомянутая японо-индийская группа работает на глубине 3 км грунта, что позволяет уменьшить космический фон примерно на 7—8 порядков. Чтобы уменьшить радиоактивный фон, стараются использовать максимально чистые, свободные от радиоактивных примесей вещества. Тщательная очистка больших объемов является сама по себе сложной технологической задачей.

Каковы перспективы изучения распада протона с учетом упомянутых выше трудностей? Одно из основных направлений конструирования установок — использование очищенной воды в качестве главного элемента мишени и счетчиков, регистрирующих черенковское излучение, в качестве детектора распада. Параметры установок, которые должны войти в строй в ближайшие годы (1983—1984 гг.), таковы: полезный вес детектора  $\sim 10\,000$  т, детектор — вода; число больших черенковских счетчиков достигает нескольких тысяч. Одна из таких установок была запущена в США (штат Огайо)<sup>13</sup>.

Подобные установки позволяют обнаружить распад протона, если  $t_p < 10^{33}$  лет, что близко к принципиальному пределу обнаружения распада. Дело в том, что если окажется  $t_p > 10^{34}$  лет, то неустранимый фон от космических нейтрино будет неизбежно имитировать распады протона.

<sup>13</sup> В соответствии с последними данными (середина 1983 г.), полученными на этой установке, распад протона, по-видимому, не обнаружен, и его время жизни больше  $10^{31}$  лет.

Остается надеяться, что время  $t_p < 10^{34}$  лет и распад протона будет обнаружен в сравнительно недалеком будущем, что приведет к радикальному прогрессу физики элементарных частиц.

Так можно прогнозировать перспективы исследований распада протона сквозь дымку фундаментальных физических гипотез и методических проблем.

## Глава II

### ВСЕЛЕННАЯ

#### 1. НЕМНОГО ИСТОРИИ

С тех пор как человек начал интересоваться структурой мироздания, господствовало убеждение: звезды — вечный и неизменный орнамент, украшающий ночное небо. Разумеется, не осталось незамеченным, что на фоне этой поражающей воображение неизменности и масштабности существуют несколько звезд-планет, меняющих свое положение относительно Земли. Поэтому возникла стройная система, являющаяся синтезом огромного эмпирического материала, накопленного древними восточными и греческими астрономами. Мир состоит из неподвижных звезд, «прикрепленных» к вращающейся сфере, планет и Солнца, движущихся вокруг центра Вселенной — Земли.

Революционные воззрения Коперника и Галилея, как мы это знаем сейчас, затронули лишь микроскопическую часть Вселенной — Солнечную систему, заменив «центр Вселенной», Землю, на Солнце. Убеждение относительно неизменной звездной сферы, по существу, сохранилось до начала нашего столетия.

Хотя в других областях науки давно возникли и установились идеи развития (вспомним, например, теорию катастроф Кювье или теорию происхождения видов Дарвина), в самой древней науке, астрономии, господствовали убеждения о бесконечном и неизменном мире. Подобные настроения неизменности и вечности прекрасно переданы в стихах Тютчева:

Вам, изливающим из глубины ночной

Свой непорочный свет, чья сущность неизменна,—

О звезды, слава вам! Сияя красотой,

Не ведаете вы ни дряхлости, ни тлена <sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Тютчев Ф. И. Лирика. В 2-х т. — М.: Наука, 1966, т. 2, с. 417

Вероятно, именно эти убеждения о неизменности мира, имеющие столь почтенную историю, сыграли решающую роль, когда Эйнштейн попытался применить созданную им общую теорию относительности к описанию Вселенной, точнее, к объяснению ее неизменности. Поскольку непосредственно из уравнений Эйнштейна неизменность Вселенной не следовала, он добавил к своим уравнениям так называемый  $\lambda$ -член, отражающий существование гипотетических сил, препятствующих разлету. На этом пути Эйнштейну удалось построить модель стационарной Вселенной (1917 г.).

Вскоре после окончания этой работы осуществились грандиозные преобразования в истории человечества, на фоне которых осталось незамеченным одно небольшое событие: в начале 20-х годов в Петрограде группа молодых энтузиастов-неофитов начала изучать общую теорию относительности. В состав этой группы входил и А. А. Фридман — математик и метеоролог.

Ему удалось решить уравнения общей теории относительности (без  $\lambda$ -члена) при весьма общих и естественных допущениях. Фридман показал, что эта теория приводит к неожиданному результату: Вселенная должна быть нестационарной (см. разд. 2 наст. гл.). После непродолжительной дискуссии Эйнштейн признал этот результат, что и нашло отражение в его книге «Сущность теории относительности»<sup>15</sup>.

Однако признание Эйнштейна не означало признания научной общественности, которая считала результат Фридмана, скорее, математическим курьезом, чем глубоким физическим результатом. Лишь в 1929 г., после наблюдений Хабблом эффекта разбегания галактик, произошел почти мгновенный поворот в общественном мнении. Вселенная нестационарна. Фридман не смог стать свидетелем триумфа своего предвидения: в 1925 г. в возрасте 37 лет он скончался.

Достижения Фридмана—Хаббла, можно сказать без преувеличения, оказались поворотным пунктом в истории астрономии. Они покончили с главным заблуждением: Вселенная неизменна. Важность этого результата выходит далеко за пределы констатации факта. Признание эволюции Вселенной в пространстве—времени влечет за собой и другое мировоззренческое следствие — существование эволюции таких космических объектов, как га-

---

<sup>15</sup> *Einstein A. The meaning of relativity. Princeton, 1953.*

лактики, звезды. Признание изменчивости этих физических объектов пришло, разумеется, не сразу. Прошло примерно два десятилетия после работ Фридмана — Хаббла, прежде чем идея неизменности Вселенной сменилась идеей всеобщей эволюции. Однако несомненно, что выводы, сделанные Фридманом и Хабблом, были одним из двух факторов, стимулировавших кардинальную смену представлений о Вселенной. Другой фактор — технический прогресс, создавший предпосылки для превращения оптической астрономии во всеволновую.

Этот прогресс проходил в трех направлениях — развития электроники, ракетной техники и приборостроения. Побочным детищем изобретения радаров была радиоастрономия, позволившая наблюдать космос в радиодиапазоне. Но оптический диапазон ( $E_\gamma \sim 1 \div 3 \text{ эВ}^{16}$ ) и радиодиапазон ( $E_\gamma < 10^{-3} \text{ эВ}$ ) — единственные диапазоны излучения, которые почти без поглощения проходят земную атмосферу. Инфракрасный ( $E_\gamma \sim 10^{-3} - 1 \text{ эВ}$ ), ультрафиолетовый ( $3-100 \text{ эВ}$ ), рентгеновский ( $100-10^6 \text{ эВ}$ ) и гамма- ( $> 10^6 \text{ эВ}$ ) диапазоны поглощаются атмосферой, и поэтому приборы, регистрирующие космическое излучение, нужно выносить на границу атмосферы либо за ее пределы. Для этой цели используются баллоны (воздушные шары), ракеты и спутники. Разумеется, регистрирующие приборы не имеют ничего общего с оптическими телескопами. Такие приборы синтезируют достижения микроэлектроники и ядерной физики. Например, в гамма-астрономии в основу регистрирующих устройств положены искровые камеры с весьма чувствительными регистраторами треков, возникших внутри камер. Не входя в детали, отметим, что каждый диапазон имеет свои специфические технические решения.

Идеи Фридмана, наблюдения Хаббла и технический прогресс привели к существенному изменению самого предмета астрономии. До середины 40-х годов в основном изучались квазистационарные объекты, имеющие продолжительность жизни, равную времени существования Вселенной. После 50-х годов центр тяжести исследований сместился в сторону нестационарных или взрывных объектов с весьма разнообразными шкалами времен. Так, про-

---

<sup>16</sup> Мы в дальнейшем энергию квантов  $E_\gamma$  (частоту излучения) будем измерять в эВ. Квант с энергией 1 эВ имеет длину волны  $\lambda \sim 10^4 \text{ \AA} = 10^{-4} \text{ см}$ .

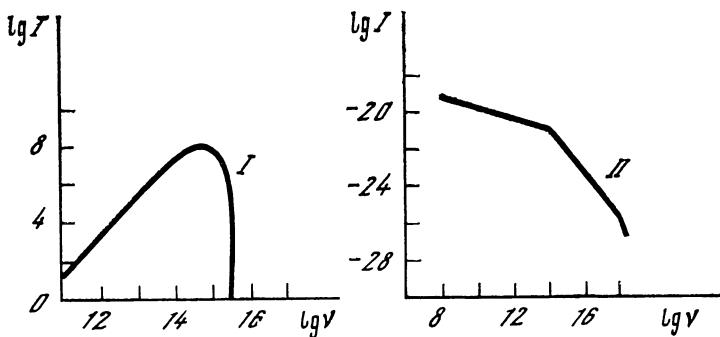


рис. 5. Интенсивность излучения Солнца (квазистационарный объект) и Крабовидной туманности (нестационарный объект)

Спектр солнечного излучения представляется функцией Планка,  $\nu$  — частота излучения

должительность гамма-всплесков <sup>17</sup>  $\sim 10$  с; продолжительность активной фазы ядер галактик и квазаров  $\sim 10^6$ — $10^7$  лет. Разумеется, далее возникает вопрос: в чем состоит решающее влияние технического прогресса и (как его следствия) огромного расширения наблюдательного диапазона на доказательство эволюции или взрывов космических объектов? Ответ заключается в следующем. Энергетический спектр излучения квазистационарных объектов имеет равновесный характер и, как правило, может быть хорошо представлен распределением Планка с резким максимумом в области  $E_\gamma \sim 1$  эВ, что соответствует оптическому диапазону (см. рис. 5, I). Энергетический спектр нестационарных объектов имеет сугубо неравновесный характер (пример такого спектра представлен на рис. 5, II) без максимума и включает излучение всех диапазонов: от радио- до гамма-диапазона. Исследования нестационарных объектов возможны лишь при всеволновых наблюдениях.

## 2. ФРИДМАНОВСКАЯ МОДЕЛЬ ВСЕЛЕННОЙ

В основу модели Вселенной, предложенной Фридманом, положены два постулата. Их иногда называют основными космологическими постулатами: 1) Вселенная

<sup>17</sup> Гамма-всплесками называют кратковременные импульсы  $\gamma$ -излучения космического происхождения. Сейчас популярна гипотеза, что источниками  $\gamma$ -всплесков являются нейтронные звезды. Менее ясен, однако, конкретный механизм неустойчивости нейтронных звезд, приводящий к возникновению всплесков.

изотропна в трехмерном пространстве; 2) Вселенная однородна в трехмерном пространстве. Из этих постулатов независимо от динамики эволюции Вселенной следует важнейший вывод. Рассмотрим два точечных тела, расположенных на расстоянии  $r_{12}$  друг от друга. Радиус-вектор, соединяющий обе точки, обозначим  $\mathbf{r}_{12}$ . Поскольку Вселенная изотропна, то направление вектора  $\mathbf{r}_{12}$  — единственное выделенное направление во Вселенной. Поэтому все динамические векторные величины, определяющие состояние системы обоих тел, должны иметь направление, совпадающее с вектором  $\mathbf{r}_{12}$ . В частности, этому свойству должна удовлетворять и относительная скорость. Следовательно, можно написать соотношение

$$\mathbf{v}_{12} = H\mathbf{r}_{12}. \quad (10)$$

Вообще говоря, параметр  $H$  должен зависеть от расположения точек 1 и 2. Но из второго космологического постулата (однородность Вселенной) естественно положить, что  $H = \text{const}(r)$ , т. е. для данного момента времени  $t$  параметр  $H$  есть универсальная для всей Вселенной постоянная. Эту постоянную называют константой Хаббла. Как уже упоминалось в разд. 1 настоящей главы, закономерность (10) была выявлена Хабблом в 1929 г. и послужила первой экспериментальной основой модели Вселенной, построенной Фридманом на основе общей теории относительности. С первого взгляда наше рассуждение опровергает связь закона Хаббла с этой теорией. Мы получили его из простых соображений, не связанных с динамикой эволюции Вселенной. В действительности этот аргумент неверен. В принципе соотношение Хаббла выполняется и для значения  $H = 0$ , т. е. для стационарной Вселенной. Непреходящее значение работ Фридмана состоит в идее о том, что из динамики эволюции Вселенной следует неравенство  $H \neq 0$ , т. е. Вселенная должна быть нестационарным объектом. Однако и в этом есть проявление иронии судьбы: хотя первая модель расширяющейся Вселенной была построена на основе теории относительности, основные выводы модели могут быть получены в рамках ньютоновской теории тяготения. Это несколько парадоксальное с исторической точки зрения обстоятельство было продемонстрировано английскими астрофизиками Милном и Маккри в 1934 г., более чем через 10 лет после публикаций работ Фридмана.

Нестационарность Вселенной следует из простых, можно сказать, очевидных соображений. И если бы не засти-



лающий логическое мышление и воображение предрассудок о вечно неизменной Вселенной, то «модель Фридмана» мог бы придумать еще и Ньютон. Поясним эту мысль простым примером. Предмету, брошенному с Земли (для конкретности можно говорить о запущенной ракете), уготована одна из трех возможностей. Если его скорость меньше первой космической скорости ( $\sim 8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ ), то он упадет на Землю. Если его скорость превышает вторую космическую скорость ( $\sim 11 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ ), то он улетит в бесконечность (межпланетный зонд). При скорости  $\sim 10 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$  этот предмет станет спутником Земли, т. е. будет вокруг нее вращаться. Земля — центр этого вращения. Однако в изотропной и однородной Вселенной такой центр отсутствует! В такой Вселенной нет избранной точки, вокруг которой могло бы что-нибудь вращаться. Следовательно, отсутствуют стационарные замкнутые орбиты. Существование стационарных космических систем (планеты, галактики и т. д.) не опровержение этого заключения, поскольку сами космологические постулаты имеют лишь приближенный характер — в малом Вселенная неоднородна<sup>18</sup>, а основные космологические постулаты следует понимать как требование однородности и изотропии в масштабах, сравнимых с размерами  $R_u$  Вселенной  $\sim 10^{28} \text{ см}$ .

Таким образом, в процессе эволюции Вселенной в указанных предположениях возможны лишь два исхода — аналогии возвращению брошенного предмета либо его уходу в бесконечность. Оба случая означают нестационарность Вселенной.

Перейдем далее к количественному анализу эволюции Вселенной на основе ньютоновской теории тяготения.

В основе модели Вселенной лежит еще одно допущение, которое нельзя назвать постулатом, поскольку оно вытекает из современных экспериментальных данных. Это предположение о том, что динамика расширения Вселенной определяется исключительно гравитационным взаимодействием. Действительно, если расстояние между частицами  $r$  превышает размеры  $r_N$  адронов ( $r_N \sim 10^{-13} \text{ см}$ ), то короткодействующие взаимодействия (сильное и слабое) не могут играть роли. На ранних стадиях расширения, когда  $r < 10^{-13} \text{ см}$ , короткодействующие силы не влияют на динамику расширения по несколько другой причине: эти силы взаимодействия двух или сравнитель-

<sup>18</sup> К обсуждению этого вопроса мы вернемся несколько позже (см. разд. 6 наст. гл.).

но немногих частиц, в то время как гравитационное воздействие на каждую из частиц есть сумма сил от всех частиц Вселенной. Дальнодействующее электромагнитное взаимодействие не играет роли из-за электронейтральности Вселенной. Силы, обусловленные положительными и отрицательными зарядами, компенсируют друг друга.

Итак, судьба Вселенной в целом определяется гравитационным взаимодействием. Постулаты однородности и изотропии приближенно соответствуют образу однородного и изотропного шара. Следовательно, в нашей модели (ньютоновское приближение) динамика Вселенной сводится к задаче об эволюции однородного и изотропного шара в собственном гравитационном поле.

Для решения этой задачи мы воспользуемся известным выводом из классической ньютоновской теории, который мы приведем без математических выкладок: на любое точечное тело, находящееся внутри гравитирующей однородной сферы с радиусом  $R$ , действуют лишь частицы, расположенные внутри сферы с радиусом  $r$ , где  $r$  — расстояние тела до центра сферы (рис. 6). Частицы, находящиеся вне сферы с радиусом  $r$ , не действуют на тело (их суммарное действие полностью взаимно компенсируется). Воздействие же частиц, находящихся внутри сферы, эквивалентно тому, что вся масса, заключенная в сфере с радиусом  $r$ , находится в ее центре. Иначе говоря, сила  $F$ , действующая на тело с массой  $m$ , находящееся на расстоянии  $r$ , равна

$$F = -GMm/r^2, \quad (11)$$

где  $M$  — суммарная масса вещества, заключенного в сфере с радиусом  $r$ . Знак минус определяется тем, что гравитационные силы — силы притяжения. Мы в дальнейшем положим  $m = 1$  и  $r = R_u$ ;  $M = M_u$ , где  $R_u$ ,  $M_u$  — радиус и масса Вселенной. Тогда уравнение (11) можно переписать в форме

$$d^2R_u/dt_u^2 = -GM_u/R_u^2. \quad (12)$$

Полагая, что масса  $M_u$  шара остается неизменной<sup>19</sup> в процессе эволюции Вселенной, легко написать интеграл этого уравнения:

$$\frac{1}{2} (dR_u/dt_u)^2 - GM_u/R_u = E, \quad (13)$$

где  $E$  — постоянная интегрирования.

<sup>19</sup> Такое допущение соответствует пренебрежению влиянием излучения, которое анализируется в следующем разделе.

Последнее уравнение имеет простую интерпретацию, и мы бы могли его написать, не решая уравнение (12). Соотношение (13) — закон сохранения энергии «изолированного» (краевого) элемента Вселенной с массой  $m = 1$ . Оправдание «изоляции» — закон Хаббла. Все элементы, находящиеся внутри сферы, имеют скорость, меньшую,

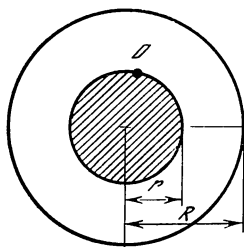


Рис. 6. Иллюстрация гравитационного воздействия на элемент  $O$ , находящийся внутри однородной гравитирующей сферы

На элемент  $O$  действует лишь вещество, расположенное внутри сферы с радиусом  $r$ , и так, как будто оно было сосредоточено в центре этой сферы

чем скорость  $v = dR_u/dt_u$  элемента, расположенного на границе  $R_u$ , и поэтому не могут догнать его.

Из уравнения (13) можно сделать важнейшие заключения. Если  $E > 0$ , то скорость  $v = dR_u/dt_u$  никогда не может обратиться в нуль (член  $-GM_u/R_u$  имеет всегда отрицательный знак); если же  $E < 0$ , то существует такое значение  $R_u$ , при котором  $v = 0$ . Этот вывод можно интерпретировать следующим образом. Случай  $E > 0$  соответствует ситуации, когда кинетическая энергия  $1/2 v^2$  превышает потенциальную  $GM_u/R_u$ , и поэтому начавшееся расширение шара будет продолжаться неограниченно (аналог второй космической скорости). Этот случай соответствует так называемой открытой Вселенной. В противоположном случае ( $E < 0$ ) возможно равенство  $v = 0$ . В момент, когда скорость обращается в нуль, расширение Вселенной сменится сжатием; такой случай называется закрытой Вселенной. Зависимость  $R_u(t_u)$  для закрытой и открытой Вселенной представлена на рис. 7.

Уравнение (13) можно представить в более удобном виде, когда характеристики эволюции Вселенной имеют особенно простую форму. Положим в соответствии с законом Хаббла  $dR_u/dt_u = HR_u$  и  $M_u = 4/3\pi\rho R_u^3$  ( $\rho$  — средняя плотность). Тогда уравнение (13) имеет вид

$$H^2 - \frac{8\pi}{3} \rho G = 2E/R_u^2. \quad (14)$$

Из этого уравнения следует, что Вселенная открыта, т. е. расширяется неограниченно ( $E > 0$ ), если  $\rho < \rho_c$ ,

Вселенная закрыта (расширение сменится сжатием) ( $E < 0$ ), если  $\rho > \rho_c$ . Величина  $\rho_c = 3H^2/8\pi G$  — так называемая критическая плотность. Характер эволюции Вселенной определяется простой связью между параметрами  $\rho$  и  $H$ . В современную эпоху величина  $H_0 \sim (3-5) \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$ ; соответствующее значение  $\rho_{c0} \sim \sim 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  (0 показывает, что величины относятся к современной эпохе).

Для количественного описания эволюции Вселенной нужно решить уравнения (13) или (14). Чтобы упростить эту процедуру, мы положим  $E = 0$ . Существуют два оправдания для этого упрощения. Во-первых, наблюдательные данные (см. далее) свидетельствуют в пользу этого допущения, и, во-вторых, при достаточно малых  $R_u$  (в начале расширения) член  $GM_u/R_u$  имеет достаточно большое значение, оправдывающее пренебрежение величиной  $E$  (при  $R_u \rightarrow 0$ ,  $|E| \ll GM_u/R_u$ ).

В принятом нами приближении уравнение (13) имеет простое решение

$$\frac{2}{3} R_u^{3/2} = (2GM_u)^{1/2} t_u + \text{const.}$$

Будем отсчитывать время ( $t_u = 0$ ) от момента, когда  $R_u = 0$ . Тогда окончательно получим

$$R_u(t_u) = \left( \frac{9}{2} GM_u \right)^{1/3} t_u^{2/3},$$

$$\rho(t_u) = \frac{1}{6\pi G t_u^2}, \quad H(t_u) = \frac{2}{3t_u}. \quad (15)$$

В монографиях, посвященных космологии, приводится более сложное выражение для постоянной Хаббла. Это усложнение обусловлено ограниченностью закона Хаббла, записанного в форме (10). Мы использовали в наших рассуждениях нерелятивистское приближение. В рамках общей теории относительности пространство искривляется, что приводит к небольшому изменению соотношения (10) и определения постоянной Хаббла. Однако, поскольку нам не потребуется точное выражение этой по-

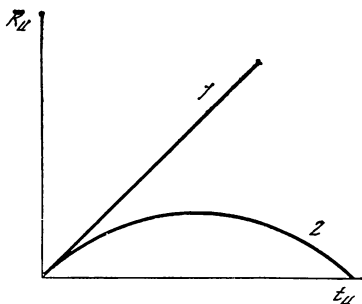


Рис. 7. Зависимость  $R_u(t_u)$  для открытой (1) и закрытой (2) Вселенной

стоянной, мы используем ее упрощенную форму. Таким образом, по определенному из наблюдений значению постоянной Хаббла рассчитывается время существования Вселенной  $t_u \sim H^{-1}$ .

Далее остановимся на волнующем вопросе о судьбе нашей Вселенной: является она открытой либо закрытой? К сожалению, на этот вопрос сейчас нельзя дать однозначный ответ. Достаточно хорошо измерена средняя плотность вещества  $\rho_g$  излучающих областей галактик. Оказалось, что  $\rho_g \sim 10^{-30} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3} \sim 0,1 \rho_c$ . Казалось бы, отсюда можно сделать вывод, что наша Вселенная открыта. Однако такое заключение преждевременно, а может быть, и ошибочно. Источник неопределенности — отсутствие методов регистрации «темного» неизлучающего вещества. Таким веществом могут быть следующие объекты: звезды малых масс, расположенные на периферии галактик, нейтронные звезды, черные дыры, нейтрино, гравитоны и т. д. Есть серьезные основания полагать, что истинная плотность вещества примерно на порядок превышает наблюдаемую. Эта аргументация основана на хорошо установленном факте — стационарности большей части скоплений галактик. Чтобы обеспечить эту стационарность, нужно удовлетворить условию равновесия (теорема вириала), которое позволяет оценить массу скоплений галактик. Эта масса и оказывается примерно на порядок больше значения, определенного по излучению скоплений галактик. Хотя природа «темных» объектов не установлена (проблема скрытой массы), тем не менее приведенная аргументация указывает на то, что истинное значение плотности вещества, возможно, на порядок больше наблюдаемого, и, следовательно,

$$\rho \sim \rho_c^{20}. \quad (16)$$

На вопрос о характере эволюции Вселенной сейчас нельзя дать однозначный ответ.

Наши рассуждения проводились в рамках ньютоновской теории. Может возникнуть впечатление, что общая теория относительности была лишь вспомогательным аппаратом, полезным при конструировании модели Вселенной, но совершенно излишним при ее интерпретации. Такое мнение неверно. Дело заключается в том, что хотя ньютоновская теория приводит к результатам, совпадаю-

<sup>20</sup> Это соотношение оправдывает упрощающее допущение  $E = 0$  в уравнении (13).

щим с выводами теории относительности, тем не менее ньютоновское приближение не вполне последовательно. Эта непоследовательность становится очевидной, когда мы попытаемся совместить основные космологические постулаты (однородность, изотропию) с принятой нами шаровой моделью Вселенной. Ясно, что на границе шара никакой однородности и изотропии нет (эти свойства выполняются приближенно лишь для внутренних областей шара). Теория относительности полностью устраняет эту непоследовательность. В этой теории пространство, в котором заключена Вселенная, само определяется параметром  $\rho$ .

Проще всего иллюстрировать это положение для случая  $\rho > \rho_c$  (закрытая Вселенная). В этом случае Вселенная — замкнутый объем в трехмерном, вообще говоря, неевклидовом пространстве. Хотя этот объем конечен, однако в нем отсутствуют границы, свойственные шару в рассмотренной ранее модели. Некоторое представление о конечном объеме без границ может дать поверхность сферы. С математической точки зрения поверхность сферы — двумерное пространство, полностью однородное и изотропное (отсутствие выделенного направления). Однако это пространство не имеет границ. Поверхность сферы — классический пример конечного пространства без границ.

Эпитет «некоторое» подчеркивает неполноту приведенного примера. Дело в том, что поверхность сферы — двумерное образование, в то время как Вселенная занимает трехмерный объем. К сожалению, дать наглядный пример конечной, но безграничной трехмерной конструкции невозможно.

Остается лишь подчеркнуть, что общая теория относительности дает последовательное и адекватное описание Вселенной, хотя некоторые проблемы (см., например, разд. 6 наст. гл.) нельзя считать окончательно решенными.

### 3. ГОРЯЧАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Физическая материя существует в двух формах: вещества и излучения. Анализ, проведенный в предыдущем разделе, строго говоря, включал допущение, что Вселенная состоит только из вещества. Более того, предполагалось, что это вещество холодное в следующем смысле: кинетическая энергия вещества много меньше

его массы покоя. Это так называемая модель холодной Вселенной, господствовавшая до середины 60-х годов. Что же произошло в середине 60-х годов? Случилась одна из тех удивительных историй, которыми так богат извилистый путь космологии. Два молодых американских радиоастронома Пензиас и Вильсон в 1965 г. занимались обычным делом: анализом шумов больших антенн. Постепенно устраняя один за другим земные и космические (Солнце, Галактика) шумы и помехи <sup>21</sup>, они не могли справиться с еле заметным фоном с эффективной температурой  $T \sim 3$  К. Этот фон не устранялся и не имел тривиальной интерпретации. Необычность этого фона заключалась также в его изотропии. Так певедомо для авторов работы, получивших впоследствии Нобелевскую премию, начинался новый этап в космологии.

Случай, сведший радиоастрономов и космологов, позволил дать обнаруженному излучению, названному впоследствии реликтовым, следующую интерпретацию. Этот шум — почти символический остаток метagalактического излучения, когда-то доминировавшего во Вселенной. Эта интерпретация и привела к убеждению, которое сейчас имеет всеобщий характер: задание начальных условий расширения Вселенной в виде холодного вещества неверно. Заодно вспомнили и о высказывании Гамова (1948 г.) — в начале расширения Вселенной она была заполнена излучением (модель горячей Вселенной).

Почему доминирование излучения в начале расширения существенно меняет характер эволюции Вселенной? Ответ сравнительно прост и заключается в том, что адиабатическое расширение шаровых объемов, заполненных веществом и излучением, имеет весьма различный характер. Здесь важно то, что, в то время как полное число фотонов, заключенное в шаре, остается неизменным во время расширения, их длина волны  $\lambda$  увеличивается пропорционально радиусу шара  $R$ . Следовательно, и температура  $T$ , и энергия фотонов уменьшаются с возрастанием  $R$ .

Итак, горячая модель (в ньютоновском приближении) сводится к анализу эволюции шара, заполненного излучением и находящегося в собственном гравитационном поле. Разумеется, этот анализ также основывается на уравнениях (13), (14), использованных в предыдущем

---

<sup>21</sup> Одна из трудностей, с которыми пришлось столкнуться Пензиасу и Вильсону, — устранение радиопомех, вызванных голубями, свившими себе гнездо в рупоре антены,

разделе. Следует лишь несколько по-иному расшифровать входящие в них величины:

пусть  $\varepsilon$  — плотность энергии излучения; из эквивалентности массы и энергии следует

$$\rho = \varepsilon/c^2. \quad (17)$$

Поскольку длина волны  $\lambda \propto R$  и, следовательно, энергия фотонов  $E_\gamma \propto R^{-1}$ , можно написать

$$\varepsilon = \frac{3N}{4\pi R_u^3} \frac{2\pi\hbar c}{\lambda} = aR_u^{-1}, \quad (18)$$

где  $N$  — общее число фотонов,  $a$  — постоянная. Используя равенство  $M_u = \frac{4}{3}\pi\rho R_u^3$  и соотношения (17), (18), можно уравнение (13) переписать в форме

$$\frac{1}{2} (dR_u/dt_u)^2 - \frac{4}{3} \pi aG/c^2 R_u^2 = 0. \quad (19)$$

(Мы положили, как и ранее,  $E = 0$ .) Решение этого уравнения имеет вид

$$R_u = \left( \frac{32\pi}{3} \frac{aG}{c^2} \right)^{1/4} t_u^{1/2}. \quad (20)$$

Зависимость «размера»  $R_u$  Вселенной от  $t_u$  более слабая, чем в модели холодной Вселенной (см. (15)). Используя (18) и хорошо известное из термодинамики черного излучения равенство

$$\varepsilon = \sigma T^4 \quad (21)$$

( $\sigma = \pi^2 k^4/15 (\hbar c)^3$  — постоянная Стефана—Больцмана), можно получить следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_u) &= \frac{3}{32\pi} \frac{c^2}{G t_u^2}, \\ T_u(t_u) &= \left( \frac{45}{32\pi^3 G} \frac{c^5 \hbar^3}{k^4} \right)^{1/4} t_u^{-1/2}, \\ H(t_u) &= \frac{1}{2t_u}. \end{aligned} \quad (22)$$

Последние два соотношения имеют особый интерес, поскольку они могут проверяться на опыте<sup>22</sup>. Подставляя численные значения констант в выражение для темпера-

<sup>22</sup> Первые два равенства связаны соотношением (21), и, следовательно, взаимно зависимы.



туры  $T_u$ , получаем весьма простое соотношение

$$T_u (\text{град}) \sim \frac{10^{10}}{[t_u]^{1/2}}. \quad (23)$$

Полагая время существования Вселенной  $t_u \sim 3 \cdot 10^{17}$  с, получаем, что в нашу эпоху  $T_u \sim 10$  К, что согласуется (по порядку величины) с обнаруженным значением  $T_u \sim \sim 3$  К. Это совпадение следует считать весьма удовлетворительным, поскольку наша модель горячей Вселенной — значительная идеализация. Мы пренебрегли очевидным фактом существования во Вселенной вещества. Существующая Вселенная имеет смешанный характер: она состоит из вещества и излучения. В современную эпоху плотность энергии  $\epsilon_m$  вещества существенно преобладает над плотностью энергии  $\epsilon_r$  излучения:  $\epsilon_m \sim 10^{-8} \div \div 10^{-9}$  эрг·см<sup>-3</sup>, в то время как  $\epsilon_r \sim 10^{-12}$  эрг·см<sup>-3</sup>;  $\epsilon_r/\epsilon_m \sim 10^{-4} \div 10^{-3}$ . Поскольку в модели горячей Вселенной зависимость  $\epsilon_m$  и  $\epsilon_r$  от  $R_u$  имеет различный характер, то и отношение  $\epsilon_m/\epsilon_r$  меняется с  $R_u$ :

$$\epsilon_m/\epsilon_r \propto R_u.$$

Следовательно, в развитии Вселенной существовал период, когда  $\epsilon_m \sim \epsilon_r$ . Используя эту зависимость, легко получить, что эта «переломная» эпоха наступила при  $t_u^* \sim 10^3 \div 10^4$  лет  $\sim 10^{11}$  с. При  $t_u < t_u^*$  преобладало излучение (эра излучения); при  $t_u > t_u^*$  — вещество (эра вещества).

Значение  $t_u \sim t_u^*$  играет важную роль в эволюции Вселенной. Именно в этот период создаются условия, необходимые для формирования галактик (см. разд. 6 наст. гл.). Кроме того, тогда же практически прекращается взаимодействие излучения с веществом. Излучение лишь меняет длину волны, что, однако, не изменяет форму спектра, который, естественно, соответствует спектру черного излучения — распределению Планка. Детальные и многочисленные измерения реликтового излучения, проведенные в диапазоне длин волн  $\lambda \sim 1$  мм  $\div \div 10$  см, продемонстрировали превосходное согласие результатов измерения с планковским спектром при  $T_u \sim 2,7$  К.

Этот факт является решающим подтверждением правильности основных допущений, положенных в основу модели горячей Вселенной.

Подкреплением общих идей расширяющейся Вселенной является совпадение времени существования Все-

ленной ( $t_u \sim 10^{10}$  лет), определенного по формуле (22), с измеренным временем существования многих космических объектов. В частности, довольно хорошо измеренный возраст Земли (по концентрации различных радиоактивных элементов) дает значение —  $5 \cdot 10^9$  лет. Возраст наиболее старых звезд дает тот же порядок величины  $\sim 10^{10}$  лет. Существование реликтового излучения доказывает, что в начале расширения Вселенная была горячей. Важность этого аргумента трудно переоценить. Поэтому целесообразно подвести некоторые итоги исследований реликтового излучения.

Изучение его энергетического спектра продемонстрировало, что он хорошо представляется распределением Планка с температурой  $T_0 = 2,7$  К. С высокой степенью точности была показана изотропия реликтового излучения. Это обстоятельство доказывает его внегалактическую природу. В противном случае (галактическое происхождение) оно неизбежно отражало бы существенную несферичность Галактики и, следовательно, было бы анизотропным.

Эти факты количественно согласуются с предсказаниями теории горячей Вселенной и, в частности, доказывают один из основных космологических постулатов — ее изотропию. Из спектрального распределения реликтового излучения можно вычислить его плотность энергии  $\epsilon_{r0}$ , среднюю энергию фотона  $E_{r0}$  и их концентрацию  $n_{r0}$ . Численно  $\epsilon_{r0} \sim 1$  эВ  $\cdot$  см $^{-3}$ ,  $E_{r0} \sim 10^{-3}$  эВ и  $n_{r0} \sim 10^3$  см $^{-3}$ .

Несмотря на большую концентрацию  $n_{r0}$ , фотоны реликтового излучения не оказывают практически никакого влияния на процессы, происходящие на Земле. Это обстоятельство — следствие малого значения энергии  $E_{r0}$  фотонов.

#### 4. БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Абсолютно достоверно известно, что Земля и все находящиеся на ней предметы состоят из нейтронов, протонов и электронов. На Земле и в околоземном пространстве полностью отсутствуют антипротоны. Это явление (которое, как мы увидим далее, имеет глобальный характер) называется барионной асимметрией. Тщательные измерения потоков солнечных космических лучей, возникающих во время солнечных вспышек, продемонстрировали полное отсутствие антипротонов в недрах Солнца.

Крайне незначительный поток позитронов в составе солнечных космических лучей естественно приписывается взаимодействию с веществом первичных солнечных космических лучей (протонов, электронов и фотонов). Это обстоятельство позволяет заключить о практическом отсутствии позитронов на Солнце.

Аналогичный метод можно использовать для доказательства отсутствия антивещества во всей Галактике. Сейчас можно считать твердо установленным, что подавляющая часть космических лучей с энергией, большей 1 ГэВ, образуется в пространстве Галактики. Детальные исследования состава галактических космических лучей также продемонстрировали, что незначительные потоки позитронов и антипротонов в галактических космических лучах непринужденно объясняются вторичными процессами. Следовательно, в Галактике антивещество отсутствует. Более сложным является прямое доказательство отсутствия антивещества в других галактиках или во Вселенной в целом. Трудность состоит в том, что (сейчас) единственный канал информации о процессах, происходящих в других галактиках, — электромагнитное излучение. Но антивещество излучает фотоны абсолютно так же, как и вещество. Поэтому по спектрам излучения других галактик нельзя решить вопрос: из чего они состоят — из вещества или антивещества.

Доказательство повсеместной, глобальной зарядовой асимметрии очень существенно, поскольку этот факт весьма нетривиален и стимулирует вопрос о ее истоках. Действительно, будучи предположенной, зарядовая симметрия Вселенной отражала бы глубокую связь между микро- и макромиром. В конечном счете Вселенная состоит из элементарных частиц, и поэтому естественно было ожидать совпадения (или, по крайней мере, согласия) между законами, управляющими микромиром, и законами, управляющими Вселенной. Но в теории элементарных частиц до рубежа 50-х и 60-х годов <sup>23</sup> господствовало убеждение о полной тождественности частиц и античастиц, кроме знака их зарядов. Этот факт проявляется в следующем мысленном эксперименте. Если, например, в замкнутой системе, состоящей из частиц с положительными и отрицательными зарядами, поменять у всех частиц знаки зарядов, то движение пробной частицы с измененным зарядом останется неизменным.

---

<sup>23</sup> О том, что произошло в этот период, рассказывается далее.

Более глубокое обоснование принцип зарядовой симметрии получил в уравнениях Дирака, являющихся основой квантовой электродинамики. В рамках этой теории частицы и античастицы тождественны (кроме знака заряда). Таким образом, на микроуровне принцип зарядовой симметрии казался незыблемым. Вполне естественно распространение его на всю Вселенную. Именно это стремление пронизывало космологию до середины 60-х годов. В этот период была весьма популярна гипотеза: во Вселенной существуют в равной пропорции галактики, состоящие из вещества, и галактики из антивещества («антигалактики»). Однако в простейшем варианте: Вселенная состоит из галактик и антигалактик и не содержит никаких иных структур — эта гипотеза просуществовала недолго.

Галактики, помимо электромагнитного излучения, испускают также и частицы. Наша Галактика испускает протоны и электроны. Антигалактика должна была бы испускать антипротоны и позитроны. Например, если бы ближайшее к нам гигантское скопление звезд — Андромеда — было бы антигалактикой, то оно испускало бы значительное число позитронов, которые, встречаясь в межгалактическом пространстве с электронами, испущенными нашей Галактикой, аннигилировали бы по схеме  $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$  ( $\gamma$  — гамма-квант).

В основном эта реакция происходит при малых кинетических энергиях электронов и позитронов. Поэтому энергия  $E_\gamma$  каждого из квантов, возникших в реакции аннигиляции, должна равняться

$$E_\gamma \sim m_e c^2 \sim 0,51 \text{ МэВ.}$$

Такие кванты практически беспрепятственно проходят Галактику и могут достигнуть границ атмосферы Земли. В конце 60-х годов начала бурно развиваться гамма-астрономия, регистрирующая  $\gamma$ -кванты начиная с энергии  $E_\gamma \sim 0,1$  МэВ. Поэтому значительное избыточное интенсивное излучение с энергией  $E_\gamma \sim 0,5$  МэВ было бы неминуемо замечено в первых довольно грубых наблюдениях. Никакого заметного превышения интенсивности над фоном в области  $E_\gamma \sim 0,5$  МэВ не было обнаружено, что противоречит простейшей гипотезе существования антигалактик.

Для спасения этой гипотезы было выдвинуто предположение о существовании новых структурных элементов —

магнитных «стенок», отделяющих галактики от антигалактик.

Однако и подобная, сравнительно сложная конструкция не смогла спасти гипотезу существования антигалактик. Во-первых, выяснилось, что никакие магнитные стенки не могут полностью разделить электроны и позитроны. Просачивание частиц сквозь гипотетические магнитные стенки должно было привести к появлению избыточного излучения  $E_\gamma \sim 0,5$  МэВ, которое было бы зарегистрировано более совершенными приборами, используемыми в гамма-астрономии. Во-вторых, энергия магнитных стенок должна была быть настолько большой, что их существование привело бы к искажению наблюдаемой изотропии реликтового излучения. И последнее: в гипотезе магнитных стенок один вопрос — причина зарядовой асимметрии Вселенной — заменялся другим: какие процессы привели к появлению магнитных стенок? Поэтому к середине 60-х годов в вопросе о зарядовой симметрии воцарилось некоторое уныние, воплощенное в утверждении: зарядовая асимметрия возникла в момент рождения Вселенной — в момент, когда она проходила через сингулярное состояние <sup>24</sup>. Однако именно в этот период в космологии произошел один из удивительных поворотов, с которыми мы уже неоднократно встречались.

В 1967 г. была выдвинута идея объяснения зарядовой асимметрии Вселенной. Вначале эта идея была принята с недоверием, поскольку она содержала кардинально новые элементы. Однако на рубеже 70-х и 80-х годов в связи с развитием единой теории взаимодействий (см. разд. 5 гл. 1) эта идея получила широкое распространение и завоевала всеобщую популярность. Упомянутая идея основана на двух гипотезах: барионное число не является строго сохраняющейся величиной; зарядовая симметрия не абсолютно точная симметрия.

Поясним некоторые детали гипотезы. Барионное число — разность между числом барионов и антибарионов. В простейшем и наиболее важном варианте — обычных земных условиях — барионное число — это сумма чисел протонов и нейтронов. В данном случае несохранение барионного числа означает возможность распада протона.

<sup>24</sup> Заметим, что космологическая сингулярность (т. е. момент, когда плотность энергии и температура обращаются в бесконечность) часто играет роль «ковра, под который прячут космологический мусор», т. е. явления, необъяснимые в рамках стандартной модели Вселенной.

Впервые гипотеза распада протона (см. разд. 6 гл. 1) пришла из космологии задолго до создания теории объединения трех взаимодействий!

Остановимся далее на вопросе о зарядовой симметрии. Выше отмечалось, что частицы и античастицы симметричны относительно взаимодействий. Однако это утверждение было доказано лишь для сильного и электромагнитного взаимодействий. Уже в 1956 г. было продемонстрировано, что слабо взаимодействующие нейтрино и антинейтрино отличаются не зарядом (обе частицы, разумеется, электронейтральны), а новым квантовым числом — спиральностью. Спиральность — это относительное направление векторов спина и импульса. Для антинейтрино направления спина и импульса совпадают; для нейтрино оба вектора направлены в противоположную сторону. Однако казалось незыблемым положением основное правило преобразований частиц, основанное на принципе зарядовой симметрии. Частица  $a$  распадается на частицы  $b$  и  $c$  с вероятностью  $W_{a \rightarrow b+c}$ , которая тождественна вероятности  $W_{\bar{a} \rightarrow \bar{b}+\bar{c}}$  распада античастицы  $\bar{a}$  на античастицы  $\bar{b}$  и  $\bar{c}$ . Но именно это положение было подвергнуто сомнению в 1964 г. Фитчем и Крониным, фактически показавшими для частного случая (который оказался пока что и единственным), что в случае распада  $K$ -мезонов это правило не выполняется. Хотя вероятность  $W_{a \rightarrow b+c}$  крайне мало (примерно на 0,1 %) отличалась от  $W_{\bar{a} \rightarrow \bar{b}+\bar{c}}$ , тем не менее сам факт нарушения зарядовой симметрии в этом аспекте имел важнейшее значение, и авторы открытия Фитч и Кронин были удостоены Нобелевской премии <sup>25</sup>.

Теперь пора вернуться к нашей теме — барионной асимметрии Вселенной. Ясно, что лишь совокупность двух допущений (несохранения барионного числа и зарядовой симметрии) достаточна для возникновения барионной асимметрии Вселенной.

Нарушение барионного числа при равенстве  $W_{a \rightarrow b+c} = W_{\bar{a} \rightarrow \bar{b}+\bar{c}}$  приводило лишь к тому, что протоны и антипротоны распадались бы одинаково, что не нарушало бы зарядовой симметрии Вселенной. Нарушение зарядовой симметрии при сохранении барионного числа никак не

<sup>25</sup> Любопытно отметить, что нарушение зарядовой симметрии оказалось настолько слабым, что сразу же после доклада Фитча и Кронины обсуждалась «гипотеза» объяснения эффекта — случайно залетевшая в установку муха.

повлияло бы на относительный баланс протонов и антипротонов. Поэтому для интерпретации барионной асимметрии Вселенной необходимы оба допущения.

Несмотря на кажущуюся простоту описываемого объяснения барионной асимметрии, гипотеза о несохранении барионного числа в конце 60-х годов казалась нетривиальной. Однако совершенно новое звучание подобная интерпретация барионной асимметрии приобрела в связи с теорией большого объединения (см. разд. 5 и 6 гл. 1). В рамках этой теории несохранение барионного числа вполне естественно. Это обстоятельство было главным фактором, обусловившим исключительный интерес к интерпретации барионной асимметрии на основе гипотезы о несохранении барионного числа.

Другой фактор заключался в том, что и несохранение зарядовой симметрии элементарных частиц также естественно включалось в теорию большого объединения. В частности, большую популярность приобрела схема Кобаяши—Маскава, объясняющая нарушение зарядовой симметрии при минимальном числе фундаментальных частиц<sup>26</sup>. В этой схеме минимальное число лептонов (и кварков) равно шести, что согласуется с современными данными. Сейчас обнаружено пять лептонов ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ) и пять кварков, но мало кто сомневается в существовании шестого лептона ( $\tau$ -нейтрино) и кварка. Любопытно отметить, что в год публикации схемы Кобаяши—Маскавы были известны лишь три кварка. Тяжелые частицы («очарованные» и «прелестные»), состоящие из тяжелых кварков, были обнаружены впоследствии.

Рассмотрим далее некоторые конкретные аспекты интерпретации зарядовой асимметрии Вселенной на основе большого объединения. В этой теории существуют сверхтяжелые  $X$ -бозоны с массой  $\sim 10^{16}$  ГэВ и зарядами  $\pm \frac{2}{3}e$ ,  $\pm \frac{4}{3}e$  (см. разд. 5 гл. 1).  $X$ -бозоны могут, например, распадаться по схемам

$$\begin{aligned} X^+ &\rightarrow \bar{q}_1 + e^+, \\ X^- &\rightarrow q_1 + e^-, \\ X^+ &\rightarrow 2q_2; \end{aligned} \tag{24}$$

Заряды  $\bar{q}_1$ ,  $q_1$  равны  $\pm \frac{1}{3}e$ ; заряд  $q_2$  равен  $\frac{2}{3}e$ . В дальнейшем два кварка  $q_2$  объединяются с кварком  $q_1$ , образуя

<sup>26</sup> Признание этой схемы отражается в Нобелевских лекциях Фитча и Кронина.

протон. Ясно, что во всех реакциях (24) барионное число не может сохраняться; в результате образуются частицы с разными барионными числами. В первых двух реакциях оно равно  $\pm 1/3$ , а в последней  $2/3$ . Далее оказывается, что вследствие несохранения зарядовой симметрии вероятности осуществления первых двух распадов отличаются друг от друга. Следовательно, например, число рождающихся кварков  $q_1$  превышает число антикварков  $\bar{q}_1$ , что и является основой возникновения асимметрии. Этот процесс особенно эффективно протекает на очень ранних стадиях расширения Вселенной ( $t_u \sim 10^{-30} \div 10^{-40}$  с).

Проводились многочисленные теоретические проверки описанной схемы. Количественной мерой барионной асимметрии является отношение  $S = n_\gamma/n_p$  ( $n_\gamma$ ,  $n_p$  — соответственно концентрации фотонов и протонов). Это отношение на протяжении большей части эволюции Вселенной остается неизменным. Величина  $S$  характеризует отношение концентрации нейтральной компоненты материи к концентрации заряженной. В соответствии с наблюдательными данными  $S \sim 10^8 \div 10^{10}$ . Теоретические оценки на основе теории большого объединения уверенно предсказывают для граничного значения  $S > 10^5$ . Наиболее правдоподобное теоретическое значение этой величины  $S \sim 10^9 \div 10^{10}$ . Эти оценки являются косвенным (и пока единственным) подтверждением теории большого объединения.

В заключение отметим, что нарисованная здесь элегантная картина возникновения барионной асимметрии Вселенной приобрела бы большую законченность после обнаружения распада протона (см. разд. 6 гл. 1).

## 5. КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ ГЕЛИЯ

В течение двух десятилетий, прошедших после пионерской работы Гамова, Альфера и Хермана (1948 г.), усилиями многих физиков и астрофизиков была создана самосогласованная и признанная теория синтеза химических элементов. Пути создания этой теории были весьма извилистыми и изобиловали догадками и заблуждениями. Ее успех стимулировался значительным прогрессом в накоплении наблюдательных данных. Перечислим эти данные по порядку.

1. Распределение гелия в Галактике и Вселенной приблизительно равномерно.



2. Относительная концентрация гелия во Вселенной примерно равна 6%, что приводит к относительному содержанию гелия по массе 25% (ядро гелия —  $\alpha$ -частица, в 4 раза тяжелее протона).

3. Более тяжелые элементы распределены в Галактике неравномерно, концентрируясь вблизи звезд и их скоплений.

Кроме этих экспериментальных фактов, на развитии теории нуклеосинтеза сказались два простых, но очень существенных рассуждения. Первое состоит в том, что столь большое содержание гелия не могло бы возникнуть в результате ядерного синтеза, происходящего в недрах звезд (см. разд. 7 наст. гл.). Чтобы объяснить такой большой процент, нужно было бы допустить слишком большое энерговыделение в результате нуклеосинтеза гелия в звездах. Расхождение между результатами оценок энерговыделения и наблюдениями превышает порядок.

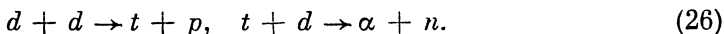
Другое соображение связано со специфической особенностью изотопической структуры периодической системы Менделеева. Дело в том, что в ней отсутствует стабильный элемент с атомным номером  $A = 5$ . Поэтому простейший вариант синтеза элементов, более тяжелых, чем гелий, основанный на слиянии двух частиц (например, присоединение к  $\alpha$ -частице нейтрона), становится невозможным. Слияние двух ядер гелия (реакция  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$ ) с образованием  ${}^8\text{Be}$  сравнительно малоэффективно из-за большой величины кулоновского барьера ядер гелия, участвующих в реакции. Соответствующие оценки показали, что в процессах нуклеосинтеза на ранних стадиях расширения Вселенной реакции слияния сложных элементов играют малую роль. Более сложные варианты (тройные процессы образования тяжелых элементов на начальной стадии космологического расширения) также неэффективны из-за малой скорости этих процессов. Поэтому из всех приведенных данных (экспериментальных и теоретических) следует фундаментальный вывод:  $\alpha$ -частицы возникают в основном на первых этапах космологического расширения, в то время как более тяжелые элементы образуются в процессе эволюции звезд.

В этом разделе мы рассмотрим первый процесс; в разд. 7 анализируется теория синтеза тяжелых элементов в звездах.

Основное звено в космическом нуклеосинтезе — образование дейтона  $d$  по схеме



В дальнейшем дейтоны превращаются быстро в  $\alpha$ -частицы по различным каналам. Например, по схеме



Здесь  $t$  — ядро трития (один протон и два нейтрона).

Кинетика процессов образования гелия определяется в основном двумя факторами: 1) концентрацией нейтронов, необходимых для эффективного протекания реакции (25), и 2) реликтовым излучением, препятствующим осуществлению реакций (26) вследствие фоторасщепления дейтона  $\gamma + d \rightarrow p + n$ . Таким образом, для оценки окончательного значения концентраций  $\alpha$ -частиц нужно проследить изменения концентрации нейтронов и эффективности фоторасщепления в период эффективного протекания реакций (25), (26). Здесь мы ограничимся полуквантитативными оценками<sup>27</sup>.

Рассмотрим прежде всего качественный ход относительной концентрации нейтронов с температурой  $T_u$  Вселенной или временем  $t_u$ , отсчитываемым от начала расширения. Последние величины связаны простым соотношением (23), и поэтому, задавая, например, величину  $T_u$ , легко определить время  $t_u$ .

При очень высоких температурах  $T_u \gg m_p c^2/k \sim \sim 10^{13}$  К различие в свойствах протонов и нейтронов не сказывается. Поэтому отношение концентраций  $n_n/n_p \sim \sim 1$ . Однако по мере приближения температуры  $T_u$  к значению  $\Delta m_N c^2/k$  ( $\Delta m_N = m_n - m_p$ ) начинает играть существенную роль большая масса нейтрона сравнительно с массой протона:  $\Delta m_N \sim 1,3$  МэВ. Различие в концентрациях обусловлено тем, что протоны и нейтроны находятся в состоянии термодинамического равновесия, когда концентрации обуславливаются фактором Больцмана. Тогда относительная концентрация  $n_n/n_p \propto \exp(-\Delta m_N c^2/kT_u)$ . Этот фактор  $\sim 1$  при  $kT_u \gg \Delta m_N c^2$ , но он начинает катастрофически уменьшаться при  $kT_u \lesssim \Delta m_N c^2$ . Это рассуждение основывалось на существовании статистического равновесия, т. е. на существовании реакций взаимных переходов протонов и нейтронов.

<sup>27</sup> Детально теория нуклеосинтеза гелия изложена в следующих монографиях: *Пиблс П.* Физическая космология. — М.: Мир, 1975; *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Строение и эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1975; *Вайнберг С.* Гравитация и космология. — М.: Мир, 1975.

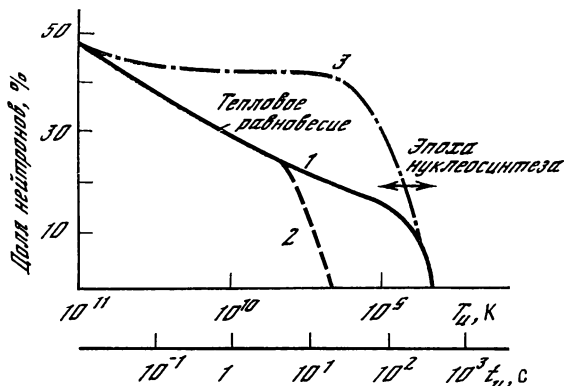
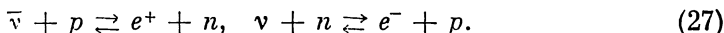


Рис. 8. Зависимость относительной доли нейтронов  $n_n/(n_n + n_p)$  от времени  $t_u$   
 1 — расчет при реальном значении  $\alpha_w$ , 2 — при значении  $\alpha_w' = 10\alpha_w$ , 3 — при значении  $\alpha_w' = 0,1 \alpha_w$

Детальный анализ показывает, что в области  $kT_u \lesssim \lesssim \Delta m_{NC^2}$  процессами, определяющими взаимные переходы протонов и нейтронов, являются реакции, обусловленные слабым взаимодействием:



Эти реакции определяют концентрацию нейтронов в интервале времени  $0,1 < t_u < 1$  с ( $10^{10} < T_n < 3 \cdot 10^{10}$  К). При  $t_u \gtrsim 10$  с вследствие уменьшенной концентрации нуклонов нейтрино практически без взаимодействия проходят Вселенную. Равновесие нарушается, и отношение  $n_n/n_p$  остается в этот период почти постоянным до эры нуклеосинтеза, т. е. до наступления момента, когда реакция расщепления дейтона фотонами реликтового излучения становится неэффективной. Тогда наступает время нуклеосинтеза ( $t_u \sim 200$  с;  $T_u \sim 10^9$  К); все нейтроны переходят в  $\alpha$ -частицы в соответствии с реакциями типа (25), (26). На рис. 8 сплошная кривая представляет отношение  $n_n/(n_n + n_p)$  как функцию времени  $t_u$  и температуры  $T_u$ . Стрелкой показан период эффективного нуклеосинтеза. Отношение концентраций по массе гелия и протонов равно удвоенному отношению  $n_n/(n_n + n_p)$ . Из графика, приведенного на рис. 8, следует, что доля гелия (по массе) равна приблизительно 25 %, что хорошо согласуется с наблюдательными данными. Это согласие в сочетании с отсутствием альтернативных объяснений большого содер-

жания гелия является значительным успехом модели горячей Вселенной, успехом, свидетельствующим в пользу того, что вплоть до времени  $t_u \sim 0,1 \div 1$  с основные положения модели правильны.

В заключение отметим весьма интересное и важное обстоятельство. Отношение концентраций  $\alpha$ -частиц и протонов по порядку величины равно единице и является следствием причудливой игры различных факторов, изменяющих это отношение в противоположные стороны. Мы в наших рассуждениях не учитывали нестабильность свободного нейтрона. Как известно, свободный нейтрон распадается по схеме  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$  с временем жизни  $\tau_n \sim 1000$  с. Это время существенно превышает время, когда эффективно происходит нуклеосинтез, и поэтому распадом нейтрона можно практически пренебречь. Этот фактор вносит в отношение  $n_\alpha/n_p$  примерно 10%-ную поправку. Однако ситуация кардинально изменилась бы, если бы параметры, определяющие время  $\tau_n$ , имели несколько иные значения. Из теории  $\beta$ -распада известно, что

$$\tau_n \propto \frac{1}{\alpha_w^2 (\Delta m_N)^5}.$$

Поэтому, например, если бы воображаемое значение  $\alpha_w$  константы слабого взаимодействия превышало значение  $\alpha_w$  во Вселенной примерно на порядок, то оказалось бы, что  $\tau_n \sim 10$  с, и практически ко времени осуществления нуклеосинтеза нейтронов бы не оказалось. Эта гипотетическая ситуация представлена на рис. 8 штриховой линией. В этом случае концентрация гелия оказалась бы равной нулю. Аналогичная ситуация возникла бы при увеличении  $\Delta m_N$  примерно вдвое.

В противоположном случае, при уменьшении значения  $\alpha_w$  на порядок, реакции (27) оказались бы неэффективными. Статистическое равновесие, обусловленное слабым взаимодействием, не осуществилось бы, и концентрации протонов и нейтронов оказались бы примерно равными вплоть до эры нуклеосинтеза (штрихпунктирная линия на рис. 8). В таком случае вследствие основной реакции (25) практически все протоны и нейтроны превратились бы в  $\alpha$ -частицы. Подробный анализ этих гипотетических ситуаций проведен далее (см. разд. 3 гл. 3).

## 6. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГАЛАКТИК

С. Вайнберг в книге «Первые три минуты»<sup>28</sup> писал: «Теория образования галактик является одной из открытых проблем астрофизики, кажущейся сегодня еще очень далекой от разрешения». Эту точку зрения известного американского физика, сформулированную в 1977 г., разделяют и сейчас (1983 г.) многие физики и астрофизики. Поэтому мы сконцентрируем свое внимание не на изложении весьма сложных и различных по своему подходу моделей происхождения галактик, а на анализе принципиальных трудностей построения такой теории и выводе некоторых условий, необходимых, но, увы, недостаточных для образования галактик.

Приведем характеристики основных структурных элементов Вселенной (табл. 5).

Таблица 5

Элементы	Размер		Масса	
	в пс*	в см	в $M_{\odot}$	в г
Скопления галактик	$10^6—10^7$	$10^{25}—10^{26}$	$10^{15}$	$10^{48}$
Галактики	$10^3—10^5$	$10^{21}—10^{23}$	$10^{10}—10^{12}$	$10^{43}—10^{45}$
Звезды	$10^{-8}—10^{-6}$	$10^{10}—10^{12}$	$10^{-1}—10^2$	$10^{32}—10^{35}$
Солнце	$0,5 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	1	$2 \cdot 10^{33}$

\* 1 пс =  $3 \cdot 10^{18}$  см.

Отметим, что данные, приведенные в табл. 5, не представляют полностью всего многообразия структурных элементов. Важный фактор, не нашедший отражения в табл. 5,— сравнительно плавный переход от звезд к галактикам и от галактик к скоплениям. Во Вселенной, помимо гигантских скоплений галактик, характеристики которых приведены в табл. 5, существуют скопления из нескольких галактик ( $\geq 2$ ). В галактиках существуют скопления звезд. Поэтому многообразие структурных элементов Вселенной отражает не только резко очерченная классификация: звезды—галактики—скопления галактик, но и переход от одиночных звезд к группам и далее к галактикам и скоплениям галактик. Однако приведенные в табл. 5 значения масс и размеров структурных элемен-

<sup>28</sup> М.: Энергоиздат, 1981, с. 76.

тов все же преобладают среди многообразия этих характеристик.

Рассмотрим далее физические принципы теории образования галактик. В основе всех моделей лежит известная еще Ньютону гравитационная неустойчивость. Эта неустойчивость обусловлена тем, что гравитационные силы — силы притяжения. Поэтому если в первоначально равномерно распределенном веществе возникнет флуктуационное превышение плотности над средней, то такая флуктуация должна, вообще говоря, привести к сжатию вещества. Эта идея была количественно сформулирована в середине 20-х годов английским астрофизиком Джинсом. Анализ основывался на общих механических законах, которые мы использовали при моделировании эволюции Вселенной (см. разд. 2 и 3 наст. гл.). Если  $E_k > E_p$  ( $E_k$ ,  $E_p$  — кинетическая и потенциальная энергия элемента вещества), то образование стационарного состояния невозможно; вещество будет разлетаться. В нашем случае это соответствует затуханию флуктуации. При условии  $E_k < E_p$  будет осуществляться сжатие; приблизительное равенство  $E_k \sim E_p$  приведет к равновесной конфигурации. Значение потенциальной энергии на пару частиц ( $p$ ,  $e^-$ ) очевидно:

$$E_p \sim GMm_p/R_s$$

где  $M$  и  $R$  — характеристические значения массы и радиуса флуктуации плотности. Несколько более сложна ситуация с кинетической энергией. Существует две ее формы: тепловая и лучистая энергия. По порядку величины тепловая энергия пары частиц равна  $kT$ ; энергия излучения, соответствующая паре ( $p$ ,  $e^-$ ), равна  $SE_\gamma$ , где  $S = n_\gamma/n_p$ , а  $E_\gamma$  — средняя энергия кванта излучения.

Тогда условия равновесия можно записать в форме

$$GMm_p/R \sim kT \quad (28)$$

(давление излучения не учитывается) либо

$$GMm_p/R \sim SE_\gamma \quad (29)$$

(давление обуславливается излучением).

Сжатие осуществляется, если левая часть уравнений (28), (29) превалирует над правой. Может создаться впечатление, что, задавая произвольно значения  $M$  и  $R$ , нетрудно удовлетворить условиям (28), (29). Именно так полагали во времена Джинса. Однако открытия расши-

рения Вселенной и реликтового излучения усложнили условия осуществления равновесия.

Рассмотрим вначале влияние расширения Вселенной. Как следует из соотношения Хаббла, частицы, находящиеся внутри флуктуации, движутся друг относительно друга. Расширение как бы растаскивает частицы. Расширение Вселенной — фактор, препятствующий сжатию флуктуации. Нетрудно из формул (13), (14) получить, что относительная скорость частиц, обусловленная расширением, возрастает с уменьшением средней плотности  $\rho$ . Эта зависимость — следствие того, что при уменьшении  $\rho$  уменьшается суммарная сила притяжения, препятствующая разлету вещества.

Джинс полагал, что первичным источником гравитационных возмущений будут естественные статистические флуктуации плотности, существующие в любом однородном веществе. Однако Е. М. Лифшиц в 1946 г. показал, что такие флуктуации вследствие расширения Вселенной будут обязательно затухать. Следовательно, посредством модели однородной Вселенной с только статистическими флуктуациями нельзя объяснить возникновение галактик. Нужно первоначальные зародышевые флуктуации задавать «руками», подгоняя их в конечном счете под существующие весьма многочисленные наблюдательные данные о галактиках. И здесь мы встречаемся с тенденцией, в некотором смысле противоречащей духу модели Фридмана, основанной на четко сформулированных начальных условиях — изотропии и однородности. Для образования галактик необходимы отклонения от этих постулатов. Принципы однородности и изотропии единственные по своей простоте; возмущения, отклонения от этих постулатов многообразны. И это обстоятельство является одной из причин многообразия и незавершенности моделей образования галактик.

Дополнительные серьезные трудности вносит реликтовое излучение. Прямое влияние очевидно. Реликтовое излучение само препятствует конденсации вещества (см. (29)). Однако температура  $T_u$  во Вселенной падает, и, вообще говоря, следует ожидать наступления момента, когда воздействие излучения на конденсацию становится сравнительно малым. Нетрудно написать условие, достаточное, чтобы реликтовое излучение не препятствовало образованию галактик. Скорость частиц меньше скорости света. Поэтому заведомо должно выполняться условие

$$GM/R < c^2.$$

Комбинируя это условие с соотношением Джинса (29), получаем соотношение, при котором возможно образование галактик:

$$SE_{\gamma} < m_p c^2. \quad (30)$$

В нашу эпоху это неравенство выполняется с большим запасом (на 4—5 порядков).

Весьма «опасно» косвенное влияние реликтового излучения. Уже упоминалось, что весьма высокая его изотропия — прекрасное подтверждение фридмановской модели. Но именно эта изотропия сильно ограничивает произвол в выборе начальных возмущений. Можно показать, что слишком большие возмущения привели бы к нарушению изотропии реликтового излучения: слишком малые затухнут; для них не будут выполняться условия Джинса.

Именно в этой дилемме и заключается одна из основных трудностей в создании теории образования галактик. Перейдем к краткому изложению основных идей этой теории.

В настоящее время существует несколько подходов (сценариев) образования галактик, в значительной степени развитых советскими астрофизиками. В одном из них допускается, что первичные возмущения имеют вихревой характер и возникают практически в самом начале расширения Вселенной, т. е. имеют изначальный характер, связанный с сингулярным состоянием Вселенной. Трудность этой модели заключается в том, что вихревые движения затухают во время расширения Вселенной. Поэтому возмущения такого типа будут достаточно эффективными, если допустить столь большие амплитуды начальных возмущений, что это должно сказаться на изотропии реликтового излучения.

В основе другого сценария (адиабатическая теория происхождения галактик) лежит допущение, что изначальные возмущения обусловлены флуктуациями полной плотности  $\rho$  при неизменном значении отношения  $S = n_{\gamma}/n_p$  (вещество и излучение флуктуируют синфазно). И, наконец, в последнем построении (так называемой энтропийной теории) возмущения определяются флуктуациями в значении величины  $S$ .

Подобное с первого взгляда незначительное различие в характере возмущений кардинально меняет картину эволюции крупномасштабных элементов Вселенной.



В рамках адиабатической теории вначале возникают большие структурные элементы с массой, примерно равной скоплениям галактик, которые затем в процессе эволюции Вселенной фрагментируют на галактики и минигалактики с массой  $\sim 10^5 M_{\odot}$  и в дальнейшем распадаются на звезды.

В рамках энтропийной гипотезы вначале возникают образования с массой  $\sim 10^6 M_{\odot}$ . В дальнейшем они сжимаются в галактики и скопления галактик. При этом происходит также и распад первичных образований на звезды.

Именно в подобном кардинальном различии сценариев эволюции элементов Вселенной в рамках наиболее популярных теорий и просвечивает их незавершенность.

По этой причине мы не будем далее излагать теории происхождения галактик и остановимся лишь на выводе некоторых условий, необходимых для формирования галактик. Эти условия будут нам весьма полезны в дальнейшем (см. разд. 3 гл. 3). Чтобы пояснить вывод этих условий, мы рассмотрим тепловое излучение, возникающее при сжатии вещества, содержащегося во флуктуации. Это излучение формируется в результате кулоновского взаимодействия между частицами (тормозное излучение). Легко заключить, что тормозное излучение особенно велико, если вещество находится в ионизованном состоянии и тормозное излучение возникает в результате взаимодействия свободных электронов и протонов. В том случае, когда вещество ионизовано, излучение «размывает» возникшие флуктуации плотности. Интенсивность тормозного излучения существенно уменьшается, если вещество находится в связанном атомарном состоянии, т. е. образовано после рекомбинации плазмы. Этот эффект имеет простое объяснение: в связанном состоянии кулоновские поля протонов и электронов в значительной степени компенсируют друг друга (эффект экранировки). Оценки масс флуктуаций до рекомбинации приводят к неразумно большим значениям. Следовательно, во время эволюции Вселенной должен быть период, когда электроны и протоны объединяются в атомы водорода. Рекомбинация наступает, если температура  $T$  удовлетворяет условию

$$kT \lesssim 0,1 \epsilon_H \sim 1 \text{ эВ}, \quad (31)$$

где  $\epsilon_H$  — энергия связи электрона в атоме водорода. Условие (31) приблизительно соответствует температуре  $T_u \sim 10^4 \text{ К}$ . Используя соотношение (23), легко оценить, что

рекомбинация во Вселенной наступает в период  $t_u \sim 10^{12}$  с. Любопытно, что примерно в это же время начинает выполняться и условие (30), обеспечивающее превалирование вещества над излучением.

Таким образом, период  $t_u \sim 10^{12}$  с является физически выделенным в истории Вселенной, поскольку начинают осуществляться условия, необходимые для образования крупных структур. Казалось бы, именно в этот период должны зарождаться галактики. Тем не менее наблюдаемые данные противоречат этому простейшему предположению. Сейчас представляется, что галактики образуются существенно позже: при  $t_u \sim 10^{16}$  с, т. е. в период, который с физических позиций не выделен какими-либо особыми условиями.

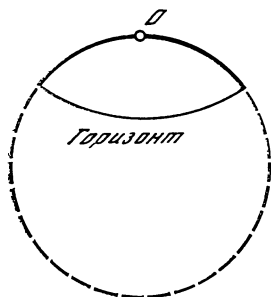


Рис. 9. Схема существования горизонта во Вселенной

Сигнал, испущенный из точки  $O$ , может достигнуть лишь области, ограниченной сплошной линией

Определенные надежды на преодоление намечающегося противоречия возлагают на иерархическую схему образования галактик. По этой схеме вначале возникают крупные структуры, которые в течение  $10^{16}$  с распадаются на галактики. Впрочем, эта схема не единственная. В рамках других схем время, необходимое для превращения мелких структур в крупные структурные образования — галактики,  $t_u \sim 10^{16}$  с.

Краткий экскурс в теорию образования галактик можно было бы заключить словами Вайнберга, приведенными в начале раздела. Установившейся и общепризнанной теории образования галактик нет. В основе этой несколько пессимистической констатации лежит противоречие между основными космологическими постулатами (однородность, изотропия) и существованием крупных структурных элементов, нарушающих однородность вещества во Вселенной. Возможно, что намечающаяся трудность свидетельствует о том, что модель Фридмана является лишь приближением, нуждающимся в модификации. На определенную незавершенность фридмановской модели указывает

и хорошо известная проблема горизонта Вселенной. Суть этой проблемы заключается в том, что лишь точки, расположенные на сравнительно небольших (по сравнению с размерами Вселенной) расстояниях, могут быть связаны световыми сигналами. Причинная связь между двумя удаленными друг от друга точками Вселенной отсутствует (рис. 9). Подобная ситуация находится в явном противоречии с глобальной характеристикой Вселенной — изумительной изотропией реликтового излучения. Как одна часть реликтового излучения «могла узнать» о состоянии реликтового излучения в области, причинно не связанной с первой? Проблема горизонта — серьезное испытание для фридмановской модели Вселенной.

## 7. ЗВЕЗДЫ

Звезды — основные структурные элементы Вселенной. В этом разделе рассматриваются стационарные (точнее, квазистационарные) звезды. В стационарных звездах по определению не изменяется существенно масса и радиус на протяжении времени, сравнимого с временем  $t_u$  существования Вселенной. Стационарные звезды составляют подавляющую (более 99%) часть звездного населения Галактики.

Наблюдение звезд было основным предметом астрономии вплоть до начала XX столетия. В результате многовековых наблюдений был накоплен очень богатый материал, который подвергся тщательной классификации и систематизации.

Наиболее лаконично отражение этой огромной работы представляется на диаграммах Гершпрунга—Рессела. По оси абсцисс этих диаграмм откладывается цвет звезды, точнее, спектральный класс звезды. Как известно, цвет в оптическом диапазоне соответствует длине волны излучения, или характеристической энергии фотона  $E_\gamma$ . Голубой цвет соответствует наименьшей, а красный — наибольшей длинам волн. В других шкалах голубой цвет соответствует наибольшему значению  $E_\gamma$ , или характеристической температуре  $T_s$  излучающей области. Для красного цвета величины  $E_\gamma$  и  $T_s$  имеют наименьшие значения.

Обычно на диаграммах Гершпрунга—Рессела вблизи начала координат откладывают малые длины волн, соответствующие сравнительно большой температуре. При перемещении вдоль оси абсцисс вправо длина волны из-

Таблица 6

Спектральный класс	Температура $T_s$ , град
BO	25 000
AO	11 000
FO	7 600
GO	6 000
KO	5 100
MO	3 600

лучения звезд увеличивается, что соответствует уменьшению  $T_s$  и переходу от класса голубых звезд к желтым и красным.

По оси ординат откладывается светимость звезды — ее энерговыделение за единицу времени ( $\text{эрг} \cdot \text{с}^{-1}$ ). В астрономии приняты свои единицы измерений, которые и нашли отражение в диаграмме Гершпрунга—Рессела, приведенной на рис. 10. Обычно цвет характеризуется спектральным классом, которому соответствует своя характерная температура  $T_s$ . В табл. 6 отражено это соответствие. Светимость звезд выражается в логарифмической шкале (абсолютные звездные величины  $M$ ).

На рис. 10 представлена типичная диаграмма Гершпрунга—Рессела для звезд, расположенных ближе 5 пс от Земли. На диаграмме отчетливо проявляются две области, в пределах которых располагаются точки, соответствующие звездам разных классов. Одна из них — полоса, простирающаяся от верхнего левого угла к нижнему правому, — принадлежит к звездам главной последовательности, составляющим подавляющую часть наблюдаемых звезд. В верхнем левом углу полосы, соответствующей звездам главной последовательности, располагаются большие звезды голубого цвета. В нижнем правом углу — красные карлики. Их физическое отличие от остальных звезд главной последовательности заключается в практически полном отсутствии термоядерных реакций (см. ниже). Солнце располагается примерно в середине полосы звезд главной последовательности и является средней (желтой), ничем не примечательной с астрофизических позиций звездой.

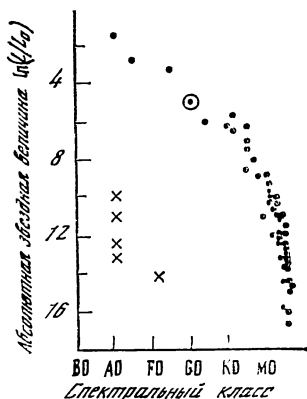


Рис. 10. Диаграмма Гершпрунга—Рессела для звезд, расположенных ближе 5 пс от Солнечной системы

В левой части диаграммы располагаются точки, соответствующие белым карликам.

Нейтронные звезды не представлены на этой диаграмме. Они интенсивно излучают лишь в течение сравнительно малого времени,  $\sim 10^4 - 10^5$  лет. Поэтому подавляющая часть нейтронных звезд — темные объекты. В ближайшей окрестности Солнечной системы нет излучающих

Таблица 7

Класс звезд	Масса, г	Радиус, см	Светимость, эрг·с <sup>-1</sup>	Температура поверхности, град
Солнце (типичная звезда)	$2 \cdot 10^{33}$	$0,7 \cdot 10^{11}$	$0,4 \cdot 10^{34}$	$5 \cdot 10^3$
Красные карлики	$10^{32}$	$10^{10}$	$10^{30}$	$2 \cdot 10^3$
Белые карлики	$10^{33}$	$5 \cdot 10^8$	$10^{30}$	$10^4$
Нейтронные звезды	$10^{34}$	$10^6$	—	—

нейтронных звезд. Отметим, что и на диаграммах Гершпрунга—Рессела, включающих и далекие звезды, представить молодые нейтронные звезды было бы затруднительно, поскольку они излучают в весьма широком диапазоне длин волн (от радио- до гамма-диапазонов), и поэтому это излучение нельзя представить одним цветом (температурой).

В табл. 7 приведены данные типичных звезд разных классов. В качестве типичной термоядерной звезды главной последовательности выбрано Солнце.

В дальнейшем в первую очередь рассматривается судьба типичной излучающей звезды. Как мы увидим далее, эволюция таких звезд тесно связана с существованием белых карликов и нейтронных звезд.

Остановимся вначале на основной проблеме звездной эволюции — проблеме совмещения большого энерговыделения (светимости) со стационарностью звезд. Большая светимость необходима для поддержания их стационарности. Действительно, основным физическим фактором, поддерживающим стабильность звезд, является равенство потенциальной энергии, обусловленной гравитационным притяжением, и кинетической энергии, связанной тепловым движением, обеспечивающим давление, противостоящее гравитационному сжатию. Соответствующее уравнение баланса выписывалось ранее (см. разд. 6 наст. гл.,

соотношение (28)). Для равновесия необходимы большое давление и температура, а следовательно, и светимость звезды.

Однако простейшие оценки показывают, что наиболее естественный источник энергии, гравитация, не разрешает энергетической проблемы. Действительно, полная гравитационная энергия звезды

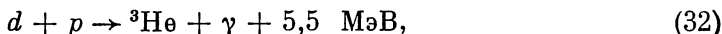
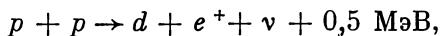
$$E_g \sim GM_s^2/R_s \sim 10^{48} \text{ эрг}$$

(см. параметры Солнца, приведенные в табл. 5). Гравитационное время жизни звезды

$$t_s \sim E_g/L_s \sim 10^{14} \text{ с}$$

( $L_s$  — светимость звезды), что более чем в 1000 раз меньше истинного времени существования звезды. Эта проблема была известна уже в начале XX столетия, но ее решение сформировалось лишь в послевоенные годы благодаря усилиям многих теоретиков. Наибольший вклад в решение проблемы внес Бете. Решение пришло не в результате гениальной догадки, а явилось логическим следствием развития ядерной физики. Сформулируем основной тезис: основной источник светимости Солнца (и типичных звезд главной последовательности) — энергия термоядерного синтеза. В результате трансмутации легких элементов в более тяжелые выделяется энергия  $\sim (10^{-3} - 10^{-2}) M_s c^2$ , которой вполне достаточно для поддержания светимости звезд в течение длительного времени. Например, запас термоядерной энергии Солнца приблизительно равен  $10^{52}$  эрг, этого достаточно для поддержания его светимости в течение  $10^{11}$  лет<sup>29</sup>.

Приведем водородный цикл термоядерных реакций<sup>30</sup>



В итоге четыре протона превращаются в  $\alpha$ -частицу. В этом процессе выделяется энергия  $\sim 20$  МэВ. Суммарная энергия термоядерных реакций и поддерживает светимость Солнца.

<sup>29</sup> Подчеркнем, что вследствие малой светимости красных карликов для их существования в течение космологического времени достаточно гравитационной энергии.

<sup>30</sup> Этот цикл играет особо важную роль, поскольку исходное вещество в звездах в основном протоны.

Хотя термоядерная модель и успешно разрешила «энергетический кризис», в процессе своего развития она переживала трудные ситуации. На одной из них весьма поучительно остановиться. В разд. 5 настоящей главы упоминалось, что простейшие варианты нуклеосинтеза (присоединение нуклона к  $\alpha$ -частице или синтез двух  $\alpha$ -частиц) неэффективны, поскольку в результате образуются нестабильные изотопы.

В середине 60-х годов сформировалась интересная идея разрешить возникшую проблему, допустив, что образование более тяжелых элементов осуществляется через тройное слияние: переход трех  $\alpha$ -частиц в ядро углерода. Идея тройного слияния весьма нетривиальна. Во-первых, она требует сравнительно большой концентрации  $\alpha$ -частиц. Этот пункт был решен на основе модели космического нуклеосинтеза гелия (см. разд. 5 наст. гл.). Более сложной оказалась вторая проблема. Тройное слияние происходит сколько-нибудь эффективно в условиях резонанса, т. е. когда энергии (массы) элементов в обеих частях символического уравнения реакции совпадают:

$$3m_{\alpha} = m_c.$$

Однако реально существует иное соотношение:

$$3m_{\alpha} = m_c + 7,7 \text{ МэВ}.$$

Следовательно, тройное слияние могло протекать эффективно лишь при наличии возбужденного уровня ядра  $^{12}\text{C}$  с энергией 7,7 МэВ. Во времена, когда формировалась гипотеза тройного слияния, возбужденный уровень ядра  $^{12}\text{C}$  не был известен. «Прижатые к стене», астрофизики настаивали на его существовании. Физики-ядерщики вначале отрицали это, но экспериментальные исследования на ускорителях продемонстрировали, что действительно у ядра  $^{12}\text{C}$  существует возбужденный уровень с энергией 7,7 МэВ, уровень, благодаря которому реакция тройного слияния должна протекать весьма эффективно. Таким образом решилась проблема образования сложных элементов.

Физики отвыкли от обратного воздействия астрономии на прогресс фундаментальной физики. Поэтому этот факт произвел сильное впечатление на современников. Например, Фейнман в своей книге «Характер физических законов» (М.: Мир, 1968) посвятил этому событию немало вдохновенных строк.

Но вернемся к основному предмету — эволюции звезд. В рамках термоядерной модели строения звезд излучение энергии производится за счет синтеза тяжелых элементов из более легких. Этот синтез имеет необратимый характер: тяжелые элементы практически не фрагментируют на более легкие. В этой необратимости заключен неизбежный процесс старения звезды. При увеличении атомного номера элементов, участвующих в термоядерных реакциях, уменьшается энергия, выделяемая в таких процессах. Наконец, с приближением атомного номера элементов, участвующих в реакциях, к группе железа (Ni, Fe) термоядерный синтез не приносит никаких энергетических дивидендов. Звезда начинает остывать, и нарушается равенство (28), обеспечивающее равновесие звезды. Звезда стремительно сжимается под влиянием силы тяжести. Иногда процесс коллапса сопровождается красивым фейерверком — взрывом сверхновых звезд. Светимость сверхновой в активной фазе превышает светимость целой галактики. Однако лишь немногим астрономам удавалось ранее наблюдать этот фейерверк; в нашей Галактике он происходит примерно один раз за 20—30 лет. Сейчас в связи с развитием астрономической техники можно наблюдать взрывы сверхновых и в других галактиках.

Но нас будет интересовать другой, менее эффектный, но, по-видимому, более важный с физической точки зрения аспект эволюции — судьба коллапсирующей звезды. Как показывают расчеты, эта судьба предопределяется начальной массой звезды (см. далее разд. 1 гл. 3). Если масса звезды  $M_s < 1,4 M_\odot$ , то в результате коллапса она превращается в белый карлик. Если  $1,4 < M_s < 5 M_\odot$ , то в нейтронную звезду. Если  $M_s > 5 M_\odot$ , то коллапс продолжается неограниченно — звезда должна превратиться в черную дыру. Основные предсказания термоядерной модели звезд хорошо подтверждаются наблюдениями.

Однако было бы преждевременным думать, что эта теория — законченное построение. Много хлопот теоретикам доставили наблюдения нейтринного излучения Солнца, продемонстрировавшие, что оно значительно меньше расчетного значения. Теоретикам пришлось существенно уточнять параметры теории, чтобы согласовать теоретические выводы с результатами наблюдений.

Существует и другая проблема: отсутствие убедительных доказательств существования черных дыр, возник-



ших в результате коллапса звезд, хотя и предложены косвенные методы их наблюдения. Является этот факт пробелом теории эволюции звезд или следствием неэффективности существующих методов обнаружения черных дыр, остается неясным.

## Глава III

# ВСЕЛЕННАЯ И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

## 1. О СВЯЗИ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕЗД И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Уже упоминалось (см. разд. 7 гл. 2), что звезды — гигантские шары, состоящие в основном из протонов и электронов с небольшой примесью  $\alpha$ -частиц ( $\sim 6\%$ ) и еще меньшей долей ядер более тяжелых элементов. В реальных звездах концентрация  $n_s$  частиц и плотность  $\rho_s$  вещества возрастают при перемещении от поверхности звезды к ее центру.

Мы в нашем анализе несколько упростим оценку величины основных характеристик звезд: массы  $M_s$  и радиуса  $R_s$ . Допустим, что звезды имеют равномерное распределение плотности  $\rho_s$  (концентрации  $n_s$ ) и состоят лишь из протонов и электронов. Такое приближение хорошо отражает эволюцию звезд.

В точной теории учитываются оба фактора: неравномерность распределения плотности и сложный химический состав. Однако такие расчеты требуют сложных численных вычислений, которые практически уничтожают исключительную прозрачность физической структуры звезд.

Прежде чем перейти к конкретным расчетам, попытаемся разграничить определения звезд и планет. Планеты, так же как и звезды главной последовательности, состоят из нуклонов и электронов, однако (в отличие от звезд) в планетах нуклоны и электроны связаны в атомы. Это физическое различие обусловлено малостью массы  $M_p$  планет сравнительно с величиной  $M_s$ . Так, масса самой большой из известных планет — Юпитера — равна  $\sim 10^{30}$  г, т. е. более чем в 1000 раз меньше массы Солнца. Но даже и у Юпитера значительная доля частиц связана в атомы; у типичной же планеты — Земли — подавляющая ( $\sim 99\%$ ) доля вещества состоит из атомов.

Физическое различие строения звезд и планет приводит к важному их отличию в основной визуальной характеристике — светимости. Планеты практически не имеют собственного излучения. Это связано с двумя причинами. Во-первых, их собственная температура мала, а во-вторых, вещество, состоящее из плазмы (протонов и электронов), излучает существенно больше, чем совокупность нейтральных атомов. Поэтому можно связать определение границы, разделяющей звезды от планет, с состоянием вещества. Если вещество ионизовано, то небесные компактные тела — звезды; если вещество состоит из нейтральных атомов, то тело является планетой.

Здесь нужно подчеркнуть, что до сих пор наблюдались лишь планеты Солнечной системы. Однако мало кто сомневается в существовании планетных систем в окрестностях других типичных звезд. Отсутствие наблюдений таких планетных систем объясняется простой причиной: современные телескопы не могут разрешить почти темные объекты — планеты — на фоне ярких звезд.

После этих предварительных рассуждений перейдем к количественному выражению основных параметров звезд  $M_s$  и  $T_s$  через константу гравитационного взаимодействия  $\alpha_g$  и массы  $m_p$  и  $m_e$  стабильных элементарных частиц, из которых состоят звезды<sup>31</sup>. В основу анализа мы положим основное условие равновесия — равенство потенциальной и кинетической энергий, отнесенных к паре частиц  $p$  и  $e^-$ :

$$GM_s m_p / R_s \sim \epsilon_k, \quad (33)$$

где  $\epsilon_k$  — средняя суммарная энергия пары протон — электрон<sup>32</sup>.

В дальнейших рассуждениях мы опустим множители  $\sim 1$ . Это приближение соответствует физической точности наших оценок (допущение об однородности звезды). Тогда из (33) и очевидных соотношений  $M_s \sim \rho_s R_s^3$  и  $\rho_s \sim m_p r_0^{-3}$ , где  $r_0$  — среднее расстояние между частицами, следует основное выражение, определяющее радиус  $R_s$ :

$$R_s \sim (\epsilon_k r_0^3 / G m_p^2)^{1/2}. \quad (34)$$

<sup>31</sup> Нейтронные звезды состоят в осевом из нейтронов. В данном разделе мы пренебрежем разницей масс  $\Delta m_N = m_n - m_p$  сравнительно с величиной  $m_p$ .

<sup>32</sup> С аналогичным условием мы неоднократно встречались в гл. 2

С первого взгляда кажется, что подобные выкладки не приближают к конечной цели, поскольку параметр  $R_s$  выражается через новые неизвестные величины  $r_0$  и  $\epsilon_k$ . В действительности этот вывод неверен. Дело заключается в том, что  $\epsilon_k$  и  $r_0$  однозначно связаны между собой, а параметр  $r_0$  имеет всего три выделенных значения, соответствующих трем классам небесных объектов: большим планетам — малым звездам, белым карликам и нейтронным звездам. Именно в этой возможности найти три физически выделенных состояния небесных тел и состоит основная идея оценки величин  $M_s$  и  $R_s$ .

Остановимся вначале на взаимосвязи между величинами  $r_0$  и  $\epsilon_k$ . Эта связь — простое отражение принципа неопределенности — основного принципа квантовой механики. Количественно принцип неопределенности имеет следующую форму:  $p \simeq \hbar/r$ , где  $p$  и  $r$  — характеристические значения импульса и размеров микросистемы. В нашем случае эта связь имеет вид

$$\epsilon_k \sim p^2/m \sim \hbar^2/r_0^2 m, \quad (35)$$

где  $m$  — характеристическая масса частиц, которая имеет два значения:  $m = m_e$  или  $m = m_p$ .

Далее приведем значения возможных характеристических расстояний  $r_0$  между частицами. Уже упоминалось, что в микрофизике существуют три выделенных значения расстояний между частицами. Первое значение равно размерам атома. Размеры легких атомов, из которых состоят планеты, по порядку величины равны размерам атома водорода:

$$r_{01} \sim r_H \sim \alpha_e^{-1} \frac{\hbar}{m_e c} \sim 10^{-8} \text{ см.} \quad (36)$$

Второе значение  $r_{02}$  связано с квантовыми размерами электрона. Известно, что квантовые эффекты становятся существенными, когда расстояния между частицами сравниваются с комптоновской длиной:  $r \sim \hbar/mc$ . В этом случае начинает действовать принцип Паули, запрещающий тождественным фермионам вторгаться в область, занимаемую другой частицей. Иными словами, при  $r < \hbar/mc$  принцип Паули приводит к возникновению сил, препятствующих дальнейшему сжатию. Поэтому существует

$$r_{02} \sim \hbar/m_e c \sim 10^{-11} \text{ см.} \quad (37)$$

Несколько более сложно обстоит дело с третьей характеристической длиной  $r_{03}$ , связанной с ядерным взаимодей-

ствием двух нуклонов. Как известно, радиус действия ядерных сил  $r_N \sim \hbar/m_\pi c$  ( $m_\pi$  — масса пиона). Однако существует и другая характеристическая длина ядерного взаимодействия:  $r'_N \sim \hbar/m_p c$ . Поэтому следует положить

$$r_{03} \sim \frac{\hbar}{m_p c} \div \frac{\hbar}{m_\pi c} \sim 10^{-14} \div 10^{-13} \text{ см.} \quad (38)$$

Каждому значению  $r_{0i}$  соответствует свое значение характеристической массы  $m$ . Ясно, что размеры атома водорода и комптоновская длина электрона определяются величиной  $m_e$ ; расстояние  $r_{03}$  — величиной  $m_p$  или  $m_\pi$ . Подставляя эти значения и соответствующие им величины  $r_{0i}$  в формулу (34), получаем три значения  $R_s$ :

$$R_{s1} \sim (\alpha_g/\alpha_e)^{-1/2} r_H \sim 10^{10} \text{ см,} \quad (39)$$

$$R_{s2} \sim \alpha_g^{-1/2} \frac{\hbar}{m_e c} \sim 10^8 \text{ см,} \quad (40)$$

$$R_{s3} \sim \alpha_g^{-1/2} \frac{\hbar}{m_p c} \div \alpha_g^{-1/2} \frac{\hbar}{m_\pi c} \left( \frac{m_p}{m_\pi} \right)^{1/2} \sim (10^5 \div 10^8) \text{ см.} \quad (41)$$

Опираясь снова на соотношение  $M_s \sim \rho_s R_s^3$ , нетрудно получить три характеристических значения масс  $M_s$ :

$$M_{s1} \sim (\alpha_g/\alpha_e)^{-3/2} m_p \sim 10^{30} \text{ г,} \quad (42)$$

$$M_{s2} \sim \alpha_g^{-3/2} m_p \sim 4 \cdot 10^{33} \text{ г,} \quad (43)$$

$$M_{s3} \sim \alpha_g^{-3/2} m_p \div \left( \frac{m_p}{m_\pi} \right)^{3/2} \alpha_g^{-3/2} m_p \sim 4 \cdot 10^{33} \div 6 \cdot 10^{34} \text{ г.}^{32a} \quad (44)$$

Полученные три пары характеристических значений радиусов  $R_s$  и масс  $M_s$  легко привести в соответствие с наблюдательными данными. Пара  $M_{s1}$ ,  $R_{s1}$  соответствует самым большим планетам или самым малым (по массе) звездам. Пара  $M_{s2}$ ,  $R_{s2}$  — белым карликам;  $M_{s3}$ ,  $R_{s3}$  — нейтронным звездам. Отметим, что более точные расчеты дают для верхней границы масс белых карликов  $3 \cdot 10^{33}$  г, а для нейтронных звезд интервал масс  $3 \cdot 10^{33} - 10^{34}$  г.

Мы пока не касались наиболее многочисленных звезд — термоядерных звезд главной последовательности. Из теории термоядерных реакций следует, что слияние двух протонов происходит эффективно, когда температура  $T_0$

<sup>32a</sup> При выводе (43), (44) полагалось вместо (35) соответственно:  $\varepsilon_k \sim m_e c^2$  или  $\varepsilon_k \sim m_p c^2$  (вырожденный релятивистский газ).

приближается к следующему значению:

$$T_0 \sim \frac{\alpha_g^2 m_p c^2}{k}. \quad (45)$$

Точнее, термоядерные реакции начинают протекать эффективно, когда  $T_0 \sim (10^7 \div 10^8)$  К. Используя (45) и ряд дополнительных предположений, можно вывести простые соотношения для усредненных характеристик термоядерных звезд. Аналогичные аппроксимации получаются и из иных физических соображений (например, равенства плотностей тепловой энергии и энергии излучения в звездах). Радиусы и массы термоядерных звезд:  $R_{s4} \sim \alpha_g^{-1/2} r_H \sim 10^{11}$  см,  $M_{s4} \sim \alpha_g^{-3/2} m_p \sim 4 \cdot 10^{33}$  г. (46)

Эти значения хорошо согласуются с параметрами Солнца (см. табл. 7).

Подчеркнем, что соотношения (46) представляют собой усредненные параметры термоядерных звезд. Например, значения масс  $M_{s4}$  находятся в пределах трех порядков. Все же остаются два естественных вопроса.

1. Какой класс объектов соответствует интервалу масс  $10^{30} - 10^{33}$  г? Уже упоминалось, что масса  $10^{30}$  г соответствует самой большой планете — Юпитеру. В соответствии с точными расчетами термоядерные реакции осуществляются в звездах с массой  $M_s > (2-3) \cdot 10^{32}$  г. Наблюдаются звезды начиная с масс  $\sim 10^{32}$  г. В интервале масс  $M_s \sim 10^{32} \div 3 \cdot 10^{32}$  г располагаются красные карлики.

Интервал масс  $10^{30} \lesssim M_s \lesssim 10^{32}$  г — terra incognita. Никаких звезд в этом интервале не наблюдается. Это обстоятельство не означает, что такие звезды отсутствуют во Вселенной. Наоборот, кажется естественным, что распределение небесных объектов по массам непрерывно переходит от планет к звездам. Однако по двум причинам наблюдения звезд малых масс весьма затруднительны. Эти звезды должны иметь весьма малую светимость и относительно малую температуру, соответствующую инфракрасному диапазону. Тем не менее обнаружение и исследование звезд малых масс весьма соблазнительны, поскольку это один из путей решения злободневной проблемы скрытых масс (см. разд. 6 гл. 2).

2. Второй вопрос относится к судьбе термоядерных звезд очень больших масс:  $M_s \gtrsim 60 M_\odot \sim 30 \alpha_g^{-3/2} m_p \sim 10^{35}$  г. Оказывается, существует довольно резкий верхний предел массы звезд. При очень больших массах звезды становятся неустойчивыми относительно следующего

процесса. Допустим, что по каким-либо причинам звезда немного сожмется. Это вызовет повышение температуры в ее центре и, следовательно, интенсификацию термоядерных реакций, что приводит к дополнительному энерговыделению, которое сопровождается расширением. Иначе говоря, в звезде начнутся радиальные колебания. Расчеты показывают, что при  $M_s \gtrsim 30\alpha_g^{-3/2}m_p$  эти колебания будут возрастать, что приведет либо к разрыву звезды, либо к сбросу внешних оболочек. При  $M_s < 30\alpha_g^{-3/2}m_p$  колебания будут затухать, звезда — устойчивое образование. Наблюдения показывают, что действительно звезды с массами  $M_s > 30\alpha_g^{-3/2}m_p$  отсутствуют.

Таким образом, масса  $M_s \sim \alpha_g^{-3/2}m_p$  (разумеется, по порядку величины) — типичная масса звезды. Можно в некотором смысле полагать, что  $M_s \sim \alpha_g^{-3/2}m_p$  — значение массы «гравитационного элемента». Огромная величина этой массы обуславливается слабостью гравитационного взаимодействия.

Приведем без вывода полезное выражение для средней светимости термоядерной звезды:

$$L_s \sim \frac{(m_e c^2)^2}{\hbar} \alpha_g^{-1/2} \sim 10^{36} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (47)$$

Отсюда легко получить ее среднее время жизни:

$$t_s \sim \frac{a\alpha_g^{-3/2}m_p c^2}{L_s} \sim a\alpha_g^{-1} \frac{m_p}{m_e} \frac{\hbar}{m_e c^2} \sim 10^{18} \text{ с}, \quad (48)$$

$a \sim 10^{-2}$  — доля массы звезды, переходящая в энергию в процессе термоядерных реакций.

## 2. СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ И МАССЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В этом и последующих разделах доказываем неустойчивость структуры Вселенной относительно численного значения фундаментальных постоянных в следующем смысле: небольшое изменение фундаментальных постоянных приводит к качественному изменению структуры Вселенной. Это изменение сводится к исчезновению одного или нескольких основных элементов Вселенной: ядер, атомов, звезд и галактик. Доказательство неустойчивости структуры Вселенной основывается на стандартном методе: анализе поведения функциональной зависимости при небольшом изменении аргумента функции.

Однако в интересующем нас аспекте предлагаемая процедура несколько необычна, и требуются определенные усилия, чтобы к ней привыкнуть. Необычность ситуации заключается в предмете исследования (Вселенной) и в аргументах, относительно которых эта устойчивость изучается, — фундаментальных константах. Дело в том, что наша Вселенная уникальна; она известна нам в единственном экземпляре. Поэтому даже мысленное манипулирование с этим уникальным объектом вызывает естественный душевный трепет.

С другой стороны, как правило, в физических экспериментах фундаментальные постоянные выступают как заданные, измеренные в многочисленных опытах числа, не зависящие от каких-либо факторов. Именно поэтому эти числа и носят почетное звание фундаментальных констант. С первого взгляда их варьирование может показаться кощунством. Тем не менее именно этот путь — единственный, ведущий к исследованию устойчивости структуры Вселенной.

Подобный подход нарушает сложившиеся традиции. Однако научный прогресс в значительной степени основан на изменении традиций, хотя, разумеется, не всякое нарушение привычных правил игры приводит к истинному научному прогрессу.

В этом разделе мы проведем анализ устойчивости структуры Вселенной относительно масс элементарных частиц. Здесь сразу же надо оговориться, что речь пойдет только о тех частицах, из которых состоят основные структурные элементы Вселенной: ядра, атомы, звезды и галактики.

Таким образом, будем исследовать устойчивость структуры Вселенной относительно трех констант: массы  $m_e$  электрона, массы  $m_p$  протона и массы  $m_n$  нейтрона. Начнем с электрона.

Водород в основном состоянии абсолютно стабильный элемент<sup>33</sup>. Однако эта стабильность обеспечивается с небольшим запасом. Дело в том, что в принципе возможен коллапс атома водорода по схеме

$$p + e^- \rightarrow n + \nu. \quad (49)$$

С этой реакцией, которая обуславливается слабым взаимодействием, мы встречались ранее в разд. 5 гл. 2.

<sup>33</sup> Здесь мы отвлекаемся от гипотетического распада протона, поскольку его время жизни по крайней мере на 20 порядков превышает время существования Вселенной.

В процессе нуклеосинтеза на ранних стадиях расширения температура достаточно высока ( $kT_u \gtrsim m_e c^2$ ;  $T_u \sim 10^{10}$  К) и реакция (49) протекает весьма эффективно. Однако по мере увеличения космологического времени  $t_u$  температура  $T_u$  падает, и в эпоху образования нейтрального водорода (см. разд. 6 гл. 2) ( $T_u \sim 10^4$  К) реакция (49) строго запрещена. Этот запрет обуславливается самым суровым физическим законом — законом сохранения энергии (массы):  $m_e \sim 0,5$  МэВ  $< \Delta m_N = m_n - m_p \sim \sim 1,3$  МэВ. Именно неравенство

$$m_e < \Delta m_N \quad (50)$$

— залог абсолютной устойчивости водорода.

Далее при анализе устойчивости атома водорода будем следовать изложенному выше методу: гипотетическому изменению массы  $m_e$  электрона. Для того чтобы в неравенстве (50) изменился знак и осуществлялось неравенство  $m'_e > \Delta m_N$  (штрихованные величины обозначают измененные значения фундаментальных постоянных), достаточно, чтобы  $m'_e \gtrsim 3m_e$ . Можно рассчитать по стандартным формулам квантовой механики время жизни атома «водорода» при измененном значении  $m'_e$ . Если  $m'_e = 3m_e$ , то время  $t_H$  существования атома водорода в нейтральном состоянии  $\sim 1$  мес; если  $m'_e = 4m_e$ , то  $\sim 1$  сут, и далее величина  $t_H$  очень быстро уменьшается с увеличением значения  $m'_e$ .

Что же произошло бы во Вселенной, если бы атом водорода был нестабилен? С первого взгляда кажется, что последствия были бы существенными, но не катастрофическими: практически исчезли бы водородсодержащие молекулы. Однако такая оптимистическая точка зрения абсолютно неправильна. Увеличение массы  $m_e$  привело бы к кардинальному изменению всей структуры Вселенной. Если бы в ней реализовалась реакция (49), то полностью изменили бы свой лик звезды и галактики. В разд. 6 гл. 2 отмечалось, что для образования галактик необходимо существование нейтрального водорода. Реализация реакции (49) привела бы к тому, что практически сразу же после образования нейтрального водорода он превратился бы в нейтроны и нейтрино. Галактики и звезды практически полностью состояли бы из нейтронов. Сложные формы вещества — атомы и молекулы практически отсутствовали бы. Именно этот факт мы и называем



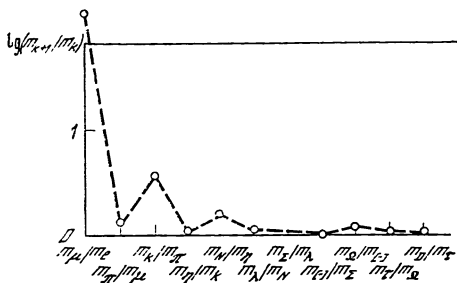


Рис. 11. Отношение масс стабильных элементарных частиц

По оси абсцисс помечены символы отношений соседних (по массе) частиц. По оси ординат — десятичные логарифмы численных значений этих отношений

неустойчивостью структуры Вселенной, в данном случае — относительно постоянной  $m_e$ .

Далее возникает естественный вопрос: увеличение массы  $m_e$  в 3—4 раза велико или мало? В физике такая лаконичная постановка вопроса практически бессодержательна. Малость величины имеет лишь относительный смысл. Мало относительно чего?

В нашем конкретном случае существуют характерные отношения значения массы  $m_e$  к средней массе  $\bar{m}$  остальных частиц или к массе  $m_\mu$  наиболее легкой (кроме электрона) частицы — мюона. Оказывается, что отношение  $m_\mu/m_e \sim 200$ . Сравнительно с этой величиной увеличение массы  $m_e$  вдвое мало. Более того, массы почти всех элементарных ( $\sim 98\%$ ) частиц  $\sim 1$  ГэВ. Следовательно, отношение средней массы  $\langle m \rangle$  элементарных частиц к массе электрона  $\langle m \rangle/m_e \sim 1000$ .

На рис. 11 представлены отношения масс известных стабильных относительно сильных взаимодействий частиц<sup>34</sup>. Массы частиц располагались в порядке их возрастания:  $m_1 = m_e$ ;  $m_2 = m_\mu$  ...  $m_{12} = m_D$  ( $D$  — символ тяжелой  $D$ -частицы). На оси абсцисс представлены символы отношений  $m_{k+1}/m_k$ . По оси ординат — значения  $\lg m_{k+1}/m_k$ . Этот рисунок наглядно иллюстрирует необычно большое значение отношения  $m_\mu/m_e$  сравнительно с другими значениями этих отношений.

Ниже горизонтальной линии расположена «опасная» область значений  $m'_e$ , при которой осуществлялся бы коллапс атома водорода в соответствии с реакцией (49) и дальнейшими катастрофическими последствиями.

И в заключение одно замечание. Мы со школьной скамьи привыкли к относительно малому значению величины  $m_e$ . В институтских курсах физики обычно эта

<sup>34</sup> Только массы таких частиц можно измерить достаточно точно.

малость связывается с лептонной природой электрона. Оба лептона — электрон и мюон — легчайшие заряженные элементарные частицы, они не участвуют в сильном взаимодействии. Поэтому велик соблазн объяснить сравнительную малость масс электрона и мюона тем, что они не участвуют в сильном взаимодействии. Однако подобная установившаяся интерпретация была полностью разрушена после открытия  $\tau$ -лептона (1977 г.) — частицы, не взаимодействующей сильно, но вдвое более тяжелой, чем протон.

Малость значения  $m_e$  — гигантская флуктуация, необходимая, однако, для существования сложных форм вещества. Чтобы пояснить, в каком смысле малость массы  $m_e$  называется флуктуацией, приведем следующую иллюстрацию. Допустим, что до открытия Максвеллом теоретического распределения молекул по скоростям были бы измерены скорости 100 молекул. Эти значения для 99 молекул находились бы в интервале  $1000 \pm 100$  м·с<sup>-1</sup>, а для одной молекулы скорость оказалась бы равной 1 м·с<sup>-1</sup>. Тогда физик, проводивший эти измерения (но не знающий закона Максвелла), мог бы с уверенностью сказать, что распределение молекул по скоростям имеет резкий пик при  $v \sim 1000$  м·с<sup>-1</sup>, а скорость единственной молекулы  $v \sim 1$  м·с<sup>-1</sup> — большая флуктуация.

Отметим, что еще более сильное ограничение на верхний предел вариации массы  $m_e$  можно получить из условия осуществимости термоядерной реакции  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$  (см. разд. 7 гл. 2). Эта реакция — основа длительного существования звезд, она обуславливается слабым взаимодействием. Поэтому она протекает весьма медленно ( $\sim 10^{10}$  лет). Другие реакции водородного цикла связаны с электромагнитным или сильным взаимодействием, и скорость их очень велика (характеристические времена порядка нескольких минут). Если бы, например, звезда состояла из дейтронов, то она взорвалась бы. Поэтому реакция превращения двух протонов в дейтрон определяет всю эволюцию звезды и, в частности, ее длительное существование. Однако эта реакция осуществляется при определенных отношениях между массами частиц, участвующих в реакции:

$$2m_p > m_p + m_n - \epsilon_d + m_e$$

или

$$m_e < \epsilon_d - \Delta m_N \sim 0,9 \text{ МэВ}, \quad (51)$$

где  $\varepsilon_d \sim 2,2$  МэВ — энергия связи протона и нейтрона в дейтоне. Физический смысл приведенных неравенств прост: реакция осуществляется, если суммарная масса (или соответствующая ей энергия) в левой части уравнения (система до реакции) превышает суммарную массу (энергию) после реакции. Разница энергий до и после осуществления реакций равна сумме энергий нейтрино и кинетической энергии частиц, появившихся после реакции. Неравенство (51) еще более ограничивает значение массы  $m'_e$  ( $m'_e < 0,9$  МэВ). Подчеркнем, что здесь под возможным пределом вариации массы  $m_e$  понимается ее допустимое изменение при неизменных значениях  $\Delta m_N$  и  $\varepsilon_d$ . В принципе нельзя исключить возможность того, что все эти величины взаимосвязаны. Эта возможность рассматривается далее.

Перейдем к оценке условий, накладываемых на массы нуклонов, точнее, на разницу  $\Delta m_N = m_n - m_p$ . В разд. 5 гл. 2 подробно рассматривался космический нуклеосинтез гелия. В основе этого анализа неявно допускалось, что дейтон — стабильная частица. Если бы дейтон спонтанно распадался, то нуклеосинтез не осуществлялся бы. Стабильность дейтона — краеугольный камень всей стройной системы нуклеосинтеза, происходящего в звездах. Однако стабильность дейтона обеспечена с очень небольшим запасом. Дейтон состоит из протона и нейтрона, который в свободном состоянии распадается. Однако в связанном состоянии (в дейтоне) нейтрон стабилен. Эта стабильность обеспечивается тем, что, помимо образования частиц при распаде нейтрона, нужно затратить энергию (массу) на разрушение дейтона. Стабильность дейтона обеспечивается неравенством  $\Delta m_N < \varepsilon_d + m_e$ . В совокупности с неравенством (51) получаем условие<sup>35</sup>

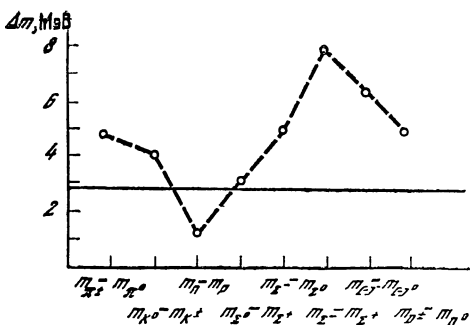
$$\Delta m_N < \varepsilon_d. \quad (52)$$

Разумеется, это условие во Вселенной выполняется, но с относительно малым запасом. Чтобы убедиться в этом, произведем сравнение разницы  $\Delta m_N$  для нуклонов с разностями масс других изотопических мультиплетов известных в настоящее время стабильных (относительно сильного взаимодействия) частиц. Напомним, что изотопическими семействами (мультиплетами) называется совокупность адронов, тождественных во всех отношениях, кроме электрического заряда и небольшой разницы

<sup>35</sup> Точнее:  $\Delta m_N < \varepsilon_d - m_e \sim 1,7$  МэВ.

Рис. 12. Разница масс частиц, принадлежащих одному изотопическому мультиплету

По оси абсцисс помечены символы частиц. По оси ординат — численное значение разницы масс в МэВ



в массах <sup>36</sup>. Нуклон (протон и нейтрон) — наиболее известный изотопический дублет. Тройка пионов ( $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ) — типичный изотопический триплет.

Каждый изотопический мультиплет характеризуется разницей масс  $\Delta m$  частиц, входящих в состав этого мультиплета. На рис. 12 представлены разницы масс  $\Delta m$  для стабильных изотопических мультиплетов. Выше горизонтальной линии расположена область значений  $\Delta m_N$ , которой соответствует нестабильность дейтона. Рис. 12 демонстрирует весьма любопытную особенность: разница масс  $\Delta m_N$  для нуклонов — наименьшая из всех разниц. Более того, если бы величина  $\Delta m_N$  равнялась наименьшему из всех известных прочих значений  $\Delta m_\Sigma = m_{\Sigma^0} - m_{\Sigma^+} = 3 \text{ МэВ} > \epsilon_d$ , то дейтон был бы нестабилен.

Таким образом, и здесь мы встречаемся с указанием, что структура Вселенной обуславливается исключительной малостью значения  $\Delta m_N$  сравнительно с другими величинами  $\Delta m$ . Стабильность дейтона в этом смысле — флуктуация. И последнее: какова структура Вселенной с нестабильным дейтоном? Нарисовать сценарий такой Вселенной нетрудно. В ней отсутствовал бы нуклеосинтез <sup>37</sup>. Поэтому отсутствовали бы любые сложные элементы. Вселенная состояла бы из водорода, термоядерный синтез не осуществлялся бы, и звезды, не питаемые термоядерной энергией, быстро коллапсировали бы.

<sup>36</sup> Об изотопическом спине см. разд. 2 гл. 2.

<sup>37</sup> Отметим существование второго аргумента, свидетельствующего об отсутствии нуклеосинтеза при возрастании  $\Delta m_N$ . В этом случае резко уменьшается время жизни нейтрона и космический нуклеосинтез не успевает осуществиться (см. разд. 5 гл. 2 и рис. 8).

### 3. СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ И КОНСТАНТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

#### Сильное взаимодействие

В начале книги упоминалось, что «настоящей» теории сильного (ядерного) взаимодействия не существует (см. разд. 1 гл. 1). Это утверждение следует понимать в том смысле, что нет теории, которая (наподобие квантовой электродинамики) с помощью одного параметра — константы взаимодействия — описывала бы всю совокупность явлений, обусловленных ядерными силами. Для интерпретации взаимодействия между нуклонами приходится вводить феноменологические параметры. Обычно основной характеристикой (когда рассматриваются небольшие скорости — нерелятивистское приближение) является форма потенциала взаимодействий. Пример подобного потенциала — соотношение (3), хорошо описывающее взаимодействие между двумя нуклонами при пренебрежении спиновыми и изоспиновыми эффектами. В этом же приближении потенциал взаимодействия можно представить прямоугольной ямой с глубиной  $V > > b\hbar^2/m_p r_N^2 \sim 25$  МэВ ( $r_N = 10^{-13}$  см — радиус действия ядерных сил;  $b \sim 1$ ).

Как неоднократно упоминалось, устойчивое связанное состояние возникает, если  $V = E_{\text{п}} > E_{\text{к}}$ , где кинетическая энергия нуклона  $E_{\text{к}} \sim b\hbar^2/m_p r_N^2 \sim p^2/m_p$ . Это соотношение есть следствие упоминавшегося ранее принципа неопределенности.

Дейтон — система, состоящая из двух нуклонов, поэтому к нему применимы все эти рассуждения. Устойчивость дейтона определяется тем, что условие  $V_d > > 25$  МэВ выполняется, однако с небольшим запасом. Энергия связи  $\varepsilon_d$  нуклонов дейтона мала ( $\sim 2,2$  МэВ). Ее нельзя уменьшить, не изменяя всей структуры Вселенной, поскольку это повлекло бы изменение знаков неравенств (51) и (52) — основ существующей во Вселенной структуры. Нетрудно, опираясь на соотношение (3), определить возможные пределы уменьшения  $\alpha_s$ , при котором еще сохранится неравенство (52). Полагая  $V \propto \alpha_s$ , можно получить, что константу  $\alpha_s$  нельзя уменьшить более чем на 40%.

Однако более впечатляющим является ограничение вариации константы  $\alpha_s$  сверху. Дело в том, что во Вселенной «почти» существует устойчивый бипротон —  ${}^2\text{He}$  (система  $pp$ ). Вследствие электростатического отталки-

вания и влияния принципа Паули потенциальная энергия по абсолютной величине  $V_{pp} < V_d$  и  $V_{pp} < E_k$ ;  $V_{pp} - E_k \sim -0,05$  МэВ. Однако если увеличить  $\alpha_s$  на несколько процентов, то бипротон становится стабильной частицей, что приводит к серьезнейшему изменению структуры Вселенной. При существовании стабильного бипротона возможна реакция



которая определяется электромагнитным взаимодействием в отличие от основной реакции термоядерного синтеза через образование дейтона. Последняя реакция обуславливается слабым взаимодействием и поэтому протекает медленно; реакция (53) — быстро. Настолько быстро, что весь водород выгорит уже в первые минуты расширения Вселенной, которая останется без водорода. Основной элемент в такой Вселенной — гелий; основной реакцией в звездах была бы реакция тройного слияния  $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$ . Однако возможность такого тройного слияния в гипотетической Вселенной со слегка увеличенным значением  $\alpha_s$  весьма сомнительна. Объяснение этого утверждения базируется на своеобразии структуры ядерных уровней. Как упоминалось ранее (см. разд. 7 гл. 2), реакция тройного слияния протекает достаточно эффективно вследствие существования возбужденного уровня с энергией  $\sim 7,7$  МэВ, обеспечивающего резонансный характер тройного слияния. Однако незначительное изменение константы  $\alpha_s$  должно, вообще говоря, привести к перестройке системы ядерных уровней. Ширина уровней невелика ( $\sim$ кэВ) сравнительно с расстоянием между уровнями ( $\sim$ МэВ). Поэтому маловероятно, чтобы при слегка измененной константе  $\alpha_s$  сохранилась эффективность тройного слияния.

Таким образом, небольшое (на несколько процентов) увеличение константы  $\alpha_s$  привело бы к тому, что Вселенная состояла бы лишь из гелия. Следовательно, ни постоянную  $\alpha_s$ , ни энергию связи дейтона  $\varepsilon_d$  нельзя увеличить даже незначительно без коренного изменения структуры Вселенной. Однако и здесь следует подчеркнуть, что малость энергии связи  $\varepsilon_d$  — огромная флуктуация в мире атомных ядер. Почти во всех стабильных ядрах эта величина превышает 8 МэВ. И лишь у дейтона энергия связи на нуклон  $\sim 1$  МэВ.

В заключение следует подчеркнуть одно обстоятельство. Каждое из неравенств, обеспечивающих сущест-

зование сложных структур во Вселенной, анализировалось независимо. Возникает естественный вопрос: нельзя ли, варьируя значения масс  $m_e$ ,  $m_p$ ,  $m_n$  и константы  $\alpha_s$  совместно, получить ту же сложную структуру, что и в нашей Вселенной. Рассуждения, основанные на гипотетическом существовании стабильного ядра  ${}^2\text{He}$  и смещении уровней ядер  ${}^{12}\text{C}$ , запрещают существенное увеличение констант  $m_e$ ,  $\Delta m_N$  и  $\alpha_s$ . Однако некоторое уменьшение значений  $m_e$ ,  $\Delta m_N$  и  $\epsilon_d$  а priori запретить нельзя. Нет простой и абсолютно убедительной аргументации против такой возможности. Однако можно привести одно соображение, свидетельствующее против этой гипотезы. Ранее подчеркивалось, что значения  $m_e$ ,  $\Delta m_N$  и  $\epsilon_d$  являются исключительно малыми величинами сравнительно со средними значениями  $\bar{m}$ ,  $\overline{\Delta m}$  и  $\bar{\epsilon}$  ( $\bar{\epsilon} \approx 8$  МэВ — средняя энергия связи нуклонов в ядре). Мы не знаем принципов формирования фундаментальных постоянных. Однако весь накопленный опыт свидетельствует о том, что если существует распределение некоторой величины, которая в результате определенных начальных условий приобретает значение, сильно отличающееся от среднего, то вероятность осуществления еще большего отклонения существенно уменьшается. В этом рассуждении есть явно слабое место. Неясно физическое определение начальных условий формирования фундаментальных постоянных.

Нужно подчеркнуть, что, хотя этот пункт можно прояснить лишь при дополнительных гипотезах, сами распределения по  $m$ ,  $\Delta m$  и  $\epsilon$  — хорошо известные результаты многочисленных уже проведенных исследований и флуктуативная природа значений  $m_e$ ,  $\Delta m_N$  и  $\epsilon_d$  не вызывает сомнений. Можно привести еще некоторые соображения об ограниченности вариаций этих величин в сторону их уменьшения, основанные на некоторых ограничениях, приведенных далее (см. соотношения (63), (69)).

### Электромагнитное взаимодействие

Существует несколько соображений, ограничивающих значение постоянной  $\alpha_e$ . Наиболее впечатляющим является возможное ограничение, следующее из настабильности протона (см. разд. 6 гл. 1). Из формулы (9) следует, что время жизни протона  $t_p$  очень сильно (экспоненциально) зависит от значения  $\alpha_e$ . Очевидное ограничение на время  $t_p$  — неравенство

$$t_p > t_u \sim 1/H \sim 10^{17} \text{ с.} \quad (54)$$

Используя формулу (9), нетрудно получить, что это неравенство выполняется, если

$$\alpha_e < 1/80. \quad (55)$$

Если бы осуществлялось обратное неравенство, то практически все протоны распались бы в конечном счете на позитроны, фотоны и нейтрино. Позитроны и электроны аннигилировали бы, и в такой Вселенной была бы чрезвычайно унылая картина. Вселенная состояла бы из безмассовых частиц; никакие устойчивые связанные состояния в ней не существовали бы.

Ограничение снизу на константу  $\alpha_e$  можно получить из требования возможности большого объединения (см. разд. 5 гл. 1). В рамках этой объединенной теории существуют  $X$ -бозоны с массой  $m_{wes}$ , также экспоненциально зависящей от  $\alpha_e$ . Давно высказывалось мнение (М. А. Марков), что наибольшая масса элементарных частиц — это планковская масса:  $m_{Pl} \sim (\hbar c/G)^{1/2} = \alpha_g^{-1/2} m_p \sim 10^{19} \text{ ГэВ}$ <sup>38</sup>. Сейчас это мнение распространено весьма широко. В современной теории большого объединения масса  $m_{wes} \sim 10^{15} \text{ ГэВ}$  сравнительно близка к массе  $m_{Pl}$ . Поэтому, если объединить два требования: существование  $X$ -бозона и условие  $m_{wes} < m_{Pl}$ , — нетрудно получить (см. разд. 5, формулу (7) гл. I)

$$\alpha_e > 1/170. \quad (56)$$

Ограничения на значения  $\alpha_e$  можно получить также из ядерной физики. Электростатическое отталкивание протонов в ядрах должно быть меньше, чем их притяжение, обусловленное сильным взаимодействием. Энергия связи нуклонов в ядре (как упоминалось выше)  $\sim 8 \text{ МэВ}$ . Электростатическая энергия  $\epsilon_e \sim e^2/r_N \sim \alpha_e m_\pi c^2$ . Следовательно, должно осуществляться неравенство

$$\alpha_e < 8/m_\pi (\text{МэВ}) \sim 1/20. \quad (57)$$

Другое соотношение можно получить из условия осуществимости в звездах термоядерных реакций (45). Чтобы термоядерные реакции проходили эффективно, необходимо выполнение соотношения  $kT \sim \alpha_e^2 m_p c^2$ . В звездах значение  $kT \sim GM_s m_p / R_s$ . Используя выражения (46) для массы  $M_s$  и радиуса  $R_s$  звезды, получаем еще

<sup>38</sup> Впервые в физику это значение массы было введено Планком в начале столетия.



одно ограничение:

$$\alpha_e \sim m_e/m_p \sim 10^{-3}. \quad (58)$$

Таким образом, из многих соображений о существовании устойчивых связанных состояний следует, что в любой Вселенной, в которой существуют устойчивые связанные состояния, должно осуществляться приблизительно  $\alpha_e \sim 1/100$ .

### Слабое взаимодействие

Слабое взаимодействие играет решающую роль в формировании структуры Вселенной в двух аспектах, оно определяет: 1) процесс нуклеосинтеза (см. разд. 5 гл. 2) и 2) основную термоядерную реакцию водородного цикла в звездах (см. разд. 7 гл. 2).

Рассмотрим влияние значения константы  $\alpha_w$  на оба процесса. Для существующей структуры Вселенной весьма важно следующее обстоятельство: доля  $\alpha$ -частиц (относительно протонов) не равна 0 или 1, а имеет промежуточное значение (0,25 по массе). В том случае, если бы  $\alpha$ -частицы полностью отсутствовали, было бы невозможно тройное слияние  $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$  и, следовательно, отсутствовали бы сложные элементы. Если бы протоны полностью перешли в  $\alpha$ -частицы, то отсутствовал бы водород — основа сложных органических соединений.

Однако доля  $n_\alpha/n_p$  определяется отношением  $n_n/n_p$  в эпоху нуклеосинтеза ( $t_u \sim 10 \div 200$  с). В свою очередь концентрация нейтронов зависит от их времени жизни  $\tau_n$ . Известно, что  $\tau_n \propto \alpha_w^{-2}$ . Поэтому если, например, константа слабого взаимодействия  $\alpha'_w \sim 10\alpha_w$ , то время жизни нейтронов было бы мало ( $\sim 10$  с) сравнительно с длительностью эпохи нуклеосинтеза и их концентрация в эту эпоху была бы ничтожна. Качественно зависимость концентрации нейтронов от  $t_u$  при измененном значении константы  $\alpha_w$  ( $\alpha'_w = 10\alpha_w$ ) представлена на рис. 8 штриховой линией. В этом случае нейтроны практически отсутствовали бы и космический нуклеосинтез не осуществлялся бы. Вселенная состояла бы почти исключительно из водорода.

В противоположном случае, при значительном уменьшении константы  $\alpha_w$  ( $\alpha''_w \lesssim 0,1\alpha_w$ ), реакции (27), определяющие статистическое равновесие между нейтронами и протонами, начинают осуществляться слишком поздно — уже после прохождения эры нуклеосинтеза. При

уменьшенном значении  $\alpha_w$  реакции (27) во время нуклеосинтеза будут протекать настолько медленно, что они не успеют обеспечить статистическое равновесие. Поэтому относительная доля нейтронов не будет меняться после прохождения Вселенной эпохи больших температур ( $T_u \sim 10^{13}$  К; адронная эра), когда отношение  $n_n/n_p \sim 1$ . Этот случай отображен на рис. 8 штрихпунктирной линией. В этом случае практически все протоны в конечном счете перейдут в  $\alpha$ -частицы.

Несомненно, что значительное изменение константы  $\alpha_w$  привело бы к существенному изменению характера эволюции звезд главной последовательности. К сожалению, соответствующие расчеты отсутствуют, и поэтому приходится ограничиться лишь качественными рассуждениями. Значительное увеличение константы  $\alpha_w$  приведет к увеличению скорости основной термоядерной реакции превращения двух протонов в дейтон (см. разд. 7 гл. 2). При достаточно большой скорости протекания этой реакции выделяющееся тепло не смогло бы полностью выходить наружу; внутренность звезд нагревалась бы, что привело бы к еще большей интенсификации термоядерных реакций и в конечном счете к взрыву звезды.

Наоборот, значительное уменьшение константы  $\alpha_w$  привело бы к быстрому переходу термоядерных звезд главной последовательности в белые карлики и нейтронные звезды. Действительно, единственный мыслимый путь компенсации уменьшения энерговыделения за счет термоядерных реакций, обусловленного уменьшением константы  $\alpha_w$ , — это увеличение температуры звезды, что возможно (при неизменной массе  $M_s$ ) лишь за счет уменьшения ее радиуса. Когда радиус  $R_s$  достигает размеров белого карлика, вступают в игру квантовые эффекты (принцип Паули; см. разд. 7 гл. 2), которые будут препятствовать дальнейшему сжатию звезды.

## Гравитационное взаимодействие

Строго говоря, изменение гравитационного взаимодействия (по крайней мере в пределах 1—2 порядков) не приведет к качественному изменению физической структуры Вселенной. Гравитационная константа определяет характеристики звезд, галактик и, по-видимому, Вселенной в целом (см. далее), и создается впечатление, что сравнительно небольшое ее изменение приводит лишь к соответствующим вариациям параметров этих

структурных элементов, не разрушая физических основ, необходимых для их существования.

Этот вывод верен, но лишь с одной оговоркой: если Вселенная открыта. Если Вселенная закрыта, т. е.  $\rho > \rho_c$  (см. разд. 2 гл. 2), то существуют некоторые ограничения на возможные изменения константы  $\alpha_g$ . Эти ограничения вытекают из условий (30), (31), необходимых для образования галактик. Хотя, как это подчеркивалось в разд. 6 гл. 2, сейчас отсутствует законченная теория образования галактик, тем не менее можно сформулировать условия, при которых они могут рождаться. В частности, должны осуществляться условия (30), (31), в которые входит температура  $T_u$  реликтового излучения. Из обоих условий вытекает, что в процессе эволюции Вселенной наступала эпоха, когда температура  $T_u$  была меньше определенного значения  $T_u^{(m)}$ <sup>39</sup>.

В открытой Вселенной температура  $T_u$  беспрестанно уменьшается, пока не достигнет значения  $T_u = 0$  (при  $t_u \rightarrow \infty$ ). Поэтому в «жизни» открытой Вселенной всегда существует эпоха, когда начнет осуществляться условие  $T_u < T_u^{(m)}$ , определяемое соотношениями (30), (31).

Но иная ситуация возникает в закрытой Вселенной. В этом случае всегда существует температура  $T_{u \min}$ , соответствующая  $R_u = R_{u \max}$ . В это время температура  $T_u$  имеет минимальное значение  $T_{u \min}$ . При последующем сжатии температура  $T_u$  будет возрастать. Следовательно, в закрытой Вселенной, в которой формируются галактики, должно выполняться условие

$$T_{u \min} < T_u^{(m)}. \quad (59)$$

По порядку величины в закрытой Вселенной время  $t_{u \max} \sim R_{u \max}/c \sim GM_u/c^3$ . Это соотношение можно рассматривать как следствие различных аргументов: 1) эмпирического соотношения, которое выполняется для нашей Вселенной, 2) соображений размерности.

Из антропного принципа ( $t_u \sim t_s$ ) (см. разд. 6 гл. 3) и наблюдательных данных следует, что

$$M_u \sim \alpha_g^{-2} m_p. \quad (60)$$

Тогда  $t_{u \max} \sim G\alpha_g^{-2} m_p/c^3$ , и, подставляя это значение в выражение для температуры  $T_u$  (22), получаем значение

<sup>39</sup>  $T_u^{(m)}$  — температура, при которой осуществляются условия (30), (31).

$T_{u \min}$  в закрытой Вселенной:

$$T_{u \min} \sim \alpha_g^{1/4} m_p c^2 / k. \quad (61)$$

Подставляя это выражение в соотношения (30), (31) и принимая  $E_\gamma \sim kT$ ,  $\epsilon_H \sim \alpha_e^2 m_e c^2$ , получаем ограничения на значения константы  $\alpha_g$ :

$$\alpha_g^{1/4} < S^{-1}, \quad (62)$$

$S = n_\gamma / n_p$ ; во Вселенной  $S \sim 10^8 \div 10^{10}$ ,

$$\alpha_g^{1/4} < \alpha_e^2 \frac{m_e}{m_p}. \quad (63)$$

Еще одно ограничение на величину  $\alpha_g$  можно получить при тех же предположениях, используя условие  $t_u < t_p$  (время жизни протона; разд. 6 гл. 1). Опираясь на формулы (9) и (60), нетрудно получить

$$\ln \alpha_g \gtrsim -(\alpha_e)^{-1}. \quad (64)$$

Подчеркнем, что в нашей Вселенной соотношения (62) — (64) выполняются, но на пределе, без сколь угодно значительного запаса.

Любопытно отметить, что соотношение, близкое к (64), было получено давно Ландау и Померанчуком из совершенно иных соображений. Они анализировали самосогласованность, замкнутость квантовой электродинамики при очень больших передаваемых импульсах (массах  $m$ ) и пришли к заключению, что при массах  $m \gtrsim (\hbar c \alpha_e / G)^{1/2}$  квантовая электродинамика становится логически незамкнутой теорией. Чтобы устранить эту незамкнутость, достаточно допустить, что при столь больших передаваемых массах суммарное взаимодействие определяется гравитационными силами и выполняется соотношение  $\ln \alpha_g \sim -(\alpha_e)^{-1}$ .

#### 4. РАЗМЕРНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА

Вероятно, из всех фундаментальных постоянных более остальных известна (или, по крайней мере, привычна) размерность физического пространства  $N = 3$ .

С первого взгляда сама постановка вопроса о природе размерности кажется абсурдной. Неужели автор решится посягнуть на святая святых физики — размерность пространства и использовать метод вариации фундаментальных постоянных для ответа на вопрос: почему мы живем

в трехмерном пространстве? Подобный риторический вопрос имеет вполне резонные основания. Изменение столь фундаментальной характеристики, как размерность  $N$ , может привести к непредсказуемым изменениям физических законов. Здесь придется взять ответственность на себя. Действительно, автор решился изменить размерность пространства, полагая, что можно (и даже нетрудно) предсказать некоторые физические законы при изменении размерности пространства, сохраняя за ним другое свойство — евклидовость, т. е. однородность и изотропию. Поскольку такое утверждение может показаться проявлением чрезмерной авторской самонадеянности, целесообразно сослаться на авторитет Эренфеста, которому мы и будем следовать в этом разделе. Именно Эренфест в 1917 г. попытался ответить на вопрос: почему физическое пространство трехмерно?

Чтобы подойти к ответу на этот вопрос, по-видимому, проще начать несколько издалека. Из школьной физики известна аналогия между законом Кулона и законом всемирного притяжения (законом Ньютона). В обоих случаях сила  $F \propto r^{-2}$ . В курсах физики (в том числе в институтских) эти законы излагаются независимо. Эта разорванность изложения заслоняет глубокую связь электромагнитных и гравитационных сил со свойствами пространства, и в частности с его размерностью.

Гравитационные и электромагнитные взаимодействия обладают двумя общими свойствами: они слабые и дальнodelствующие. На современном языке это означает, что масса обменных частиц в обоих случаях равна нулю, и, следовательно, радиус взаимодействия равен бесконечности, а константы взаимодействия  $\alpha_g, \alpha_e \ll 1$  (см. разд. 4 гл. 1 и табл. 2 и 3).

На более привычном языке физики Фарадея—Максвелла эти свойства означают, что силовые линии, начинающиеся в точке, где расположен их источник, продолжаютcя при отсутствии другого источника до бесконечности, нигде не пересекаясь. То обстоятельство, что силовые линии продолжаютcя до бесконечности, отражает дальнodelствие гравитационных и электромагнитных сил; отсутствие пересечения — отсутствие взаимодействия между силовыми линиями, т. е. слабость взаимодействий.

Совокупность обоих свойств (слабости и дальнodelствия) не характерна для других взаимодействий. Так называемое слабое взаимодействие имеет ограниченный

радиус, поскольку масса обменных частиц не равна нулю. Масса обменных частиц сильного взаимодействия — глюонов — равна нулю. Однако константа  $\alpha_s \sim 1$  (при  $r \sim r_N$ ), и поэтому силовые линии существенно пересекаются, образуя новые силовые линии, что отражает наличие цветового заряда у глюонов и их сильное взаимодействие между собой.

Однако вернемся к далекодействующим взаимодействиям. Поскольку в этом случае силовые линии точечного источника не пересекаются и уходят в бесконечность, то их полное число остается постоянным в пространстве. Это число пропорционально заряду (массе) частицы.

Сила  $F$ , действующая со стороны одной частицы на другую частицу, находящуюся на расстоянии  $r$  от первой, пропорциональна плотности  $n_i$  силовых линий. Поэтому

$$F \propto n_i = f/4\pi r^2. \quad (65)$$

Коэффициент пропорциональности  $f$  в уравнении (60) по определению равен произведению зарядов обеих частиц (закон Кулона) или масс (закон Ньютона). Знаменатель в уравнении (65) — значение поверхности  $S$  шара. Для трехмерного пространства это значение равно  $S_3 = 4\pi r^2 = a_3 r^{3-1}$ .

Можно провести это же рассуждение и в более общем случае для  $N$ -мерного пространства. Поверхность шара в таком пространстве  $S_N = a_N r^{N-1}$ . Поэтому сила  $F_N$ , действующая в  $N$ -мерном пространстве:

$$F_N = b_N/r^{N-1}. \quad (66)$$

Соответственно потенциальная энергия

$$U_n = -b_N/(N-2) r^{N-2}, \quad (67)$$

$N \neq 2$ , при  $N = 2$  зависимость логарифмическая. Подчеркнем еще раз, что эти выражения верны при целочисленном  $N$ , но лишь для далекодействующих сил в квазистатическом приближении, т. е. при движении в центральном поле. Основное утверждение заключается в следующем: существование устойчивых орбит в центральном поле в  $N$ -мерном пространстве определяется уравнением (66) и, следовательно, размерностью  $N$ .

Из механики известно, что существование устойчивых орбит обуславливается видом зависимости эффективно-го потенциала  $U_{Ne} = U_N + \frac{M^2}{2mr^2}$  ( $M^2/2mr^2$  — центробеж-

ная энергия,  $M$  — момент количества движения,  $m$  — масса тела, движущегося на расстоянии  $r$ ). Устойчивое состояние возможно, если в зависимости  $U_{Ne}(r)$  существует минимум при значении  $r$ , не равном нулю или бесконечности<sup>40</sup>.

Приведем результаты анализа функции  $U_{Ne}(r)$  на существование экстремума.

1. При  $N > 4$  зависимость  $U_{Ne}(r)$  имеет максимум при  $r \neq 0$ ; минимум — при  $r = 0$ , что соответствует слиянию обеих частиц.

2. При  $N = 4$  зависимость  $U_{Ne}(r)$  — монотонно падающая функция без экстремумов.

3. При  $N = 2$  и  $3$  функция  $U_{Ne}(r)$  имеет минимум при  $r \neq 0$  или  $r \neq \infty$ .

4. При  $N = 1$  функция  $U_{Ne}(r)$  — монотонно возрастающая функция.

Наличие минимума в зависимости  $U_{Ne}(r)$  — необходимое условие устойчивости движения. По этой причине существование и свойства замкнутых орбит определяются размерностью пространства  $N$ . При  $N \geq 4$  минимум при  $r \neq 0, \infty$  отсутствует; следовательно, отсутствуют и устойчивые замкнутые орбиты. Любое движение, обусловленное далекодействующими силами, сводится к двум типам: инфинитному (тело уходит в бесконечность) или падению движущегося тела на центральное массивное тело.

При  $N = 2$  и  $3$  возможны все типы движения: инфинитное, падение на центр и (что самое важное) устойчивые замкнутые орбиты.

При  $N = 1$  возможны только финитные движения; тело не может уйти в бесконечность.

Поясним последний тезис. В одномерном случае отсутствует орбитальное движение и центробежный потенциал равен нулю ( $M = 0$ ). Эффективный потенциал (см. (67))  $U_1 = b_1 r$ , а сила  $F_1 = \text{const}$ . Этот случай соответствует бесконечно глубокой потенциальной яме. Чтобы извлечь из нее тело, нужно затратить бесконечную силу, что и соответствует невозможности для тела уйти в бесконечность.

Таким образом, степень устойчивости возрастает при уменьшении размерности  $N$ . При  $N \geq 4$  не существует аналогов планетных систем.

---

<sup>40</sup> Отметим, что далее рассматриваются силы притяжения, для которых  $U_N < 0$ .

Сходные рассуждения были проведены и в рамках квантовой механики (Тангелини, Гуревич и Мостепаненко); эти исследования продемонстрировали, что при  $N \geq 4$  также отсутствуют устойчивые атомарные системы.

Представляется, что в этих пунктах (отсутствие аналогов планет и атомов) при  $N \geq 4$  ключ к пониманию значения размерности пространства  $N = 3$  (см. также разд. 6 наст. гл.).

## 5. СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ И КВАНТОВЫЕ ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Наличие основных квантовых чисел необходимо для существования фундаментальных устойчивых состояний.

Спин электронов (точнее, его полуцелое значение) обуславливает принцип Паули, запрещающий фермионам занимать тождественные состояния. Этот принцип — одно из оснований периодической системы элементов, т. е. разнообразия химических соединений. Без него все атомарные электроны занимали бы основное нижнее энергетическое состояние. Валентные связи, обусловленные структурой таблицы Менделеева, отсутствовали бы, что привело бы, по-видимому, к невозможности образования сложных соединений.

Еще более значительную и прозрачную роль играет изотопический спин. В частности, определяющую роль в структуре Вселенной играет изодублетность нуклонов, т. е. тот факт, что нуклонный мультиплет включает и протоны, и нейтроны. Действительно, если бы нуклоны были изосинглетами, то произошли бы очевидные «катастрофические» последствия. Например, если бы существовали нейтроны, но отсутствовали протоны, то заряд ядер был бы равен нулю и атомы, обусловленные электромагнитным взаимодействием, отсутствовали бы. Если бы существовали только протоны (при отсутствии нейтронов), то либо реакция слияния двух протонов отсутствовала бы вовсе (дейтона нет!), либо она определялась бы электромагнитным взаимодействием (см. (53)). В этом случае (как уже упоминалось в разд. 3 наст. гл.) в процессе нуклеосинтеза выгорел бы весь водород. Все более сложные реакции нуклеосинтеза также шли бы по электромагнитному или сильному взаимодействию, что привело бы к нестабильности звезд.

Стабильность атомных ядер, состоящих только из протонов, также уменьшилась бы. Физические основания



для этого утверждения очевидны. Существование в ядрах нейтронов увеличивает расстояние между двумя соседними протонами и, следовательно, уменьшает влияние принципа Паули и электростатического отталкивания, стремящихся разрушить ядра. Изотриплетность нуклонов, т. е. существование, помимо протона и нейтрона, отрицательно заряженного аналога протона (частицы с положительным барионным зарядом и отрицательным электрическим), привело бы к тому, что ядра были бы (почти) электронейтральны, т. е. к отсутствию сложных атомов. Этот вывод следует из общих динамических соображений. Любая система стремится занять низшее энергетическое состояние, которое в данном случае соответствует минимальной электростатической энергии, т. е. взаимной компенсации заряда протонов и их «отрицательных» аналогов.

В рамках большого объединения находит естественное объяснение существование других квантовых чисел (странности, очарованности и т. д.), а также существование сравнительно большого числа лептонов. В разд. 4 гл. 2 отмечалось, что барионная асимметрия Вселенной — основа ее сложной структуры. Наиболее естественная и простая интерпретация барионной асимметрии, включающая нарушение зарядовой симметрии, основана на схеме Кобаяши—Маскава, требующей по крайней мере существования шести различных кварков и лептонов. Кварки должны отличаться квантовыми числами. Реально они маркируются странностью, очарованностью и т. д. Схема Кобаяши—Маскава, возможно, является также ключом к ответу на мучивший многие поколения физиков вопрос: зачем нужен мюон? Ответ состоит в том, что мюон — один из лептонов, обеспечивающих барионную асимметрию Вселенной.

В настоящее время обнаружено по пяти кварков и лептонов. Однако осталось мало скептиков, сомневающихся в существовании шестого кварка и шестого лептона.

Разумеется, приведенное рассуждение не доказательство. Схема Кобаяши—Маскава хотя и простейшая, но не единственная. Все же сложившуюся ситуацию с кварками и лептонами можно рассматривать как указание, что и в этом пункте природа не терпит «архитектурных» излишеств.

## 6. АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП

Впервые, по-видимому, антропный (anthropic) принцип сформулировал Дикке в 1961 г. Впоследствии этот принцип активно развивался лучшими английскими физиками и астрофизиками, работавшими в Кембридже (Хокинг, Рис, Картер). Кажется крайне правдоподобным, что сильное влияние на развитие антропного принципа оказал Дирак, работавший длительное время в Кембридже <sup>41</sup> (см. разд. 7 наст. гл.).

В начале этого раздела автор проявил сомнение в приоритете формулировки этого принципа. В оправдание такой точки зрения можно привести известную расплывчатость (с точки зрения физика) предложенной английскими исследователями формулировки этого принципа: существование «наблюдателя» во Вселенной накладывает ограничения на физические законы. Хотя обычно понятие «наблюдателя» трактуется более широко, чем существование человека. «Наблюдателя» понимают как высокоорганизованное существо. Тем не менее неопределенность формулировки этого принципа не позволяет приписать его определенному лицу. С известным основанием можно, например, полагать, что этот принцип сформулировал Птолемей.

Но, вероятно, от приоритетных дискуссий целесообразно перейти к приложениям, которые должны продемонстрировать совершенно иной уровень современного понимания антропного принципа сравнительно с его трактовкой древними астрономами.

Неоднократно упоминалось (см., например, разд. 2 гл. 2), что средняя плотность вещества во Вселенной  $\rho \sim \rho_c$ . Это совпадение не имеет строгих физических обоснований. Из общих физических принципов плотность  $\rho$  могла бы иметь любое значение. Тем не менее в нашей Вселенной осуществляется (приблизленно) именно это соотношение. Его объяснение — «классический» пример применения антропного принципа.

Если бы во Вселенной осуществлялось неравенство  $\rho \ll \rho_c$ , то силы инерции преобладали бы над силами тяготения и галактики (а следовательно, и «наблюдатель») не могли бы сформироваться. Даже при значении

---

<sup>41</sup> В настоящее время Дирак работает в США.

$\rho \sim 0,1 \rho_c$  теория образования галактик испытывает существенные затруднения (см. разд. 6 гл. 2).

Если бы во Вселенной осуществлялось неравенство  $\rho \gg \rho_c$ , то теория происхождения галактик не имела бы никаких трудностей. Однако время цикла замкнутой Вселенной быстро уменьшается с увеличением  $\rho$ . Поэтому в подобной Вселенной (при  $\rho \gg \rho_c$ ) не хватило бы времени для формирования «наблюдателя». Например, по геологическим данным, даже простейшие микроорганизмы возникли «всего» 3 млрд. лет тому назад.

Другой пример антропного принципа — интерпретация исключительно малого (сравнительно с единицей) значения константы  $\alpha_g$ . Как отмечалось ранее (см. разд. 1 наст. гл.), параметры звезд плавно зависят от значения  $\alpha_g$ . Поэтому при увеличении константы  $\alpha_g$  даже на несколько порядков со звездами «ничего страшного не произойдет»; они будут существовать, хотя их масса существенно уменьшится. Однако вместе с уменьшением массы уменьшится и время жизни  $t_s$  звезды ( $t_s \propto \alpha_g^{-1}$ , соотношение (48)). Поэтому увеличение  $\alpha_g$ , например, в 100 раз приведет к такому же уменьшению ее времени  $t_s$  существования. Этот факт помешает формированию «наблюдателя». Следовательно, даже сравнительно небольшое увеличение  $\alpha_g$  (на 1—2 порядка) недопустимо во Вселенной, в которой существует «наблюдатель».

Еще один пример. Ранее (см. разд. 6 гл. 2) отмечалось, что излучение системы резко падает, если происходит рекомбинация, т. е. объединение протонов и электронов в нейтральные атомы. Этот процесс происходит очень эффективно при  $T \lesssim 1000$  К. Как ранее указывалось, температура поверхности видимых звезд  $T_s \gtrsim 2000$  К (см. табл. 6). Однако (как указал Картер) температура  $T_s$  очень сильно зависит от соотношения между константами  $\alpha_e$  и  $\alpha_g$ . Именно, чтобы рекомбинация была неэффективна, необходимо условие

$$\alpha_g^{1/2} \gtrsim \alpha_e^6 (m_e/m_p)^2. \quad (68)$$

Это условие выполняется во Вселенной, но опять-таки на пределе. Если бы выполнялось обратное неравенство, то светимость звезд резко упала бы и возникновение «наблюдателя» на планетах оказалось бы если и не невозможным, то, по крайней мере, сильно затрудненным.

И, наконец, последний, уже физический пример. Много десятилетий физики и астрофизики размышляют над удивительной эмпирической связью между атомными посто-

янными и константой Хаббла, которая характеризует Вселенную. Эту связь можно записать следующим образом:

$$1/H_0 \sim \frac{\hbar}{m_e c^2} \alpha_g^{-1}. \quad (69)$$

Разумеется, эта связь выполняется довольно грубо, лишь по порядку величины; однако, учитывая, что константы, входящие в это соотношение, значительно отличаются по значениям, оно впечатляет. Попытки объяснить это соотношение делались неоднократно. В частности, Дирак предложил свою интерпретацию, основанную на гипотезе изменения фундаментальных постоянных во времени (см. след. разд.). Однако, пожалуй, наиболее ясное объяснение этого соотношения следует из антропного принципа. Наиболее благоприятная ситуация для возникновения «наблюдателя» возникает, если время  $t_s$  жизни звезды, не превышающее время существования Вселенной  $t_u$ , совпадает с ним по порядку величины. Поэтому «наблюдатель» возникает, если  $t_u \sim t_s$ . Используя для значений  $t_s$  и  $t_u$  выражения (48) и (15), получаем соотношение (69). Из этого соотношения и полагая, что для закрытой Вселенной  $t_u \sim GM_u/c^3$ , можно получить приближенное (опуская множитель  $m_p/m_e$  ввиду огромности  $M_u$ ) соотношение для массы Вселенной

$$M_u \sim \alpha_g^{-2} m_p, \quad (70)$$

которое, возможно по удивительной прихоти судьбы, выполняется для наблюдаемой Вселенной.

Можно по-разному оценивать физическое значение антропного принципа. Однако нужно отдать ему должное в одном отношении. Развитие антропного принципа существенно способствовало узакониванию вопроса: «Почему мир устроен так, а не иначе?» Ранее довольствовались вопросом: «Как устроен мир?»

## 7. О ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ

Подведем некоторые итоги. Структура Вселенной неустойчива к численным значениям фундаментальных постоянных в следующем смысле: структура качественно изменяется при сравнительно малом изменении численного значения фундаментальных постоянных: четырех констант взаимодействия  $\alpha_g$ ,  $\alpha_w$ ,  $\alpha_e$ ,  $\alpha_s$ , масс  $m_p$ ,  $m_n$ ,

$m_e$  частиц, из которых состоят структурные элементы Вселенной, и размерности пространства  $N$ . Качественное изменение структуры следует понимать как невозможность существования или (и) возникновения во Вселенной одного или нескольких основных устойчивых связанных состояний: ядер, атомов, звезд и галактик. Именно эти структурные элементы и определяют сложный лик нашей Вселенной. Изменение численного значения фундаментальных постоянных должно привести к исчезновению этих элементов, т. е. к упрощению структуры Вселенной. Наша Вселенная в ее современном цикле — сложная система, сложная относительно тех Вселенных, эволюцию которых можно описать, опираясь на известные нам динамические законы, но с измененными значениями фундаментальных постоянных. Здесь могут возникнуть два вопроса. В наших рассуждениях мы обычно акцентировали внимание на вариации одной константы. Не изменятся ли наши выводы, если варьировать две или все постоянные? На этот вопрос, можно, по-видимому, ответить отрицательно. Группа постоянных  $m_e$ ,  $\Delta m_N$ ,  $\alpha_e$ ,  $\alpha_s$  образует замкнутую взаимосвязанную систему постоянных с числом соотношений, существенно превышающим четыре, так что пределы их вариаций ограничены. Единственная возможность реализации сложных вселенных — это уменьшение массовых параметров  $m_e$  и  $\Delta m_N$ . Эту возможность нельзя отвергнуть, однако она кажется маловероятной ввиду флуктуационного характера значений  $m_e$ ,  $\Delta m_N$  и  $\varepsilon_d$  (см. разд. 2 и далее разд. 3 наст. гл.).

Более сложным является другой вопрос, на который сейчас нельзя дать однозначного ответа. Могут ли реализоваться столь же (или еще более) сложные Вселенные, как наша, при совместном изменении динамических законов и фундаментальных постоянных? В нашем распоряжении нет аппарата, позволяющего однозначно вывести уравнения квантовой теории поля из каких-то «первых» принципов. Однако, как мы видели на примере аналогии между законами Ньютона и Кулона, можно, задавая геометрические свойства пространства и некоторые дополнительные постулаты, вывести эти законы. Задавая характеристики пространства и свойства обменных частиц, можно вывести классические уравнения электродинамики.

Таким образом, в известной степени (хотя, подчеркиваем, не вполне однозначно) динамические уравнения

определяются свойствами пространства, которое, по крайней мере для слабого, сильного и электромагнитного взаимодействий, отождествляется с пространством, в котором осуществляется специальная теория относительности, — пространством Минковского.

Итак, динамические уравнения в значительной степени предопределяются геометрией. Выбор пространства, на фоне которого разыгрываются динамические события, в форме пространства Минковского предопределяется его экстремальной простотой: оно единственное плоское (евклидовое), максимально симметричное (изотропное, однородное) пространство.

Иной вопрос, сколько взаимодействий (или типов обменных частиц) существует во Вселенной? Лик нашей Вселенной определяется четырьмя взаимодействиями. Все четыре взаимодействия активно участвуют в формировании сложной структуры Вселенной. Уменьшение числа взаимодействий качественно изменяет структуру Вселенной (см. разд. 3 наст. гл.). Увеличение этого числа было бы возможно «архитектурным» излишеством.

После этих замечаний целесообразно привести таблицу, в которой подытоживаются возможные границы изменения фундаментальных постоянных. Буквы  $f_+$  ( $f_-$ )

Таблица 8

Обоснование	$f_-$	Констан- та	$f_+$	Обоснование
Флуктуативность константы	?	$m_e$	2,5	Существование атомов
Существование атомов	0,4	$\Delta m_N$	1,6	Существование ядер
Возможность построения единой теории поля	0,8	$\alpha_e$	1,6	Стабильность протонов и ядер
Существование сложных ядер	0,9	$\alpha_s$	1,1	Существование сложных ядер; существование водорода
Существование водорода	0,1	$\alpha_w$	10	Существование сложных элементов
Флуктуативность константы	?	$\alpha_g$	$10^4$	Образование галактик; антропный принцип
Антропный принцип. Отсутствие аналогов планетных систем	1	$N$	1	Отсутствие аналогов планетных систем и атомов

обозначают факторы, на которые можно умножить существующие во Вселенной численные значения фундаментальных постоянных, сохранив при этом все основные связанные состояния; ядра, атомы, звезды и галактики. В графе «обоснование» приводятся кратко аргументы, на основе которых определяются факторы  $f_+$  и  $f_-$ .

К табл. 8 полезны следующие комментарии. Аргументация для вычисления факторов  $f$  имеет различную степень обоснованности. Наиболее обоснованными можно считать оценки, опирающиеся на твердо установленные законы ядерной и атомной физики. Аргумент, основанный на распаде протона, весьма правдоподобен. Однако до экспериментального обнаружения этого факта все же он остается лишь гипотезой.

Аргументы, основанные на антропном принципе, в какой-то степени (по крайней мере, на современном уровне нашего понимания Природы) имеют качественный характер. Поясним лишь, что нереалистичность пространства с размерностью  $N = 1$  и 2 связана с невозможностью построения в них столь же сложных структур, как в трехмерном пространстве. Следует отметить, что в рамках общей теории относительности гравитационное взаимодействие в пространствах с размерностью  $N = 1$  и 2 отсутствует. Аргумент «флуктуативности» содержит также элементы гипотетичности<sup>42</sup>. Отметим лишь, что флуктуативность константы  $\alpha_g$  трактуется как исключительная малость ее значения сравнительно с единицей или другими константами.

В заключение подчеркнем, что можно величины, определяющие сложную структуру Вселенной, свести к безразмерным отношениям, т. е. к следующим числам.

Константы	$\alpha_g$	$\alpha_w$	$\alpha_e$	$\alpha_s$	$N$	$m_e/m_p$	$\Delta m_N/m_p$
Числа	$10^{-38}$	$10^{-11}$	$10^{-2}$	1	3	$10^{-3}$	$10^{-3}$

Отметим, что поскольку постоянные  $\alpha_g$ ,  $\alpha_w$ ,  $\alpha_s$  зависят от масс, то их численные значения принимались при тех величинах характеристических импульсов или масс, когда эти константы определяют основные структурные элементы Вселенной. Например, слабое взаимодействие играет определяющую роль в космологическом нуклео-

<sup>42</sup> Более подробно эта аргументация развивается в следующем разделе.

синтезе (см. разд. 5 гл. 2) при  $kT \sim m_e c^2$ . Поэтому в выражении для  $\alpha_w$  принималось значение  $m = m_e$ . Для констант  $\alpha_g$  и  $\alpha_s$  полагалось  $m = m_p$ .

Таким образом, можно заключить, что структура Вселенной определяется числами, приведенными выше. В известном смысле это утверждение — возвращение к концепции древних натурфилософов (Платон, Пифагор) о решающей роли чисел в структуре мироздания. Справедливости ради нужно отметить все же совершенно иной уровень понимания этого факта сравнительно с философскими учениями древних.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы столкнулись со следующим фактом: структура Вселенной весьма неустойчива к численным значениям фундаментальных постоянных. Сравнительно небольшое изменение этих значений (см. табл. 8) приводит к образу весьма упрощенной (сравнительно с нашей) вселенной — вселенной, в которой отсутствует гармония сложных структур. Как можно трактовать этот факт? Самое простое — не заметить его. Однако сейчас игнорировать его практически невозможно. Чтобы обосновать это заключение, следует несколько отвлечься от физики и уточнить основное понятие, с которым нам необходимо иметь дело. Что означает слово «вселенная»?

В это понятие обычно вкладываются три разных по существу содержания: 1) вселенная — все существующее; 2) вселенная — наблюдаемая область пространства; 3) вселенная — система, возникшая из (квази)точки примерно 20 млрд. лет назад и развивавшаяся далее по Фридману.

С первого взгляда кажется, что все три определения Вселенной согласуются между собой. Действительно, наблюдаемая часть Вселенной имеет размеры  $R_0 \sim 10^{28}$  см. В соответствии с теорией Фридмана также  $R_0 \sim c/H_0 \sim 10^{28}$  см. И далее: видимая Вселенная и есть «все на свете». Однако в такой точке зрения есть одно слабое звено. Почему то, что мы наблюдаем, и есть все существующее? Почему то образование, которое возникло примерно 20 млрд. лет назад из точки, и есть «все на свете»? Эти два естественных вопроса можно сформулировать по-другому. Что было до начала расширения Вселенной?



Что находится за ее пределами? Логически ничему не противоречит ответ: «Ничего».

Однако возникновение такого объекта, как Вселенная, из «ничего» противоречит всему нашему физическому опыту (правда, в масштабах, значительно меньших). Тем не менее на эту «маленькую» трудность закрывали до поры до времени глаза. Одна из причин подобной операции достаточно прозрачна: слишком неопределенны были представления о начальных этапах эволюции Вселенной. До точки — сингулярности — было далеко, и поэтому лучше было не касаться подобных «проклятых» вопросов. Однако за последнее время прогресс в понимании ранней Вселенной пошел весьма далеко. Сейчас сравнительно уверенно говорят о процессах, происходящих при времени  $t_u \sim 10^{-35}$  с (см. разд. 4 гл. 2), и тогда становится невозможным отмахнуться хотя бы от постановки вопроса: что было при  $t_u = 0$  и  $t_u < 0$ . И любой ответ: «Что-то было» — приводит с необходимостью к заключению, что все три определения Вселенной не согласованы между собой. Нужно пожертвовать либо первым определением, либо последними двумя.

К сожалению, сейчас нет установившейся традиции, позволяющей разрешить важнейшую терминологическую (да и не только терминологическую) проблему. Наблюдаемую область пространства с радиусом  $R_0 \sim 10^{28}$  см иногда (как это мы делали ранее) называют Вселенной, иногда Метагалактикой, иногда миром; встречаются термины мини-Вселенная или часть Вселенной. Поэтому следует, далее, уточнить наши определения. Сознвая, что в этой операции существуют элементы произвола, мы оставим термин «Вселенная» за всем существующим, за всем миром. Наблюдаемую же часть Вселенной, возникшей, по Фридману, примерно 20 млрд. лет назад, назовем Метагалактикой. Подчеркнем, что, вводя подобное различие в определениях, мы отходим от терминологии, принятой ранее в книге. Однако до сих пор не было нужды в анализе терминологических тонкостей, поэтому мы использовали наиболее привычные и популярные термины для обозначения всех трех содержаний этого понятия.

Автор прекрасно отдаст себе отчет в неудобстве использования в одной книге двух терминов (Вселенная и Метагалактика) для обозначения одного и того же объекта — наблюдаемой области пространства. Однако на данном этапе, когда многочисленные монографии заполнены термином «Вселенная», не вполне адекватным этому

понятию, нецелесообразно полностью от него отказываться. Двойственность использованной в книге терминологии отражает переходную ситуацию, когда представление о тождественности наблюдаемой части пространства (Вселенной Фридмана) и всего сущего еще не стало устаревшей догмой.

Итак, сейчас мы подошли к вопросу: что было с Метагалактикой при  $t_u = 0$  и со Вселенной при  $t_u < 0$ . Подобная постановка проблемы эквивалентна вопросам: как образуются Метагалактики и что происходит с нашей Метагалактикой при временах  $t_u \lesssim 10^{-35}$  с?

На рубеже 80-х годов (по-видимому, в связи с успехами объяснения барионной асимметрии на основе большого объединения)<sup>43</sup> в мировоззрении физиков наступил резкий психологический перелом. Ранее сама постановка вопроса о происхождении Метагалактики считалась неприличной из-за отсутствия экспериментальных подходов к судьбе Метагалактики при малых  $t_u$ . Сейчас же объяснение важнейшего факта — барионной асимметрии вызвало поток работ, посвященных происхождению Метагалактики и очень ранних этапов ее эволюции<sup>44</sup>. Однако для автора показателем поворота в общественном сознании стал, пожалуй, не этот поток работ, содержащих подчас новые и красивые идеи, а единичный факт, который, подобно прожектору, мгновенно осветил ситуацию. В середине 1982 г. происходил семинар, посвященный начальной стадии эволюции Метагалактики. Докладчик начал свое выступление словами: «Как теперь всем известно, существует множество метагалактик»<sup>45</sup>. Когда были произнесены эти слова, автор почувствовал себя бедным родственником на чужом пиру. Ему ранее казалось, что существование многих метагалактик — его личный секрет, а он оказался секретом Полишинеля! Однако у автора была лишь догадка: ситуация, в которой было вначале «ничто», а затем появилась точка, из которой про-

<sup>43</sup> Напомним (см. разд. 4 гл. 2), что барионная асимметрия — следствие несохранения барионного числа (частный случай такого несохранения — распад протона) и несохранения зарядовой четности (нарушения *CP*-инвариантности), которые возникают в некоторых вариантах большого объединения.

<sup>44</sup> В обсуждение этой проблемы существенный вклад внесли советские физики А. Д. Линде, М. А. Марков и А. А. Старобинский, а также А. Гус (США) и С. Хокинг (Англия).

<sup>45</sup> Мы в дальнейшем будем употреблять слово «метагалактика» для обозначения объектов, подобных нашей Метагалактике, но не тождественных ей.

изошла Метагалактика,— нелепость. Что-то — фон — должен был существовать и до рождения Метагалактики, а если был фон, то естественно допустить, что образование Метагалактики не уникальный процесс. Однако такого рода рассуждения не соответствовали физической моде, и автор предпочитал не предавать их гласности. И, разумеется, не такие рассуждения, а серьезное продвижение теории эволюции Метагалактики по направлению к сингулярности ( $t_u = 0$ ) является, по-видимому, причиной поворота в мировоззрении физиков, который привел к созданию моделей образования метагалактик.

Прежде всего возникает вопрос: как можно представить себе сосуществование многих метагалактик? Ответ проще всего мысленно моделировать с помощью бесконечного трехмерного пространства Евклида, включающего систему сфер различных диаметров, иногда пересекающих друг друга, а иногда топологически не связанных между собой (изолированные сферы). Каждая сфера «соответствует» метагалактике.

Разумеется, подобная картина хотя и наглядна, но, бесспорно, является серьезным упрощением. Метагалактики могут иметь несферическую форму, иметь разные размерности и различаться иными характеристиками.

Далее остановимся на моделировании возникновения метагалактик. Можно представить пространство, которое заполнено физическим вакуумом, т. е. особой однородной (в среднем) средой. В этой среде происходят флуктуации, наподобие возникновения ряби на спокойной воде. Такая «рябь», отщепляясь от фона, подчиняется уже собственным внутренним законам и эволюционирует в нечто похожее на нашу Метагалактику. Особенно легко моделировать рождение закрытых метагалактик. Дело в том, что в соответствии с теорией гравитации полная энергия закрытой метагалактики равна нулю<sup>46</sup>. Поэтому рождение такой метагалактики не требует привнесения в вакуум внешней энергии; закрытая метагалактика может рождаться спонтанно из вакуума («рябь на спокойной воде появляется при малейшем дуновении ветра»). Итак, сейчас (1983 г.) господствует мнение, что метагалактик (бесконечно) много. Но если метагалактик много, тогда невозможно отмахнуться от вопроса: почему в нашей Метагалактике реализуется набор фундаментальных посто-

---

<sup>46</sup> Масса Метагалактики компенсируется гравитационной энергией притяжения.

янных, необходимый для формирования ее сложной структуры? Каковы возможные ответы на этот вопрос? По-видимому, сейчас можно высказать следующие суждения. Одно из них принадлежит Дираку, который давно (1937 г.) предложил гипотезу изменения фундаментальных постоянных во время эволюции нашей Метагалактики. Дирак, разумеется, не обладал тогда той обширной информацией, которой мы располагаем в настоящее время. Он руководствовался прежде всего фактом, который поразил его воображение: малостью отношения  $\alpha_g/\alpha_e \sim \sim 10^{-36}$ . Дирак полагал, что все безразмерные фундаментальные величины должны быть  $\sim 1$ , а малость отношения  $\alpha_g/\alpha_e$  свойственна лишь ограниченному интервалу пространства — времени, в котором мы существуем.

Оригинальность идеи и авторитет Дирака породили множество экспериментальных исследований возможных изменений фундаментальных постоянных во времени. Особенно точные результаты были получены на основе исследования богатых урановых месторождений в Окло (Африка). Полученные результаты продемонстрировали отсутствие каких-либо тенденций к вариациям констант во времени. Приведем некоторые результаты, заимствованные в основном из книги В. Чечева и Я. Крамаровского «Радиоактивность и эволюция Вселенной» (М.: Наука, 1978). Так,  $|\dot{\alpha}_e/\alpha_e| < 10^{-17} \text{ год}^{-1}$ ,  $|\dot{\alpha}_s/\alpha_s| < 5 \cdot 10^{-19} \text{ год}^{-1}$ ,  $|\dot{\alpha}_u/\alpha_u| < 10^{-12} \text{ год}^{-1}$ ,  $|(h\dot{c})/(hc)| < 10^{-12} \text{ год}^{-1}$ ,  $|\dot{\alpha}_g/\alpha_g| < 10^{-10} \text{ год}^{-1}$ . Точка обозначает производную данной величины по времени. Поскольку время существования Вселенной  $\sim 2 \cdot 10^{10}$  лет, то приведенные цифры означают, что примерно за время современного цикла эволюции Вселенной, например, константа  $\alpha_e$  изменилась не более чем на  $10^{-7}$ , а постоянная  $\alpha_s$  — на  $10^{-8}$ .

Таким образом, экспериментальные данные опровергают идею Дирака. Это верно, но с одной оговоркой. Основные данные получены для эпохи, сравнительно близкой к современной. По геологическим данным, урановые месторождения в Окло существуют примерно  $10^9$  лет — время относительно небольшое сравнительно со значением  $\sim 2 \cdot 10^{10}$  лет (время существования Метагалактики). В течение миллиарда лет константы не менялись; но что было ранее? Непосредственных данных о вариации констант мало. Однако косвенные указания на неизменность констант вплоть до малых значений  $t_u$  существуют.

Вычисления космологического содержания гелия (см. разд. 5 гл. 2) проводились при современных значениях

постоянных. Результаты вычисления хорошо согласуются с опытом, что свидетельствует в пользу постоянства констант вплоть до времен  $t_u \sim 0,1$  с.

Более проблематичным является аргумент, основанный на квантовополевой интерпретации барионной асимметрии Метагалактики (разд. 4 гл. 2), поскольку он сам содержит гипотетический элемент — реальность большого объединения. Тем не менее исключительная красота и уникальность этой идеи объяснения барионной асимметрии указывает: к этому аргументу следует отнестись весьма серьезно. Тогда можно заключить, что вплоть до времен  $t_u \sim 10^{-35}$  с константы не изменялись. Однако совершенно неясно, что происходило при  $t_u < 10^{-35}$  с и в особенности при временах  $t_u \lesssim 10^{-43}$  с, когда эволюцию Метагалактики, по всеобщему убеждению, определяла квантовая гравитация, теория которой отсутствует.

После этих замечаний можно и нужно перейти к основному вопросу — причинах нестабильности структуры Метагалактики относительно численного значения фундаментальных постоянных.

Кажется, что сейчас можно дать лишь единственный ответ на этот вопрос. Наводящими указаниями будут служить два соображения: флуктуативность констант в нашей Метагалактике (см. разд. 7 гл. 3) и возможная множественность метагалактик. Нет никаких оснований полагать, что начальные условия образования метагалактик одинаковы. Наоборот, все, что мы знаем из физического опыта (правда, в других масштабах), свидетельствует о том, что возмущения имеют всегда некоторые распределения. Например, можно допустить, что амплитуда возникающей «ряби» распределена по какому-то неизвестному нам сейчас закону. Поэтому естественно полагать, что набор фундаментальных постоянных, формирующихся в процессе возникновения метагалактик, имеет различные значения.

Естественной модификацией этой гипотезы является допущение, что наша Метагалактика проходит множество циклов. В начале каждого цикла набор фундаментальных постоянных обновляется.

Возможное распределение начальных условий возникновения метагалактик имеет несколько аспектов:

1) геометрический — пространство, в котором эволюционирует Вселенная. Основная характеристика пространства — его размерность  $N$ ;

2) динамический — законы взаимодействия. На мате-

матическом языке это, в частности, означает постулирование группы преобразований динамических уравнений;

3) алгебраический — численное значение фундаментальных постоянных.

Хотя в традиционной физике все три аспекта выступают обычно как независимые элементы физики, есть основания полагать, что они взаимосвязаны. Яркий пример такой взаимообусловленности — общая теория относительности Эйнштейна, в которой геометрическое и динамическое описание гравитирующих тел эквивалентны. Эта теория — наиболее известный пример реализации программы объединения двух элементов физики: геометрии и динамики.

Сейчас значительные успехи наметились в реализации более общей программы: геометризации всей динамики. Правда, осуществление этой программы требует введения сравнительно сложных геометрических конструкций — расслоенных пространств. Усложняя конструкции, можно, вероятно, на геометрическом языке описать всю динамику.

Таким образом, наметился серьезный прогресс в объединении динамики и геометрии. Кажется, что и третий основной элемент физики — фундаментальные постоянные — не должен оставаться в стороне от этих объединительных тенденций. Однако следует прямо сказать, что конкретные успехи в объединении всех трех элементов физики значительно скромнее. Хотя и появляются работы, в которых из геометрических соображений пытаются вывести численные значения некоторых фундаментальных постоянных, ситуация в целом имеет скорее характер нереализованной программы. Пожалуй, наиболее общим вариантом этой программы является следующая картина.

Существует некое физическое пространство — вакуум большой (бесконечномерной?) размерности. Спонтанные флуктуации этого вакуума порождают вселенные со своими размерностями, наборами взаимодействий (группами преобразований динамических уравнений) и численными значениями фундаментальных постоянных. Все эти элементы физики взаимосвязаны. Геометрия и динамика — различные формы описания эволюций физических систем. Пространства, которые являются сценой для взаимодействия частиц, могут сами порождать числа — фундаментальные безразмерные константы. Простейший пример такого числа — размерность  $N$ . Приведем и дру-

гой пример, заимствованный из топологии. Связность — число областей, в каждой из которых две любые точки могут быть соединены непрерывной линией. Пример односвязного пространства — трехмерный шар. Пример двухсвязного пространства — два непересекающихся шара и т. д.

Приведенные примеры простейшие. Однако в геометрии существует множество взаимосвязей характеристик пространств и чисел. Кажется, что именно выбор физически осмысленной взаимосвязи между геометрией и фундаментальными числами — одна из основных задач физики; ее решение может привести к объединению всех трех элементов: геометрии, динамики и фундаментальных постоянных.

Некоторые фрагменты программы включения фундаментальных констант в динамику расширяющейся Метагалактики реализованы. Советские физики Д. А. Киржниц и А. Д. Линде предложили конкретную схему расщепления константы единого взаимодействия  $\alpha_u$  на константы изолированных взаимодействий. При температуре  $kT_u \sim m_{wesg}c^2 = 10^{19}$  ГэВ ( $t_u \sim 10^{-43}$  с) отщепляется гравитационное взаимодействие; при  $kT_u \sim m_{wes}c^2 \sim 10^{15}$  ГэВ ( $t_u \sim 10^{-35}$  с) отщепляется сильное взаимодействие; при  $kT_u \sim m_{we}c^2 \sim 10^2$  ГэВ ( $t_u \sim 10^{-10}$  с) расщепляется электрослабое взаимодействие. Все расщепившиеся взаимодействия проявляются как изолированные.

Хотя сейчас отсутствует законченная теория формирования масс элементарных частиц, большинство физиков убеждены, что массы и константы  $\alpha$  взаимосвязаны. Если это так и схема Киржница — Линде осуществляется в природе, то из всех чисел, приведенных на с. 102 и управляющих структурой Вселенной, независимыми останутся лишь два: размерность  $N$  и константа объединенного взаимодействия  $\alpha_u$ . Геометрия (пространство) должна порождать эти два числа.

Теперь пора перейти к основному выводу: что дает установленный нами факт неустойчивости структуры Метагалактики к значениям фундаментальных постоянных?

Прежде всего само существование Метагалактики с уникальным набором фундаментальных постоянных подкрепляет заключение: наша Метагалактика не единственная метагалактика. Иначе трудно объяснить появление редкого набора констант, необходимых для появления сложных форм вещества.

Более простым вариантом предложенной интерпретации является допущение о множестве циклов Метагалактики.

Подчеркнем, что важным выводом из проведенного анализа уже существующих распределений является заключение: реализованный в нашей Метагалактике набор фундаментальных постоянных — весьма резкая флуктуация. Этот вывод доказывается сравнением фундаментальных констант с другими постоянными: 1) исключительная малость значения массы  $m_e$  сравнительно с  $\langle m \rangle$ , 2) малость значения  $\Delta m_N$  сравнительно с  $\langle \Delta m \rangle$ , 3) малость значения  $\epsilon_d$  сравнительно с  $\langle \epsilon \rangle$ , 4) малость отношения  $m_p/m_{wes}$  сравнительно с единицей, 5) малость значения  $\alpha_g/\alpha_e$  сравнительно с единицей. Значения этих фундаментальных постоянных имеют флуктуационный характер. О таком характере «образования» фундаментальных постоянных свидетельствует и другой факт. Мы привели ряд соотношений между фундаментальными постоянными (см. (62)—(64)), необходимых для образования галактик в закрытой Метагалактике и возникновения ярких звезд (условие (68)). Все эти условия выполняются, но без запаса. Возможно, что это свидетельство в пользу того, что мы живем в закрытой Метагалактике. Тогда критичность этих соотношений (то, что они выполняются лишь на пределе) также свидетельство в пользу флуктуативного характера формирования констант. С этим фактом должна считаться любая теория, претендующая на интерпретацию численного значения фундаментальных постоянных.

По-видимому, наша Метагалактика — гигантская флуктуация (в смысле численного значения фундаментальных постоянных) среди других вселенных. Эта флуктуация — основа сложной структуры Метагалактики<sup>47</sup>.

---

<sup>47</sup> Отметим, что в 1983—1984 гг. (после написания книги) проблема образования Метагалактики вышла на авансцену современной физики. К сожалению, мы лишены возможности отразить этот прогресс. Он продемонстрировал правильность основного вывода книги — вывода о сосуществовании многих метагалактик.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Новиков И. Д.* Эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1983.
2. *Вайнберг С.* Первые три минуты.— М.: Энергоиздат, 1981.
3. *Зельдович Я. Б.* Современная космология.— Природа, 1983, № 9, с. 11—24.
4. *Райдер Л.* Элементарные частицы и симметрии.— М.: Наука, 1981.
5. *Клоуз Ф.* Кварки и партонны.— М.: Мир., 1982.
6. *Окунь Л. Б.* Лептоны и кварки.— М.: Наука, 1981.
7. *Фейнберг Г.* Из чего сделан мир?— В кн.: Достижения физики XX века.— М.: Мир, 1981.
8. *Розенталь И. Л.* Физические закономерности и численные значения фундаментальных постоянных.— УФН, 1980, т. 131, с. 239—256.
9. *Шкловский И. С.* Вселенная, жизнь, разум. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1980.
10. *Гуревич Л. Э., Чернин А. Д.* Происхождение галактик и звезд. М.: Наука, 1983.
11. *Гинзбург В. Л.* О теории относительности. М.: Наука, 1979.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	<b>Предисловие . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>Глава I.</b>	<b>Элементарные частицы . . . . .</b>	<b>7</b>
	1. Фундаментальные взаимодействия . . . . .	7
	2. Квантовые числа элементарных частиц . . . . .	12
	3. Основы классификации элементарных частиц . . . . .	18
	4. Как взаимодействуют элементарные частицы . . . . .	20
	5. Единые теории взаимодействий . . . . .	22
	6. Распад протона . . . . .	30
<b>Глава II.</b>	<b>Вселенная . . . . .</b>	<b>35</b>
	1. Немного истории . . . . .	35
	2. Фридмановская модель Вселенной . . . . .	38
	3. Горячая Вселенная . . . . .	45
	4. Барионная асимметрия Вселенной . . . . .	49
	5. Космологический нуклеосинтез гелия . . . . .	55
	6. Происхождение галактик . . . . .	60
	7. Звезды . . . . .	66
<b>Глава III</b>	<b>Вселенная и элементарные частицы . . . . .</b>	<b>72</b>
	1. О связи характеристик звезд и элементарных частиц . . . . .	72
	2. Структура Вселенной и массы элементарных частиц . . . . .	77
	3. Структура Вселенной и константы фундаментальных взаимодействий . . . . .	84
	4. Размерность пространства . . . . .	91
	5. Структура Вселенной и квантовые числа элементарных частиц . . . . .	95
	6. Антропный принцип . . . . .	97
	7. О численных значениях фундаментальных постоянных . . . . .	99
	<b>Заключение . . . . .</b>	<b>103</b>
	<b>Литература . . . . .</b>	<b>112</b>



**ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«НАУКА»  
ГОТОВИТСЯ  
К ПЕЧАТИ  
КНИГА:**

**ВЛАДИМИРОВ Ю. С.,  
МИЦКЕВИЧ Н. В.,  
ХОРСКИ Я.**

**Пространство, время,  
гравитация**

10 л. 75 к.

В предлагаемой читателю книге в популярной форме обсуждены современные представления о природе пространства и времени. Книга состоит из трех частей. В первой рассмотрена история развития науки о пространстве и времени. Основное внимание уделено анализу цепочки идей от Лобачевского до Эйнштейна. Во второй части изложены твердо установленные общей теорией относительности закономерности: объяснение загадки Меркурия, отклонение Солнцем лучей света, явление гравитационной линзы, расширение Вселенной и др. В третьей части обсуждены перспективы дальнейшего развития этой науки: проблемы обнаружения

гравитационных волн, различные обобщения эйнштейновской теории гравитации, проблемы размерности физического пространства-времени и др. Издание рассчитано на физиков, математиков и читателей, интересующихся проблемами теории пространства, времени, гравитации.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов «Книга—почтой» «Академкнига»:

480091 **Алма-Ата**, 91, ул. Фурманова, 91/97; 370005 **Баку**, 5, ул. Джапаридзе, 13; 320093 **Днепропетровск**, проспект Ю. Гагарина, 24; 734001 **Душанбе**, проспект Ленина, 95; 252030 **Киев**, ул. Пирогова, 4; 277012 **Кишинев**, проспект Ленина, 148; 443002 **Куйбышев**, проспект Ленина, 2; 197345 **Ленинград**, Петровская ул., 7; 220012 **Минск**, Ленинский проспект, 72; 117192 **Москва**, В-192, Мичуринский проспект, 12; 630090 **Новосибирск**, Академгородок, Морской проспект, 22; 620151 **Свердловск**, ул. Мамина-Сибиряка, 137; 700187 **Ташкент**, ул. Дружбы народов, 6; 450059 **Уфа**, 59, ул. Р. Зорге, 10; 720001 **Фрунзе**, бульвар Дзержинского, 42; 310078 **Харьков**, ул. Чернышевского, 87.