

УДК 539.12(023)

ББК 22.38

О 52

О к у н ь Л. Б. **Элементарное введение в физику элементарных частиц.** — 3-е изд., испр. и доп. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 128 с. — ISBN 978-5-9221-1070-9.

Популярно рассказывается о современном состоянии и перспективах физики элементарных частиц. Читатель знакомится с основными фундаментальными частицами — лептонами, кварками, фотонами, глюонами, W - и Z -бозонами. Попутно идёт речь о некоторых основных понятиях теории относительности, квантовой механики и теории поля, без которых невозможно получить правильное представление о сущности фундаментальных явлений, происходящих при взаимодействиях элементарных частиц.

Для школьников старших классов, студентов, преподавателей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к третьему изданию	4
Предисловие ко второму изданию	4
Предисловие к первому изданию	5
Шпаргалка: частицы и взаимодействия	8
Основные частицы: электрон, протон, нейтрон, фотон	9
Масса, энергия, импульс, угловой момент в механике Ньютона . .	12
Масса, энергия и импульс в механике Эйнштейна	15
Силы и поля	20
Квантовые явления	23
Атомные и ядерные реакции	27
Слабое и сильное взаимодействия	29
Физика высоких энергий	33
Ускорители	34
Античастицы	37
Адроны и кварки	40
Очарованные частицы	43
Невылетание кварков	44
Глюоны. Цвет	47
Лептоны	52
Поколения лептонов и кварков	53
Распады лептонов и кварков	55
Виртуальные частицы	61
Токи	66
C -, P -, T -симметрии	71
Нейтральные токи	78
Предсказанные W - и Z -бозоны	80
Открытие W - и Z -бозонов	85
Физика на коллайдерах после Z	93
«Тихая физика» и великое объединение	97
Суперобъединение?	104
Космология и астрофизика	106
Похвальное слово физике высоких энергий	109
20 лет спустя	112
Список литературы	122
Предметный указатель	123

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Третье издание выходит в дни, когда происходит запуск Большого Адронного Коллайдера в ЦЕРНе под Женевой. Это событие привлекает интерес широких кругов и оживленно освещается в средствах массовой информации. Возможно, эта книга поможет читателю понять, зачем построен Большой Адронный Коллайдер и на какие вопросы он должен дать ответ.

В этом издании исправлены некоторые опечатки. Я глубоко благодарен М. Н. Андреевой, Е. С. Артоболовской и Е. А. Ильиной за помощь при подготовке к печати второго и третьего изданий.

Москва. Ноябрь 2008 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Основной текст книги потребовал лишь «косметических» поправок. Наиболее важные достижения последних двадцати лет в физике, астрофизике и космологии кратко описаны в дополнительном разделе «20 лет спустя». Все, что казалось установленным в физике 20 лет тому назад, осталось верным и сегодня. С одной стороны, это объясняется тем, что фундамент физики XX века был построен добротно. С другой стороны, сократившееся в конце века финансирование заставило убить важнейшие ускорительные проекты и тем самым не позволило проверить некоторые фундаментальные гипотезы, обсуждаемые в книге. В первую очередь, это относится к открытию (или «закрытию») бозонов Хиггса. Эта важнейшая нерешенная задача перешла к новому поколению физиков, которым, быть может, будет полезна эта книга. Если человечество вообще, и политики в особенности, сохраняют крупницы здравого смысла, то решающие эксперименты в физике скажут свое слово в первой трети нового века.

Москва. Октябрь 2005 г.

*Памяти
Исаака Яковлевича Померанчука*

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Эта книга посвящена физике элементарных частиц, силам, действующим между ними.

Прежде всего — несколько слов о названии книги.

Начало современным исследованиям фундаментальных сил между частицами положило в 1896 г. открытие радиоактивности и последовавшее затем изучение α -, β - и γ -лучей. Завершением большого периода исследований было долгожданное и тем не менее сенсационное открытие в 1983 г. W - и Z -бозонов. Отсюда заглавие книги: $\alpha\beta\gamma\dots Z$. Но книга эта не об истории физики, а о ее современном состоянии и перспективах. Ведь открытие W - и Z -бозонов — это одновременно и начало нового многообещающего этапа. Физика — не алфавит, и на Z ее развитие не кончается. В некотором смысле название $\alpha\beta\gamma\dots Z$ указывает на то, что книга является, так сказать, букварем, введением в азы современной фундаментальной физики.

В основу книги легли научно-популярные лекции, которые мне приходилось время от времени читать людям, далеким от физики элементарных частиц, а иногда далеким и от физики вообще. Последняя из этих лекций состоялась летом 1983 г., сразу после открытия Z -бозона. Обдумывая заданные во время лекции вопросы, я и наметил план этой книги.

Я старался написать книгу так, чтобы ее мог понять человек, окончивший или оканчивающий среднюю школу и активно интересующийся физикой. Я рассчитывал на то, что мой будущий читатель более или менее регулярно заглядывает в очередные выпуски журнала «Квант» и уже прочитал по крайней мере некоторые из книг серии «Библиотечка „Квант“». (Заметьте, что рисунок на обложке этой книги включает в себя символическое изображение α -, β - и γ -лучей с обложки первой книги, открывшей эту серию, — книги М.П. Бронштейна «Атомы и электроны».)

Основная опасность, которая меня подстерегала на каждой странице, — это произвольное желание сообщить читателю не

только самое главное, но и различные второстепенные детали, которые доставляют такое удовольствие специалистам и так мешают начинающим. Боюсь, что в некоторых случаях я недостаточно «прополол» текст, а в некоторых — переусердствовал.

Мне самому было интересно отобрать наиболее важные сведения, безжалостно отбросив всё менее существенное. Сначала я хотел ограничиться минимумом терминов и понятий. Но по мере написания книги обнаруживалось, что без некоторых терминов, без которых я вначале надеялся обойтись, нельзя объяснить суть тех или иных явлений; поэтому к концу книга усложняется. Ведь одна из основных трудностей при знакомстве с новой областью науки — это обилие новых терминов. В помощь читателю после предисловия приведена «шпаргалка» — сводка основных понятий физики элементарных частиц.

Физику элементарных частиц часто называют физикой высоких энергий. Процессы, которые изучает физика высоких энергий на первый взгляд очень необычны, их экзотические свойства поражают воображение. Вместе с тем, если вдуматься, то окажется, что в ряде отношений эти процессы отличаются от такого обыденного явления, как, скажем, горение дров, не качественно, а только количественно — величиной энерговыделения. Поэтому я начинаю книгу с элементарных вещей и, в частности, с короткого обсуждения таких, казалось бы, хорошо известных понятий, как масса, энергия и импульс. Правильное обращение с ними поможет читателю понять последующие страницы книги.

Узловым понятием всей фундаментальной физики является понятие поля. Я начинаю его обсуждение с хорошо известных школьных примеров и постепенно знакоблю читателя с тем богатством удивительных свойств, которыми обладают квантованные поля. Я старался объяснить попроще то, что можно объяснить более или менее просто. Но должен подчеркнуть, что далеко не все в современной физике можно объяснить просто и что для понимания целого ряда вопросов необходима дальнейшая углубленная работа читателя уже над другими, более сложными книгами.

Предварительный текст книги был закончен в октябре 1983 г. Его прочитали Л. Г. Асламазов, Я. Б. Зельдович, В. И. Кисин, А. В. Коган, В. И. Коган, А. Б. Мигдал, Б. Л. Окунь и Я. А. Смородинский. Они сделали очень полезные замечания, которые позволили мне упростить первоначальный текст, опустив ряд сравнительно сложных мест, и более подробно разъяснить ряд

других. Я глубоко благодарен им за это. Я благодарен Э.Г. Гуляевой и И.А. Тереховой за помощь при подготовке рукописи. Я признателен Карло Руббиа за разрешение воспроизвести в книге рисунки установки, на которой были открыты промежуточные бозоны.

С особой теплотой и благодарностью я хотел бы сказать здесь о моем учителе — академике Исааке Яковлевиче Померанчуке, который ввел меня в мир элементарных частиц и научил меня моей профессии. И.Я. Померанчук прожил короткую жизнь (1913–1966), но сделал необычайно много. Его работы сыграли фундаментальную роль в целом ряде разделов физики: в теории диэлектриков и металлов, в теории квантовых жидкостей, в теории ускорителей, в теории ядерных реакторов, в теории элементарных частиц. Его образ — образ человека, фанатически и бескорыстно преданного науке, человека, работавшего без усталости, с острейшим интересом ко всему новому, беспощадно критичного и самокритичного, от всей души радовавшегося чужому успеху — этот образ жив в памяти всех, кто знал его. Светлой памяти Исаака Яковлевича Померанчука я посвящаю эту книгу.

Москва. Сентябрь 1984 г.

ШПАРГАЛКА: ЧАСТИЦЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Атомы состоят из **электронов** e , образующих оболочки, и **ядер**. Ядра состоят из **протонов** p и **нейтронов** n . Протоны и нейтроны состоят из **кварков** двух типов, u и d : $p = uud$, $n = ddu$. Свободный нейтрон испытывает **бета-распад**: $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$, где $\bar{\nu}_e$ — **электронное антинейтрино**. В основе распада нейтрона лежит распад d -кварка: $d \rightarrow u e \bar{\nu}_e$.

Притяжение электрона к ядру — пример **электромагнитного взаимодействия**. Взаимное притяжение кварков — пример **сильного взаимодействия**. Бета-распад — пример проявления **слабого взаимодействия**. Кроме этих трех **фундаментальных взаимодействий** важную роль в природе играет четвертое фундаментальное взаимодействие — **гравитационное**, притягивающее все частицы друг к другу.

Фундаментальные взаимодействия описываются соответствующими **силовыми полями**. **Возбуждения** этих **полей** представляют собой частицы, которые называют **фундаментальными бозонами**. Электромагнитному полю отвечает **фотон** γ , сильному — восемь **глюонов**, слабому — три **промежуточных бозона** W^+ , W^- , Z^0 , гравитационному — **гравитон**.

У большинства частиц есть двойники — **античастицы**, имеющие те же массы, но противоположные по знаку заряды (например, электронный, слабый). Частицы, совпадающие со своими античастицами, т. е. не имеющие никаких зарядов, как, например, фотон, называют **истинно нейтральными**.

Наряду с e и ν_e известны еще две пары похожих на них частиц: μ , ν_μ и τ , ν_τ . Все они называются **лептонами**. Наряду с u - и d -кварками известны еще **две пары более массивных кварков**: c , s и t , b . Лептоны и кварки называют **фундаментальными фермионами**.

Частицы, состоящие из трех кварков, называют **барионами**, из кварка и антикварка — **мезонами**. Барионы и мезоны образуют семейство сильновзаимодействующих частиц — **адронов**.

ОСНОВНЫЕ ЧАСТИЦЫ: ЭЛЕКТРОН, ПРОТОН, НЕЙТРОН, ФОТОН

Физика элементарных частиц изучает мельчайшие частицы, из которых построен окружающий нас мир и мы сами. Цель этого изучения — определить внутреннюю структуру этих частиц, исследовать процессы, в которых они участвуют, и установить законы, которые управляют течением этих процессов.

Основным (но не единственным!) экспериментальным методом физики элементарных частиц является проведение опытов, в которых пучки частиц высоких энергий сталкиваются с неподвижными мишенями или друг с другом. Чем выше энергия столкновения, тем богаче процессы взаимодействия между частицами и тем больше мы можем узнать о них. Именно поэтому сегодня физика элементарных частиц и физика высоких энергий — это почти синонимы. Но мы начнем наше знакомство с частицами не с высокоэнергичных столкновений, а с обычных атомов.

Хорошо известно, что вещество состоит из атомов и что атомы имеют размеры порядка 10^{-8} см. Размеры атомов определяются размерами их оболочек, состоящих из электронов. Однако практически вся масса атома сосредоточена в его ядре. Ядро легчайшего водородного атома содержит один протон, а оболочка — один электрон. (В одном грамме водорода содержится $6 \cdot 10^{23}$ атомов. Следовательно, масса протона составляет примерно $1,7 \cdot 10^{-24}$ г. Масса электрона примерно в 2000 раз меньше.) Ядра более тяжелых атомов содержат не только протоны, но и нейтроны. Электрон обозначается буквой e , протон — буквой p , а нейтрон — буквой n .

В любом атоме число протонов равно числу электронов. Протон обладает положительным электрическим зарядом, электрон — отрицательным, а атом в целом электрически нейтрален. Атомы, ядра которых имеют одно и то же число протонов, но различаются числом нейтронов, называются изотопами данного

химического элемента. Так, например, наряду с обычным водородом, существуют тяжелые изотопы водорода — дейтерий и тритий, ядра которых содержат один и два нейтрона соответственно. Эти изотопы обозначаются соответственно ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, здесь верхний индекс указывает суммарное число протонов и нейтронов в ядре. (Заметим, что ядро дейтерия называют дейтроном, а ядро трития — тритоном. Мы будем обозначать дейтрон буквой D ; иногда его обозначают d .)

Обычный водород ${}^1\text{H}$ является самым распространенным элементом во Вселенной. Второе место занимает изотоп гелия ${}^4\text{He}$, электронная оболочка которого содержит два электрона, а ядро — два протона и два нейтрона. Еще со времени открытия радиоактивности ядро изотопа ${}^4\text{He}$ получило специальное название: α -частица. Менее распространен изотоп гелия ${}^3\text{He}$, в ядре которого два протона и только один нейтрон.

Радиусы протона и нейтрона примерно равны друг другу, они порядка 10^{-13} см. Примерно равны друг другу и массы этих частиц: нейтрон всего на десятую процента тяжелее протона. Нейтроны и протоны довольно плотно упакованы в атомных ядрах, так что объем ядра примерно равен сумме объемов составляющих его нуклонов. (Термин «нуклон» в равной степени обозначает и протон, и нейтрон и используется в тех случаях, когда различия между этими частицами несущественны. Слово «нуклон» происходит от латинского *nucleus* — ядро.)

Что касается размера электрона, то он до сих пор не поддается измерению. Известно только, что радиус электрона заведомо меньше 10^{-16} см. Поэтому обычно об электронах говорят как о точечных частицах.

Иногда электроны в атомах сравнивают с планетами Солнечной системы. Это сравнение — очень неточное в целом ряде отношений. Прежде всего, движение электрона качественно отличается от движения планеты в том отношении, что для электрона определяющими являются не законы классической механики, а законы квантовой механики, о которых мы будем говорить ниже. Пока же заметим, что в результате квантовости электрона «при мгновенной фотосъемке» атома электрон с немалой вероятностью может «быть сфотографирован» в любой данный момент в любой точке внутри своей орбиты и даже вне ее, в то время как положение планеты на ее орбите, согласно законам классической механики, вычисляется однозначно и с огромной точностью. Ес-

ли планету сравнить с идущим по рельсам трамваем, то электрон будет похож на такси.

Уместно отметить здесь и ряд чисто количественных различий, разрушающих подобие между атомными электронами и планетами. Так, например, отношение радиуса электронной орбиты атома к радиусу электрона гораздо больше, чем отношение радиуса земной орбиты к собственному радиусу Земли. Электрон в атоме водорода движется со скоростью порядка одной сотой скорости света *) и за одну секунду успевает совершить около 10^{16} оборотов. Это примерно в миллион раз больше, чем число оборотов, которое успела совершить Земля вокруг Солнца за все время своего существования. Электроны на внутренних оболочках тяжелых атомов движутся еще быстрее: их скорости достигают двух третей скорости света.

Скорость света в пустоте обозначается обычно буквой c . Эта фундаментальная физическая константа измерена с очень высокой точностью:

$$c = 2,997\,924\,58(1,2) \cdot 10^8 \text{ м/с } (**).$$

Приближенно: $c \approx 300\,000 \text{ км/с}$.

Заговорив о скорости света, естественно сказать и о частицах света — фотонах. Фотон не является такой же составной частью атомов, как электроны и нуклоны. Поэтому обычно о фотонах говорят не как о частицах вещества, а как о частицах излучения. Но роль фотонов в механизме Вселенной не менее значительна, чем роль электронов и нуклонов.

В зависимости от того, какова энергия фотона, он выступает в различных видах: радиоволн, инфракрасного излучения, видимого света, ультрафиолетового излучения, рентгеновского излучения, и, наконец, γ -квантов высокой энергии. Чем выше энергия квантов, тем более проникающими, или, как говорят, «жесткими» они являются, проходя даже через довольно толстые

*) Более точно отношение скорости электрона в атоме водорода к скорости света составляет примерно $1/137$. Запомните это число. С ним Вы еще не раз встретитесь на страницах этой книги.

**) Здесь и далее всюду в аналогичных случаях число в скобках указывает экспериментальную неточность в последних значащих цифрах основного числа. В 1983 г. Генеральная конференция мер и весов приняла новое определение метра: это расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ с. Таким образом, скорость света *определена* как $299\,792\,458 \text{ м/с}$.

металлические экраны. В физике элементарных частиц фотоны обозначаются буквой γ независимо от их энергии.

Основным отличием световых фотонов от всех других частиц является то, что они очень легко рождаются и легко уничтожаются. Достаточно чиркнуть спичкой, чтобы родить миллиарды фотонов, поставить на пути видимого света листок черной бумаги — и фотоны поглощаются в нем. Эффективность, с которой тот или иной экран поглощает, трансформирует и переизлучает падающие на него фотоны, конечно, зависит от конкретных свойств экрана и от энергии фотонов. Защититься от рентгеновских лучей и жестких γ -квантов не так просто, как от видимого света. При очень высоких энергиях различие между фотонами и другими частицами, пожалуй, не больше, чем различие этих частиц между собой. Во всяком случае, и родить и поглотить фотоны высоких энергий совсем не просто. Но чем меньшей энергией обладает фотон, чем он «мягче», тем легче его родить и уничтожить.

Одной из замечательных особенностей фотонов, определяющей в значительной степени их удивительные свойства, является то, что их масса равна нулю. Для массивной частицы известно: чем меньше ее энергия, тем медленнее она движется. Массивная частица может вообще не двигаться, находиться в покое. Фотон же, как бы ни была мала его энергия, все равно движется со скоростью c .

МАССА, ЭНЕРГИЯ, ИМПУЛЬС, УГЛОВОЙ МОМЕНТ В МЕХАНИКЕ НЬЮТОНА

Мы уже несколько раз использовали термины «энергия» и «масса». Пришла пора более подробно разъяснить их смысл. Заодно мы поговорим о том, что такое импульс и момент импульса. Все эти физические величины — масса, энергия, импульс и момент импульса (иначе называемый угловым моментом) — играют фундаментальную роль в физике. Фундаментальная роль этих физических величин обусловлена тем, что для изолированной системы частиц, сколь бы сложными ни были их взаимодействия друг с другом, суммарная энергия и импульс системы, ее полный угловой момент и ее масса являются сохраняющимися величинами, т. е. не изменяются со временем.

Начнем наше обсуждение с механики Ньютона, хорошо знакомой Вам по школьным учебникам. Рассмотрим тело массы m , движущееся со скоростью \mathbf{v} *). Согласно механике Ньютона такое тело имеет импульс

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

и кинетическую энергию

$$T = \frac{m\mathbf{v}^2}{2} = \frac{\mathbf{p}^2}{2m}.$$

Здесь $\mathbf{v}^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$, где v_x, v_y, v_z — проекции вектора \mathbf{v} соответственно на оси координат x, y, z (рис. 1).

Систему координат мы можем ориентировать в пространстве произвольным образом; величина \mathbf{v}^2 при этом не изменится.

В то же время и направления, и значения векторов \mathbf{v} и \mathbf{p} зависят от значения и направления скорости движения системы координат, в которой Вы описываете движение тела, или, как говорят, от системы отсчета.

Например, в системе отсчета, связанной с Землей, Ваш дом покоится. В системе отсчета, связанной с Солнцем, он движется со скоростью 30 км/с.

При описании вращательного движения тел важную роль играет величина, которая называется моментом импульса или угловым моментом. Рассмотрим в качестве примера простейший случай движения

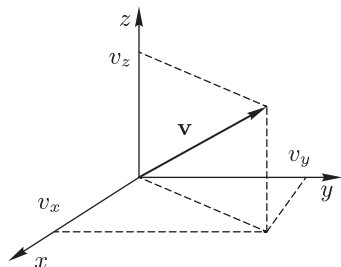


Рис. 1. Проекции вектора скорости \mathbf{v} на оси координат

частицы — материальной точки — по круговой орбите радиуса $r = |\mathbf{r}|$ с постоянной скоростью $v = |\mathbf{v}|$, где r и v — абсолютные величины векторов \mathbf{r} и \mathbf{v} соответственно. В этом случае угловой момент орбитального движения \mathbf{L} по определению равен векторному произведению радиус-вектора \mathbf{r} и импульса частицы \mathbf{p} : $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$. И хотя с течением времени направления как вектора \mathbf{r} , так и вектора \mathbf{p} меняются, вектор \mathbf{L} остается при этом неизменным. В этом легко убедиться, если посмотреть на рис. 2.

По определению векторное произведение $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ двух векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} равно вектору \mathbf{c} , абсолютная величина которого $|\mathbf{c}| = |\mathbf{a}||\mathbf{b}| \sin \theta$, где

*) Жирными буквами здесь и в дальнейшем мы будем обозначать векторы, т. е. такие величины, которые характеризуются не только числовым значением, но и направлением в пространстве.

θ — угол между векторами **a** и **b**; вектор **c** при этом направлен перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы **a** и **b**, причем так, что **a**, **b** и **c** образуют так называемую правую тройку (в соответствии с известным правилом буравчика (рис. 3)).

В компонентах векторное произведение записывается в виде

$$c_x = a_y b_z - a_z b_y,$$

$$c_y = a_z b_x - a_x b_z,$$

$$c_z = a_x b_y - a_y b_x.$$

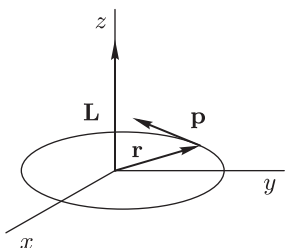


Рис. 2. Орбитальный момент **L** при движении частицы с импульсом **p** по круговой орбите радиуса **r**

Раз уж мы заговорили о векторном произведении, упомянем здесь и скалярное произведение двух векторов **a** и **b**, которое обозначают **ab** или **a · b**. По определению

$$\mathbf{ab} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z.$$

Легко проверить (см рис. 3), что $\mathbf{ab} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \cos \theta$ и что скалярное произведение не меняется при произвольных поворотах взаимно ортогональных (так называемых декартовых) осей x, y, z .

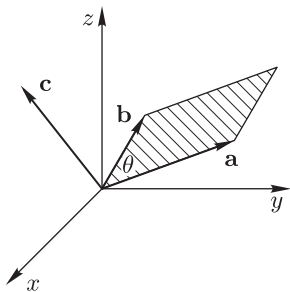


Рис. 3. Вектор **c** — векторное произведение векторов **a** и **b**

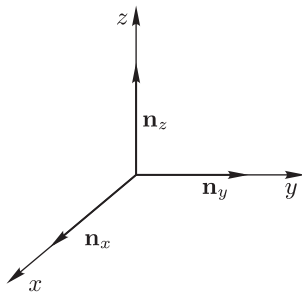


Рис. 4. Три орта

Заметим, что три единичных взаимно ортогональных вектора называют ортами и обозначают обычно $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z$ (рис. 4). Из определения скалярного произведения видно, что $a_x = \mathbf{an}_x$.

Для случая, изображенного на рис. 2, как нетрудно проверить,

$$L_x = L_y = 0, \quad L_z = |\mathbf{r}| |\mathbf{p}| = \text{const}.$$

Планеты Солнечной системы движутся не по круговым, а по эллиптическим орбитам, так что расстояние от планеты до Солн-

ца периодически меняется со временем. Периодически меняется со временем и абсолютная величина скорости. Но орбитальный момент планеты остается неизменным. (В качестве упражнения получите отсюда второй закон Кеплера, согласно которому радиус-вектор планеты «заметает» равные площади за равные промежутки времени).

Наряду с орбитальным угловым моментом, характеризующим движение вокруг Солнца, Земля, как и другие планеты, обладает и собственным угловым моментом, характеризующим ее суточное вращение. Сохранение собственного углового момента лежит в основе использования гироскопа. Собственный угловой момент элементарных частиц носит название спин (от английского *spin* — вращаться).

МАССА, ЭНЕРГИЯ И ИМПУЛЬС В МЕХАНИКЕ ЭЙНШТЕЙНА

Механика Ньютона прекрасно описывает движение тел, когда их скорости гораздо меньше скорости света: $v \ll c$. Но эта теория грубо неправильна, когда скорость движения тела v порядка скорости света c и тем более когда $v = c$. Если Вы хотите уметь описывать движения тел с любыми скоростями, вплоть до скорости света, Вам следует обратиться к специальной теории относительности, к механике Эйнштейна, или, как ее еще называют, релятивистской механике. Нерелятивистская механика Ньютона является лишь частным (хотя практически очень важным) предельным случаем релятивистской механики Эйнштейна.

Термины «относительность» и (что то же самое) «релятивизм» восходят к принципу относительности Галилея. В одной из своих книг Галилей очень красочно объясняет, что никакими механическими опытами внутри корабля нельзя установить, покоится он или равномерно движется относительно берега. Разумеется, это нетрудно сделать, если взглянуть на берег. Но, находясь в каюте и не глядя в иллюминатор, обнаружить равномерное и прямолинейное движение корабля невозможно.

Математически принцип относительности Галилея выражается в том, что уравнения движения тел — уравнения механики одинаково выглядят в так называемых инерциальных системах координат, т. е. в системах координат, связанных с телами, которые движутся равномерно и прямолинейно относительно очень

далеких от нас звезд. (В случае корабля Галилея, разумеется, не принимаются во внимание ни суточное вращение Земли, ни ее вращение вокруг Солнца, ни вращение Солнца вокруг центра нашей Галактики.)

Важнейшей заслугой Эйнштейна явилось то, что он распространил принцип относительности Галилея на все физические явления, в том числе и на электрические и оптические, в которых участвуют фотоны. Это потребовало существенных изменений во взглядах на такие фундаментальные понятия, как пространство, время, масса, импульс, энергия. В частности, наряду с понятием кинетической энергии T было введено понятие полной энергии E :

$$E = E_0 + T,$$

где E_0 — энергия покоя, связанная с массой m тела знаменитой формулой

$$E_0 = mc^2.$$

Для фотона, масса которого равна нулю, равна нулю и энергия покоя E_0 . Фотону «покой лишь только снится»: он всегда движется со скоростью c . У других частиц, таких, как электроны и нуклоны, у которых масса отлична от нуля, отлична от нуля и энергия покоя.

Для свободных частиц с $m \neq 0$ соотношения между энергией и скоростью и импульсом и скоростью в механике Эйнштейна имеют вид

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \mathbf{p} = \frac{E\mathbf{v}}{c^2}.$$

Так что выполняется соотношение

$$m^2c^4 = E^2 - \mathbf{p}^2c^2.$$

Каждый из двух членов в правой части этого равенства тем больше, чем быстрее движется тело, но их разность остается неизменной, или, как говорят обычно физики, инвариантной. Масса тела является релятивистским инвариантом, она не зависит от системы координат, в которой рассматривается движение тела.

Легко проверить, что эйнштейновские, релятивистские выражения для импульса и энергии переходят в соответствующие ньютоновские, нерелятивистские выражения, когда $v/c \ll 1$. Действительно, в этом случае, разлагая правую часть соотноше-

ния $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ в ряд по малому параметру v^2/c^2 , нетрудно получить выражение

$$E = mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \left(\frac{v^2}{c^2} \right)^2 + \dots \right).$$

Здесь точки означают члены более высокого порядка по параметру v^2/c^2 .

При $x \ll 1$ функцию $f(x)$ можно разложить в ряд по малому параметру x . Дифференцируя левую и правую части соотношения

$$f(x) = f(0) + xf'(0) + \frac{x^2}{2!} f''(0) + \frac{x^3}{3!} f'''(0) + \dots$$

и рассматривая каждый раз результат при $x = 0$, нетрудно убедиться в его справедливости (при $x \ll 1$ отброшенные члены малы). В интересующем нас случае

$$f(x) = (1 - x)^{-1/2}, \quad f(0) = 1,$$

$$f'(x) = \frac{1}{2} (1 - x)^{-3/2}, \quad f'(0) = \frac{1}{2},$$

$$f''(x) = \frac{3}{4} (1 - x)^{-5/2}, \quad f''(0) = \frac{3}{4}.$$

Заметим, что для Земли, движущейся по орбите со скоростью 30 км/с, параметр v^2/c^2 составляет 10^{-8} . Для самолета, летящего со скоростью 1000 км/ч, этот параметр еще меньше, $v^2/c^2 \approx 10^{-12}$. Так что для самолета, с точностью порядка 10^{-12} , выполняются нерелятивистские соотношения

$$T = mv^2/2, \quad \mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

и релятивистскими поправками можно спокойно пренебречь. Вернемся к формуле, связывающей квадрат массы с квадратом энергии и импульса, и запишем ее в виде

$$m^2 c^2 = \left(\frac{E}{c} \right)^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2.$$

То обстоятельство, что левая часть этого равенства не меняется при переходе от одной инерциальной системы к другой, аналогично тому, что квадрат импульса

$$\mathbf{p}^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2,$$

как и квадрат любого трехмерного вектора, не меняется при вращении системы координат (см. выше рис. 1) в обычном евклидовом пространстве. Опираясь на эту аналогию, говорят, что величина $m^2 c^2$ представляет собой квадрат четырехмерного вектора — четырехмерного импульса p_μ (индекс μ принимает четыре значения: $\mu = 0, 1, 2, 3$):

$$p_0 = E/c, \quad p_1 = p_x, \quad p_2 = p_y, \quad p_3 = p_z.$$

О пространстве, в котором определен вектор $p_\mu = (p_0, \mathbf{p})$, говорят, что оно псевдоевклидово. Приставка «псевдо» означает в данном случае, что инвариантом является не сумма квадратов всех четырех компонент, а выражение

$$p_0^2 - p_1^2 - p_2^2 - p_3^2.$$

Преобразования, связывающие между собой временные и пространственные координаты двух различных инерциальных систем, называются преобразованиями Лоренца. Мы не будем их здесь приводить, отметим лишь, что если между двумя событиями была дистанция во времени t и в пространстве \mathbf{r} , то только величина s , называемая интервалом:

$$s = (ct)^2 - \mathbf{r}^2,$$

не изменяется при преобразованиях Лоренца, т.е. является лоренцевым инвариантом. Подчеркнем, что ни t , ни \mathbf{r} сами по себе инвариантами не являются. Если $s > 0$, то интервал называют времениподобным, если $s < 0$, то — пространственноподобным, если $s = 0$, то — светоподобным. Если $s < 0$, то два пространственно разделенных события могут быть одновременными в одной системе координат и неодновременными в другой.

Рассмотрим теперь систему n свободных, не взаимодействующих между собой частиц. Пусть E_i — энергия i -й частицы, \mathbf{p}_i — импульс, а m_i — ее масса. Суммарная энергия и импульс системы соответственно равны

$$E = \sum_{i=1}^n E_i, \quad \mathbf{p} = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i.$$

Из определения массы системы,

$$M^2 = \frac{E^2}{c^4} - \frac{\mathbf{p}^2}{c^2},$$

следует, что масса системы, вообще говоря, не равна сумме масс составляющих ее частиц.

В нашей нерелятивистской повседневной жизни мы привыкли к тому, что $M = \sum_{i=1}^n m_i$. Но для быстрых частиц это равенство, как правило, не выполняется. Так, суммарная масса двух электронов, летящих навстречу друг другу с равными по абсолютной величине импульсами, равна $2E/c^2$, где E — энергия каждого из них, и в экспериментах на электронных ускорителях на много порядков превышает величину $2m_e$, где m_e — масса электрона.

Уместно завершить этот раздел некоторыми замечаниями, относящимися к терминологии.

В некоторых книгах и научно-популярных статьях можно встретить термины «масса покоя» m_0 и «масса движения», или, что то же самое, «релятивистская масса» m , которая растет с ростом скорости тела. Под массой покоя m_0 подразумевается при этом та физическая величина, которую мы выше называли просто массой и обозначили m . Под релятивистской массой m подразумевается энергия тела, деленная на квадрат скорости света: $m = E/c^2$ (разумеется, эта величина растет с ростом скорости тела). Такая устаревшая и по существу неадекватная терминология была распространена в начале XX века, когда по каким-то чисто психологическим причинам казалось желательным сохранить ньютоновское соотношение между импульсом, массой и скоростью: $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$. В настоящее время, в начале XXI века, эта терминология является архаизмом, который только затемняет смысл релятивистской механики для тех, кто недостаточно овладел ее основами.

Следует подчеркнуть, что в релятивистской механике масса m не играет ни роли коэффициента между силой и ускорением (инертная масса), ни роли коэффициента, определяющего действие на тело гравитационного поля (гравитационная масса). Связь между силой \mathbf{F} и ускорением $d\mathbf{v}/dt$ можно найти из приведенного выше выражения для импульса:

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

если учесть, что $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$. Известная из школьных учебников формула $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ получается отсюда лишь в нерелятивистском пределе. Что касается гравитационного притяжения, то и здесь

масса ни при чем. Так, экспериментально установлено, что обладающий нулевой массой фотон отклоняется в гравитационном поле.

Другой пример неудачной терминологии — это часто встречающееся утверждение о том, что в физике высоких энергий и в ядерной физике осуществляются якобы переходы энергии в массу и массы в энергию. Как уже было сказано выше, энергия строго сохраняется. Энергия ни во что не переходит. Происходят лишь взаимные превращения различных частиц. Многочисленные примеры процессов, в которых происходят эти превращения, будут рассмотрены на последующих страницах книги. Суть дела можно понять на примере химической реакции соединения углерода и кислорода, проявление которой можно наблюдать, глядя на тлеющие угли костра:



Кинетическая энергия фотонов и молекул CO_2 возникает в этой реакции за счет того, что сумма масс атома C и молекулы O_2 несколько превышает массу молекулы CO_2 . Таким образом, если у исходных компонентов реакции вся энергия находится в форме энергии покоя, то у конечных продуктов она представляет собой сумму энергии покоя и кинетической энергии.

Итак, энергия сохраняется, меняются лишь ее носители, меняется форма, в которой она проявляется.

СИЛЫ И ПОЛЯ

Энергия и импульс свободно движущегося тела не меняются со временем. Но при взаимодействии двух или большего числа тел импульс (и, вообще говоря, и энергия) каждого из них претерпевает изменение. Для того чтобы произошло такое изменение, совершенно не обязательно, чтобы тела пришли в непосредственное соприкосновение, столкнулись. Они могут действовать друг на друга и на расстоянии.

Так, например, Земля и спутник взаимно притягивают друг друга, в результате чего их импульсы все время меняются. Изменения импульсов у них равны и противоположны, так что полный импульс системы не меняется. (Мы замечаем изменение импульса спутника и не замечаем изменения импульса Земли, потому что масса Земли очень велика по сравнению с массой

спутника, а изменение скорости тела при данном изменении импульса обратно пропорционально массе.)

Примерно так же действуют друг на друга протон и электрон в атоме водорода. Между Землей и спутником действует так называемое гравитационное (ньютоновское) притяжение, между протоном и электроном — электрическое (кулоновское). В обоих случаях сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния. Тела действуют друг на друга на расстоянии, создавая вокруг себя силовые поля. Другим хорошо известным примером силового поля является магнитное поле, например, магнитное поле Земли, действующее на стрелку компаса.

Находясь в силовом поле, частица наряду с энергией покоя E_0 и кинетической энергией T обладает еще и потенциальной энергией U . Так что полная энергия в этом случае является суммой не двух, а трех слагаемых: $E = E_0 + T + U$. Потенциальная энергия равна со знаком минус работе, которую надо затратить, чтобы развести два покоящихся взаимодействующих тела на такие большие расстояния, где их воздействие друг на друга становится пренебрежимо малым. Из этого определения следует, что потенциальная энергия в случае притяжения отрицательна.

Здесь уместно сделать отступление и сказать о единицах энергии и массы. Единицей энергии в физике частиц служит электрон-вольт (эВ) и его производные

$$1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}, \quad 1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}, \quad 1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}, \quad 1 \text{ ТэВ} = 10^{12} \text{ эВ}.$$

Один электрон-вольт равен энергии, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов в один вольт. Если учесть, что $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В}$ и что один кулон равен суммарному заряду примерно 6×10^{18} электронов, то нетрудно получить

$$1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Отметим, что вольт, кулон и джоуль являются единицами международной системы единиц СИ (Système International d'Unités).

Электрон-вольт служит в физике элементарных частиц и единицей массы. Более точно было бы сказать, что единицей массы служит величина $1 \text{ эВ}/c^2$, где c — скорость света:

$$1 \text{ эВ}/c^2 \approx 1,8 \cdot 10^{-33} \text{ г}.$$

Но физики, имеющие дело с элементарными частицами, как правило, используют c в качестве единицы скорости и предпочитают ве-

личину c опускать, поскольку $c/c = 1$. Зачастую такую систему на физическом жаргоне называют системой $c = 1$. Так, масса электрона $m_e \approx 0,511$ МэВ, масса протона $m_p \approx 938,28$ МэВ, масса нейтрона $m_n \approx 939,57$ МэВ.

Вернемся теперь к движению тел в поле центральных сил, обратно пропорциональных квадрату расстояния до центра системы. Используя уравнение нерелятивистской механики, нетрудно убедиться, что при стационарном движении спутника по круговой орбите вокруг Земли или электрона вокруг атомного ядра потенциальная энергия по абсолютной величине в два раза больше кинетической: $U = -2T$. Действительно, ньютоновская потенциальная энергия

$$U = -\frac{G_N M m}{r},$$

здесь r — расстояние от спутника до центра Земли, m — масса спутника, M — масса Земли, а G_N — константа Ньютона (в единицах СИ $G_N = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$, но для наших рассуждений числовое значение G_N несущественно).

Сила гравитационного притяжения спутника Земли $F = G_N M m / r^2$, а его центростремительное ускорение равно v^2 / r .

Учитывая, что кинетическая энергия спутника $T = mv^2/2$, получаем

$$T = \frac{G_N M m}{2r}$$

и, следовательно,

$$T = \frac{1}{2} |U|.$$

Зависимость U от r и соотношение между U и T приведены на рис. 5. На рисунке изображена также величина ε , называемая энергией связи.

По определению энергия связи ε равна

$$\varepsilon = -(U + T).$$

Для ньютоновского потенциала $\varepsilon =$

$= -\frac{1}{2} U = T$. Мы видим, что масса системы «спутник + Земля» меньше, чем сумма масс спутника и Земли на ε/c^2 . Значение энергии связи тем больше, чем ближе к Земле спутник.

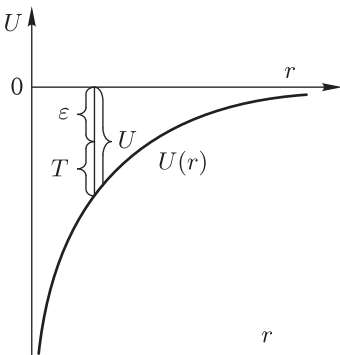


Рис. 5. Соотношение между кинетической энергией T и потенциальной энергией U спутника, ε — энергия связи

Аналогичным образом масса атома водорода меньше, чем сумма масс электрона и протона, и тоже зависит от того, на каком среднем расстоянии r от ядра движется электрон. Соответствующая разность масс носит название дефекта массы (умноженная на c^2 она равна энергии связи электрона).

КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В случае атома мы говорим о среднем расстоянии между электроном и ядром, а не о радиусе орбиты, потому что, как уже упоминалось выше, в силу законов квантовой механики, электрон в атоме, в отличие от спутника, не имеет определенной орбиты.

В отличие от энергии спутника, энергия электрона в атоме, а следовательно, и масса атома могут принимать лишь дискретный (не непрерывный) набор значений. Этого требует квантовая механика, законам которой подчиняется движение мельчайших частиц материи.

Важную роль в квантовой механике играет физическая величина S , называемая действием. Размерность действия равна произведению размерностей энергии и времени:

$$[S] = [E] [t];$$

здесь скобки $[]$ означают размерность заключенной в них величины. Поскольку

$$[E] = [m] [l^2] [t^{-2}],$$

где l — длина, а m — масса, то легко убедиться, что

$$[S] = [m] [l^2] [t^{-1}].$$

Подобно тому, как в теории относительности фундаментальной константой является скорость света c , так в квантовой механике фундаментальной константой является квант действия \hbar (его называют также постоянной Планка):

$$\hbar = 1,054\,588\,7\,(57) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Глядя на это число, нетрудно осознать, что для всех макроскопических процессов значение S колоссально по сравнению с \hbar . Именно поэтому макроскопические процессы так хорошо описываются классической механикой и квантовые эффекты в них пренебрежимо малы.

Однако для электронов в атомах действие S — порядка \hbar , и квантовые эффекты становятся определяющими. Одним из ярких проявлений квантовой механики является так называемое квантование углового момента. Нетрудно проверить, что угловой момент имеет ту же размерность, что и постоянная Планка. Так вот, согласно квантовой механике, угловой момент орбитального движения частиц может принимать лишь значения, кратные \hbar . В нашей обыденной жизни мы не можем заметить этой дискретности углового момента, потому что угловые моменты макроскопических тел выражаются в единицах \hbar поистине астрономическими числами, и точность макроскопических измерений недостаточна, чтобы можно было, скажем, у обычного детского волчка (юлы) обнаружить дискретность углового момента. Но для электронов в атомах величина \hbar является естественной единицей измерения углового момента. Наинизшее орбитальное состояние электрона имеет нулевой угловой орбитальный момент, $L = 0$, более высоким состояниям соответствуют $L = \hbar, 2\hbar$ и т. д.

Как ни парадоксально это звучит, но «квантованными величинами» являются не только сам угловой момент $l\hbar$, но и его проекции на оси координат, которые могут принимать лишь целые значения от $-l\hbar$ до $+l\hbar$.

Наряду с орбитальным угловым моментом элементарные частицы имеют и определенные значения собственного углового момента — спина. Значения спина кратны $\hbar/2$. Так, у электрона и нуклонов спин равен $1/2$ (в единицах \hbar), у фотона он равен 1. Частицы с полуцелыми (в единицах \hbar) значениями спина называются фермионами, а с целыми — бозонами (в честь итальянского физика Э. Ферми и индийского физика Ш. Бозе).

Фермионы — «индивидуалисты», бозоны — «коллективисты»: на данном энергетическом уровне может находиться не более одного фермиона с данной проекцией спина. Именно этим объясняется то, что электроны в атомах не сидят все на самом нижнем энергетическом уровне, а по мере роста заряда ядра заполняют все более далекие от ядра оболочки, формируя таким образом таблицу Менделеева. Бозоны, наоборот, все стремятся попасть в одно и то же состояние. Заметим попутно, что это свойство бозонов служит причиной сверхтекучести гелия (спин атома гелия равен нулю); это же свойство бозонов лежит в основе действия лазера.

Квантование углового момента является лишь одним из многочисленных проявлений квантовой природы микрочастиц.

Здесь следует подчеркнуть, что, внеся жесткую дискретность в одни классические величины (дискретные уровни энергии, квантование углового момента), квантовая механика, вместе с тем, потребовала отказа от классической детерминированности целого ряда других величин, которые приобрели в ней вероятностный характер. В частности, вероятностный характер приобрело понятие траектории частицы. Место траектории — величины однозначной в классической механике — заняла сумма по путям. Вероятностный, статистический характер имеют также и такие понятия, как время жизни возбужденного уровня атома и сечение — величина, имеющая размерность площади и характеризующая вероятность того или иного процесса, который может произойти в результате столкновения частиц. В квантовой механике частицы описываются так называемыми волновыми функциями.

Вообще, микрочастицы являются своеобразными «кентаврами», соединяющими в себе и свойства корпускул, т.е. частиц, и свойства волн. Проще всего наблюдать эту корпускулярно-волновую двойственность (или как говорят, корпускулярно-волновой дуализм) у фотонов. С одной стороны, при столкновении фотона с электроном фотон не в меньшей степени, чем электрон, ведет себя как частица, отскакивая в определенном направлении, с определенной энергией в соответствии с тем, каков импульс отдачи электрона. С другой стороны, фотон с импульсом \mathbf{p} ведет себя и как волна с длиной волны $\lambda = \hbar/|\mathbf{p}|$. Волновые свойства фотонов особенно ярко проявляются в таких явлениях, как дифракция и интерференция света.

То же самое соотношение между длиной волны и импульсом, $\lambda = \hbar/|\mathbf{p}|$, характеризует не только фотоны, но и все другие частицы: электроны, протоны, нейтроны, а также конгломераты частиц: атомы, молекулы, автомобили... Но чем тяжелее тело, тем больше его импульс, тем меньше его длина волны и, следовательно, тем труднее обнаружить его волновые свойства.

Ярким выражением корпускулярно-волновой природы частиц является соотношение неопределенности, связывающее между собой неопределенности в координате и импульсе частицы:

$$\Delta r \Delta p \geq \hbar.$$

Чем меньше область, в которой движется частица, тем больше неопределенность в ее импульсе. По существу, именно это обстоятельство и приводит к тому, что в каждом атоме существует наинизшее энергетическое состояние с ненулевой кинетической энергией: оно называется основным. Действительно, при заданных размерах атома импульс, а следовательно, и кинетическая энергия электрона не могут быть сколь угодно малыми.

Используя соотношение неопределенности, можно оценить порядок величины энергии связи ε электрона, находящегося на основном уровне атома водорода. Запишем выражение для потенциальной U и кинетической T энергии электрона:

$$U = -\frac{e^2}{r}, \quad T = \frac{p^2}{2m_e}.$$

Полагая в соответствии с соотношением неопределенности $p \approx \hbar/r$ и учитывая (см рис. 5), что $2T = |U|$, получим

$$\frac{\hbar^2}{r^2 m_e} \approx \frac{e^2}{r}, \quad \text{откуда} \quad r \approx \frac{\hbar^2}{e^2 m_e}$$

и для энергии связи ε имеем следующую оценку:

$$\varepsilon = T \approx \frac{e^4 m_e}{2\hbar^2}.$$

По счастливой случайности наши грубые оценки r и ε совпали с округленными величинами общепринятых значений радиуса атома водорода (так называемого боровского радиуса r_0) и энергии связи атома водорода ε_0 :

$$r_0 = \frac{\hbar^2}{e^2 m_e} = 0,529\,177\,210\,8(18) \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

$$\varepsilon_0 = \frac{e^4 m_e}{2\hbar^2} = 13,605\,692\,3(12) \text{ эВ}.$$

Если ввести безразмерную величину $\alpha = e^2/\hbar c$, то получим

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \alpha^2 m_e c^2, \quad r_0 = \frac{1}{\alpha} \frac{\hbar}{m_e c}.$$

(Отношение $\hbar/m_e c = 3,861\,592\,678(26) \cdot 10^{-13} \text{ м}$ принято называть комптоновской длиной волны электрона). Величина α получила в атомной физике название «постоянной тонкой структуры» и имеет значение

$$\alpha = 1/137,035\,999\,11(46).$$

Теперь нетрудно оценить и скорость электрона в атоме водорода. Она, как уже было сказано (см. с. 11), действительно составляет примерно $1/137$ скорости света.

При столкновениях атома с другими атомами или при облучении атома ультрафиолетовым излучением электрон либо может быть выбит из атома (это называется ионизацией атома), либо может перейти на какой-либо из более высокорасположенных уровней (это называется возбуждением атома).

Энергия связи n -го возбужденного уровня атома водорода ε_n выражается через энергию связи основного уровня ε_0 следующим образом:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 (n + 1)^{-2}, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \dots$$

Дискретные уровни характерны, разумеется, не только для электронов в атоме, но и для атомов в молекулах (здесь расстояния между уровнями существенно меньше, чем в атомах), и для нуклонов в атомных ядрах (здесь расстояния между уровнями гораздо больше, чем в атомах).

Итак, каждая молекула, каждый атом, каждое атомное ядро (за исключением самых простейших — протона и дейтрона) имеют, наряду с основным состоянием, набор дискретных возбужденных состояний. Из сказанного выше ясно, что массы молекул, атомов, ядер в возбужденных состояниях превышают их массы в основном состоянии.

АТОМНЫЕ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Вы уже знаете, что когда горит костер, атомы углерода и водорода, входящие в состав древесины, соединяются с атомами кислорода из воздуха, и образуются соответственно углекислый газ и вода. Сумма масс молекул, вступающих в реакцию горения, больше, чем сумма масс образовавшихся молекул. В силу сохранения энергии, кинетическая энергия продуктов горения должна быть больше, чем кинетическая энергия молекул, вступающих в реакцию. Этот избыток кинетической энергии мы воспринимаем как выделение тепла при горении. Неправильно было бы говорить, что при этом происходит превращение массы в энергию. Правильнее было бы сказать, что часть массы превращается в кинетическую энергию. И совсем правильно было бы сказать, что энергия переходит из одной формы (энергии покоя)

в другую форму (кинетическую энергию). Заметьте, что полная масса системы не меняется.

Когда в листьях растений под действием солнечных лучей углекислый газ и вода превращаются в органические соединения и кислород, то масса возрастает. Необходимая для этого энергия поставляется Солнцем — это кинетическая энергия солнечных фотонов.

В течение всей предшествующей истории человечества именно Солнце в конечном счете являлось поставщиком энергии, использовавшейся людьми. А что является источником энергии самого Солнца? Таких источников два: во-первых, гравитационное сжатие, во-вторых, препятствующие этому сжатию ядерные реакции, в которых суммарная масса возникших в реакции ядер меньше, чем суммарная масса ядер, вступивших в реакцию. Разность масс (разность энергий покоя) равна избыточной кинетической энергии образовавшихся при этом частиц. Солнце излучает эту энергию в пространство, в основном — в виде фотонов.

Когда атомы сталкиваются друг с другом с достаточно высокими скоростями, они возбуждаются; электроны в них переходят на возбужденные уровни и массы атомов возрастают. Атом не может долго находиться в возбужденном состоянии: через некоторое время он испускает фотон и переходит в основное состояние. Фотоны излучаются атомными электронами, переходящими с одной орбиты на другую. Очень важно осознать, что фотон, излучаемый атомом, не хранился в нем до этого, а рождается в момент излучения. Изменение движения электрических зарядов (электронов) вызывает возбуждение электромагнитного поля, квантами, «порциями» которого являются фотоны. Точно так же не хранятся фотоны и в раскаленной нити электрической лампочки. Они рождаются и излучаются «разогретыми» электронами.

Энергия E фотона связана с его частотой ω соотношением $E = \hbar\omega$. Если учесть, что длина волны света и его частота связаны соотношением $\lambda = \omega c$, то мы увидим, что квант света определенной длины волны имеет строго определенную энергию. Поле покоящегося электрического заряда — чисто статическое, это — так называемое кулоновское поле. Но поле движущегося заряда содержит возбуждения с ненулевой частотой. При изменении скорости заряда эти возбуждения как бы «страхиваются» и вылетают в виде свободных фотонов.

Возбужденные атомы излучают не только видимый свет. Если атом тяжелый и возбужден в нем внутренние, быстро движущиеся электроны, то при его высвечивании испускаются рентгеновские лучи.

Аналогично атомам излучают фотоны и возбужденные ядра. Только фотоны, испускаемые ядрами (ядерные γ -кванты), гораздо энергичнее атомных фотонов. (Если энергия связи электрона в атоме водорода составляет 13,6 эВ, то энергия связи нуклона в ядре в среднем равна примерно 8 МэВ.)

При достаточно большой энергии возбуждения ядра могут излучать и другие частицы, а не только фотоны. Разнообразие таких ядерных реакций очень велико. Но все их можно разбить на два больших класса. К одному классу принадлежат такие реакции, когда из ядра вылетают одиночные нуклоны или даже целые сгустки нуклонов — ядерные осколки. Это происходит, например, при α -распаде (напомним, что α -частица — это ядро атома гелия) или при делении урана. К другому классу принадлежат такие реакции, в которых избыточная энергия нестабильного ядра уносится частицами, которых до момента излучения в ядре не было. Простейший пример этого, второго, класса реакций — испускание фотонов. Сейчас мы познакомимся с другим явлением — испусканием ядрами пары частиц: электрона и нейтрино (более точно: электрона и антинейтрино). Это явление было открыто в конце XIX века и было названо β -распадом.

СЛАБОЕ И СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Природа частиц, испускаемых при β -распаде, была установлена далеко не сразу. Одна из этих частиц электрически заряжена, вторая — электрически нейтральна. До тех пор, пока не установили, что заряженная частица — это электрон, ее называли β -частицей. (Сам электрон был открыт незадолго до открытия β -распада.) Вообще, после открытия радиоактивности довольно быстро установили, что есть три типа радиоактивного распада: α , β , γ . Мы знаем теперь, что α -лучи — это ядра гелия, β -лучи — это электроны, а γ -лучи — ядерные γ -кванты.

В начале 30-х годов стало ясно, что при β -распаде испускается не только электрон, но и еще какая-то частица, не имеющая заряда. Ее назвали нейтрино (по-итальянски это означает «нейтрончик»).

Простейшим примером β -распада является распад свободного нейтрона (рис. 6), при котором нейтрон превращается в протон, испуская электрон и нейтрино (более точно — антинейтрино*), смысл приставки «анти» мы поясним через некоторое время):

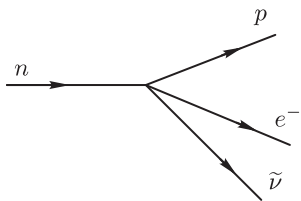


Рис. 6. β -распад нейтрона

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}.$$

Распад нейтрона возможен потому, что масса нейтрона превышает сумму масс протона, электрона и антинейтрино. Как и в случае испускания γ -кванта возбужденным ядром, частицы, возникающие при β -распаде нейтрона, не «сидели в нем» заранее, они рождаются в момент распада, «стряхиваются» с него. Но если при изменении состояния атомного электрона излучается одна частица — фотон, то при превращении нейтрона в протон излучается сразу пара частиц: электрон плюс антинейтрино.

С точки зрения энергетики процесс β -распада не отличается от других процессов, которые мы рассматривали выше. И тем не менее, в нем мы имеем дело с фундаментальными силами, с которыми мы до сих пор на страницах этой книги не встречались. Выше мы говорили о гравитационном взаимодействии. Говорили о различных проявлениях электромагнитного взаимодействия, в частности, о притяжении разноименно заряженных частиц и об испускании и поглощении фотонов. Неявно касались мы и так называемого сильного взаимодействия, притягивающего друг к другу нуклоны в ядре. Сильным это взаимодействие назвали потому, что ядерные силы гораздо интенсивнее электромагнитных, о чем свидетельствует большая энергия связи нуклонов в ядре.

В β -распаде мы сталкиваемся с проявлением четвертого типа фундаментальных сил — так называемого слабого взаимодействия. Слабым его назвали потому, что в повседневной жизни его проявления кажутся пренебрежимо слабыми, и потому, что в атомах и ядрах оно действует гораздо слабее, чем сильное и электромагнитное взаимодействия; а обусловленные им процессы имеют меньшие вероятности и, следовательно, протекают медленнее.

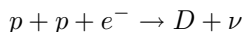
*) Нейтрино обозначают обычно греческой буквой ν (ню). Для обозначения антинейтрино над буквой ν ставят знак тильда: $\bar{\nu}$.

Как известно, в магнитном поле γ -лучи вообще не отклоняются, а α - и β -лучи отклоняются в противоположные стороны, как это изображено на рисунке на обложке этой книги. Мне вспоминается одно из долгих вечерних обсуждений судебных физики, которые много лет назад время от времени устраивал со своими учениками и сотрудниками руководитель теоретического отдела Института теоретической и экспериментальной физики академик И. Я. Померанчук. Во время этого обсуждения широко известный специалист по квантовой электродинамике В. Б. Берестецкий заметил, что упомянутый рисунок, вошедший во все школьные учебники, может служить символом трех фундаментальных взаимодействий: ведь α -распад — это проявление сильного взаимодействия, β -распад — слабого, а γ -распад — электромагнитного. В первые десятилетия прошлого века физика каждого из этих взаимодействий оформилась в отдельную науку. В настоящее время происходит синтез этих наук, об этом речь пойдет в конце книги. А пока продолжим разговор о β -распаде.

На первый взгляд может показаться, что мир вообще и человечество в частности вполне могли бы обойтись без слабого взаимодействия. Ведь β -распад — это довольно экзотическое явление. Но такое заключение о несущественности слабого взаимодействия было бы глубоко ошибочным. Достаточно сказать, что если бы удалось «выключить» слабое взаимодействие, то погасло бы наше Солнце.

Дело в том, что узловым процессом, открывающим путь к дальнейшим ядерным реакциям на Солнце, является процесс, в котором два протона и электрон превращаются в дейтрон D и нейтрино ν_e .

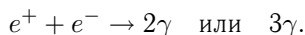
Заметим, что одноступенчатое превращение (рис. 7)



происходит лишь в 0,25 % всех случаев. В 99,75 % случаев реакция идет в две ступени. На первом этапе рождается позитрон e^+ в реакции (рис. 8)



На втором этапе происходит реакция аннигиляции в фотоны позитрона и одного из солнечных электронов



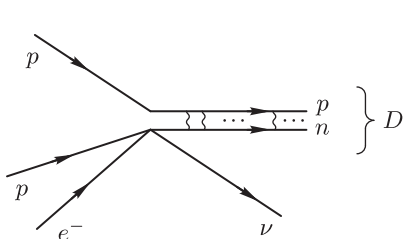


Рис. 7. Слабая реакция
 $p + p + e^- \rightarrow D + \nu$

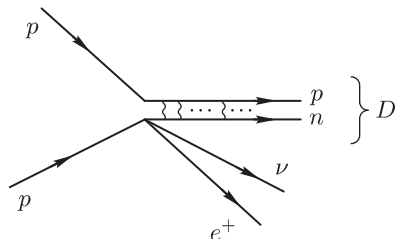
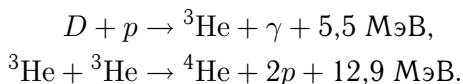


Рис. 8. Слабая реакция
 $p + p \rightarrow D + \nu + e^+$

Более подробно о позитронах и аннигиляции будет сказано ниже (см. раздел «Античастицы»).

Напомним, что дейтрон D — это ядро дейтерия, тяжелого изотопа водорода, представляющее собой связанное состояние протона и нейтрона. На рис. 7 и 8 волнистые линии условно изображают сильное ядерное взаимодействие, связывающее протон и нейтрон в дейтроне. Энергия связи дейтрона составляет примерно 2,2 МэВ. Если учесть, что масса нейтрона на 1,3 МэВ больше массы протона, масса позитрона составляет 0,5 МэВ, а масса нейтрино пренебрежимо мала, то нетрудно оценить энергосодержание в процессе, изображенном на рис. 8. Оно составляет всего 0,4 МэВ.

Описанный выше слабый процесс, который в некотором смысле можно считать процессом, обратным β -распаду нейтрона, является основным поставщиком солнечных нейтрино. Однако мы только что убедились, что кинетическая энергия, выделенная в этом процессе, сравнительно невелика. Основное выделение тепла происходит за счет дальнейшего превращения двух ядер дейтерия в ядро гелия, содержащее два протона и два нейтрона. В основном это превращение происходит за счет двух реакций:



В первой из них работает как сильное, так и электромагнитное взаимодействие (в ней испускается γ -квант), во второй — только сильное взаимодействие. Большее энергосодержание во второй реакции связано с тем, что нуклоны в α -частице плотно упакованы и обладают большей энергией связи.

Подобные реакции слияния ядер называются термоядерными, поскольку они идут только при высокой температуре. Высокая

температура необходима для того, чтобы ядра могли вплотную подойти друг к другу. Ведь, как известно, одноименные электрические заряды отталкиваются. Чтобы ядра могли преодолеть это электрическое отталкивание и сблизиться на расстояние порядка 10^{-13} см, им надо сообщить достаточно большую кинетическую энергию.

Основная надежда человечества и основная угроза самому его существованию связаны с термоядерными реакциями. Если бы удалось осуществить управляемые термоядерные реакции в промышленных условиях, то это дало бы доступ к огромным запасам энергии и навсегда (в современных масштабах) избавило бы человечество от угрозы энергетического кризиса. С другой стороны, если взорвутся те огромные запасы водородных бомб, которые накоплены и продолжают накапливаться в ядерных арсеналах все большего числа стран, то человечество будет уничтожено.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

До сих пор мы были только на подступах к основной теме этой книги. Предмет нашего изучения — физика частиц высоких энергий — не имеет никакого отношения ни к атомным электростанциям, ни к атомным бомбам. Цель физики высоких энергий — выяснение природы фундаментальных сил и структуры элементарных частиц. Такое подробное введение нам понадобилось потому, что «нельзя получить высшего образования, не имея до этого низшего». Кроме того, в процессах при высоких энергиях имеется много общего с процессами при низких энергиях. (Энергии термоядерных реакций, если сравнить их с тем, что сегодня называют высокими энергиями, столь же низки, сколь низка энергия видимого света по сравнению с энергией ядерных γ -квантов.) В частности, все реакции при высоких энергиях, сколько бы частиц в них ни рождалось, подчиняются закону сохранения энергии. Поэтому, чтобы родить новую тяжелую частицу, необходимо осуществить столкновение достаточно энергичных исходных частиц. Именно поэтому на предыдущих страницах мы затратили так много времени на рассмотрение процессов, при которых более легкие частицы превращаются в более тяжелые и наоборот. В этом отношении в процессах, происходящих при высоких энергиях, ничего принципиально нового нет. Но в целом ряде других отношений физика высоких энергий

поразительна: она открыла нам целый мир фундаментальных, глубоких и вместе с тем удивительных явлений и закономерностей.

Первый этап развития физики высоких энергий, начало 30-х — конец 40-х годов прошлого века, был связан с изучением космических лучей. Первичные космические лучи — это поток быстрых протонов, падающих на Землю из космического пространства. Сталкиваясь с ядрами атомов атмосферы, первичные протоны рождают многочисленные вторичные частицы. При изучении этих вторичных частиц удалось обнаружить, что среди них, наряду с обычными частицами — фотонами, электронами, нуклонами, рождаются и другие, совершенно новые частицы. Для выяснения природы этих частиц с конца 40-х годов начали строить все более мощные ускорители заряженных частиц.

УСКОРИТЕЛИ

В зависимости от типа ускоряемых частиц, различают электронные и протонные ускорители, а также ускорители тяжелых ионов. Кроме того, ускорители бывают кольцевые и линейные. Кольцевых ускорителей в настоящее время намного больше, чем линейных.

Один из самых больших кольцевых протонных ускорителей находится в Европейской организации ядерных исследований, вблизи Женевы, другой — в Фермиевской национальной лаборатории в Батавии, вблизи Чикаго. Максимальная энергия протонов в этих ускорителях составляет 400 и 1000 ГэВ соответственно. Ускорители эти расположены в кольцевых тоннелях длиной около семи километров. До пуска в начале 70-х годов большого ускорителя вблизи Женевы рекордной энергией (76 ГэВ) обладал протонный ускоритель в Институте физики высоких энергий в Протвино, вблизи Серпухова, работающий с 1968 г. Длина кольцевого тоннеля этого ускорителя — около полутора километров.

В тоннеле кольцевого ускорителя, вдоль всего кольца, стоят электромагниты, которые, отклоняя частицы, заставляют их двигаться по кольцу внутри трубы, из которой откачан воздух. Эта кольцевая труба называется вакуумной камерой. Чем сильнее магнитное поле в магнитах, тем более энергичные частицы могут быть удержаны внутри камеры.

Итак, магниты удерживают частицы на «цирковом треке». Роль ускоряющего бича при этом играет электрическое поле. Несколько ускоряющих промежутков с электрическим полем, ускоряющим частицы, расположено вдоль кольца. В кольцевом ускорителе частица много раз пролетит по кольцу, прежде чем наберет нужную энергию, поэтому электрическое поле здесь может быть не очень сильным. В линейном ускорителе, напротив, ускоряющие электрические потенциалы должны быть предельно высокими, потому что частица должна набрать всю свою энергию за один пролет.

Рекордные значения переменных электрических полей были достигнуты в свое время в Институте ядерной физики в новосибирском Академгородке: они приближались к мегаэлектрон-вольту на сантиметр. Эти поля создавались для будущего линейного электронного ускорителя, в котором темп ускорения составит примерно 100 МэВ/м. Активно обсуждаются также и возможности использования лазеров для создания еще больших темпов ускорения. Но это уже — техника XXI века.

Самый большой из действующих линейных ускорителей расположен в Стенфорде, вблизи Сан-Франциско. Его длина несколько превышает 3 км. В нем ускоряются электроны до энергии 20 ГэВ. Примерно такова же предельная энергия и двух самых больших кольцевых электронных ускорителей, один из которых расположен в том же Стенфорде, а другой — вблизи Гамбурга. Длина колец этих ускорителей превышает 2 км.

Внимательный читатель, по-видимому, заметил, что эффективность на единицу длины у протонных кольцевых ускорителей больше, чем у электронных. Это связано с тем, что электроны, будучи более легкими, при движении по изогнутой траектории более интенсивно излучают так называемое синхротронное излучение. Чтобы уменьшить потери энергии на синхротронное излучение, приходится уменьшать центростремительное ускорение и, следовательно, увеличивать радиусы электронных ускорителей.

После того как частицы разогнались до нужной энергии, пучок частиц выпускают из ускорителя и направляют на мишень, в которой, сталкиваясь с ядрами вещества мишени, частицы пучка рожают новые частицы. Некоторые из этих новых частиц обладают большими временами жизни и вылетают из мишени, другие живут так мало, что распадаются прямо в мишени (многие из них не успевают даже вылететь за пределы того атома,

на ядре которого они рождены). В последнем случае из мишени вылетают частицы — продукты распада. С помощью специальных магнитов частицы, вылетающие из мишени, формируются во вторичные пучки, которые направляются в экспериментальные залы, где расположены установки, детектирующие эти частицы и их взаимодействия.

В последние годы все большее значение приобретают такие кольцевые ускорители, в которых ускоренные частицы сталкиваются не с неподвижной мишенью, а с пучком частиц, ускоренных в противоположном направлении. Преимуществом сталкивающихся пучков является то, что они дают большой выигрыш полезной энергии, которую можно использовать для рождения новых частиц.

Рассмотрим два встречных пучка частиц массы m , имеющих энергию E и противоположно направленные импульсы: $+\mathbf{p}$ и $-\mathbf{p}$. Полная энергия таких сталкивающихся частиц равна $2E$, а их суммарный импульс равен нулю. Система координат, в которой суммарный импульс двух частиц равен нулю, называется системой центра масс. В данном случае система центра масс совпадает с лабораторной системой координат. Энергии $2E$ отвечает масса M , равная $2E/c^2$. Вся эта энергия $2E$, вообще говоря, может идти на создание новых частиц.

Рассмотрим теперь столкновение пучка тех же частиц с неподвижной водородной мишенью (мишенью, содержащей атомы водорода). Пусть энергии каждой из частиц пучка по-прежнему равна E , масса частицы m , а импульс равен \mathbf{p} , так что $\mathbf{p}^2 c^2 = E^2 - m^2 c^4$. Обозначим массу протона (в водородной мишени) через μ . Тогда, по определению, масса системы «частица + протон» или, что то же самое, полная энергия в системе центра масс частицы и протона определяется соотношением

$$M^2 c^4 = (E + \mu c^2)^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = 2E\mu c^2 + \mu^2 c^4 + m^2 c^4.$$

Теперь уже система центра масс движется относительно лабораторной системы координат. Если E во много раз больше μc^2 и $m^2 c^4$, то получается, что энергия в системе центра масс сталкивающихся частиц в первом случае в $\sqrt{2E/\mu c^2}$ раз больше, чем во втором. А по существу, только энергия в системе центра масс и является эффективной энергией столкновения и определяет характер этого столкновения.

Ясно и без всяких формул, что лобовое столкновение двух встречных автомобилей гораздо энергичнее, чем столкновение одного из них со стоящей машиной. Однако в случае релятивистских частиц выигрыш в энергии гораздо больший.

Первые ускорители со встречными пучками, их называли коллайдерами, появились еще в 50-е годы, но наиболее интересные результаты получены на них в течение последних десятилетий. В дальнейшем мы еще познакомимся с некоторыми экспериментами, проведенными на коллайдерах, а пока попытаемся кратко сформулировать то основное, что вообще принесли эксперименты при высоких энергиях. Наиболее яркие достижения физики высоких энергий — это античастицы, адроны и кварки, поколения лептонов и кварков, нарушенные симметрии, фундаментальные векторные бозоны. Разъясним по порядку, что кроется за этими терминами.

АНТИЧАСТИЦЫ

Первая античастица — позитрон — была теоретически предсказана и экспериментально открыта в начале 30-х годов. Позитрон является античастицей по отношению к электрону. Он имеет точно такую же массу и абсолютную величину заряда, что и электрон, но знак заряда позитрона противоположен знаку заряда электрона: заряд позитрона положителен. Поэтому электрон и позитрон обозначают соответственно e^- и e^+ .

В пустоте позитрон так же стабилен, как и электрон. Однако встреча электрона с позитроном кончается плохо для них обоих: они «исчезают» — аннигилируют, излучая при этом фотоны (γ -кванты). При аннигиляции электрона и позитрона испускается, как правило, два или три γ -кванта:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma, \quad e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma.$$

Ничего мистического в «исчезновении» электрона и позитрона нет. Просто, в отличие от реакций, рассмотренных выше, в реакции аннигиляции энергия покоя электрона и позитрона полностью переходит в энергию движения γ -квантов.

В лабораторных условиях, на ускорителях, наблюдается также реакция, обратная реакции аннигиляции электрона и позитрона. При столкновении двух γ -квантов рождается пара «электрон + позитрон»:

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-.$$

Вслед за позитроном были открыты и другие античастицы. В частности, в середине 50-х годов на ускорителях были созданы антипротон и антинейтрон, а затем — даже легкие антиядра. Как правило, античастицы обозначаются той же буквой, что и соответствующие частицы, но над буквой ставится тильда. Например, \bar{p} — антипротон, \bar{n} — антинейтрон, $\bar{\nu}$ — антинейтрино.

Масса каждой античастицы строго равна массе соответствующей частицы, а знаки их зарядов противоположны. Мысленная операция замены «частица \rightarrow античастица» называется зарядовым сопряжением. При этой операции фотон, который не несет ни электрического, ни какого-либо другого заряда, переходит сам в себя. Фотон принадлежит к сравнительно редкому типу истинно нейтральных частиц, не имеющих зарядовых двойников.

Естественно задать вопрос: «Если в фотоны аннигилируют электрон и позитрон, то почему не аннигилируют электрон и протон, почему стабилен атом водорода, почему не идет реакция $e^- + p \rightarrow 2\gamma$?» Легко понять, что если бы такая реакция была возможна, то в мире в конце концов остались бы лишь фотоны и нейтрино (нейтрино — как продукты распада нейтронов). Не правда ли, довольно унылая перспектива?

Стабильность водорода наводит на мысль, что наряду с электрическим зарядом существуют и другие сохраняющиеся заряды, или, как говорят, другие сохраняющиеся квантовые числа. Для объяснения стабильности водорода и более тяжелых атомов, а также для объяснения отсутствия ряда других процессов были сформулированы гипотезы о существовании и сохранении так называемых барионного и лептонного зарядов (квантовых чисел).

Начнем с барионного заряда. Существует большое семейство частиц, называемых барионами (от греческого «бариос» — тяжелый). Согласно гипотезе, каждый барион обладает единичным положительным барионным зарядом. Протон самый легкий из барионов. Кроме протона и нейтрона известно много десятков других, более тяжелых барионов. У каждого из барионов имеется античастица — соответствующий антибарион, обладающий единичным отрицательным барионным зарядом. Из сказанного выше в частности следует, что хотя нейтрон электрически нейтрален, он не является истинно нейтральной частицей.

Семейство частиц, называемых лептонами (от греческого «лепτος» — мелкий; более подробно о них будет рассказано на последующих страницах книги), состоит из гораздо меньшего числа частиц, чем семейство барионов. Электрон — самый

легкий из заряженных лептонов — обладает положительным единичным лептонным зарядом. Тем же лептонным зарядом, что и электрон, обладает, согласно гипотезе о лептонном заряде, и нейтрино. Позитрон и антинейтрино имеют отрицательный единичный лептонный заряд. Легко проверить, что в распаде нейтрона

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

сохраняются как барионный, так и лептонный заряды.

К вопросу о том, насколько строгими законами являются законы сохранения барионного и лептонного зарядов, мы еще вернемся в конце этой книги. А сейчас обратимся к вопросу о том, существуют ли античастицы в окружающем нас мире.

Из-за реакций аннигиляции сколько-нибудь тесное сосуществование частиц и античастиц невозможно. Поэтому, попав в соприкосновение с «враждебной средой», те немногие античастицы, которые удастся произвести в лабораторных условиях, рано или поздно гибнут. Но в областях Вселенной, далеких от нашего обычного вещества, вполне могли бы существовать антимир, построенные из антиатомов. Энергетические уровни антиатомов и атомов одинаковы, их химические свойства неотличимы. (Очень небольшие отличия между веществом и антивеществом проявляются лишь в слабых взаимодействиях.) Поэтому в принципе могли бы существовать и «антижизнь», и «антилюди», и «антимир». Фотоны, приходящие к нам от антизвезд, не должны ничем отличаться от фотонов обычных звезд. Так что оптические радионаблюдения не могли бы уловить разницу между звездой и антизвездой. Это можно было бы в принципе сделать при дальнейшем развитии нейтринной астрономии. Ведь обычные звезды, как и наше Солнце, испускают нейтрино, рождающиеся в термоядерных реакциях, а антизвезды должны испускать антинейтрино.

В настоящее время астрофизики скептически относятся к возможности существования антимиров. Они исходят при этом из того, что в первичных космических лучах, приходящих к нам из отдаленных областей Вселенной, не найдено заметной примеси антипротонов. Другим аргументом является то, что не наблюдаются те характерные γ -кванты с энергией, равной энергии покоя электрона, которые должны были бы возникать при аннигиляции медленных электронов и позитронов на границе раздела между веществом и антивеществом ($e^+e^- \rightarrow 2\gamma$).

Вопрос о том, почему наш мир состоит из вещества, а не из антивещества или не из равных количеств того и другого, в последние годы привлекает все большее внимание физиков-теоретиков. А тем временем физики-экспериментаторы уже широко используют пучки позитронов и антипротонов в своих экспериментах. В частности, в подавляющем большинстве существующих в настоящее время коллайдеров сталкиваются пучки частиц и соответствующих античастиц — протонов и антипротонов, электронов и позитронов.

АДРОНЫ И КВАРКИ

Целый пласт новых явлений и понятий был вскрыт при исследовании сильных взаимодействий. Еще в 40-х годах стало ясно, что нуклоны отнюдь не являются единственными частицами, обладающими сильными взаимодействиями; они принадлежат к обширному классу частиц, впоследствии (в начале 60-х годов) названных адронами. По-гречески «хадрос» — массивный, сильный. Кстати, от этого же греческого слова очень давно было образовано русское слово «ядро». С пуском мощных ускорителей новые адроны посыпались, как из рога изобилия, и в настоящее время известно свыше трехсот различных адронов.

В середине 60-х годов была выдвинута гипотеза, что все адроны построены из более фундаментальных частиц, названных кварками. Последующие исследования подтвердили правильность этой гипотезы.

Все кварки имеют спин, равный $1/2$. В настоящее время установлено существование пяти разновидностей кварков: u , d , s , c , b . (Здесь кварки перечислены в порядке возрастания их масс: $m_u \approx 5$ МэВ, $m_d \approx 7$ МэВ, $m_s \approx 150$ МэВ, $m_c \approx 1,3$ ГэВ, $m_b \approx 5$ ГэВ.) Ожидают, что должен существовать и шестой, еще более тяжелый кварк, t^*). Безуспешные поиски адронов, содержащих t -кварки, указывают на то, что $m_t > 20$ ГэВ.

Кварки u , c и t имеют электрический заряд, равный $+2/3$, а кварки d , s и b — заряд, равный $-1/3$. Кварки с зарядом $+2/3$ принято называть верхними, а с зарядом $-1/3$ — нижними. Обозначения кварков происходят от английских слов *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom*, *top*.

*) Об открытии t -кварка см. в разделе «20 лет спустя».

Кварковая модель была предложена в то время, когда были известны лишь так называемые легкие адроны, т.е. адроны, состоящие только из легких кварков, u , d и s . Эта модель сразу привела в порядок всю систематику этих адронов. На ее основе не только была понята структура уже известных к тому времени частиц, но и предсказан ряд неизвестных в то время адронов.

Все адроны можно разбить на два больших класса. Одни, называемые барионами, состоят из трех кварков. Барионы — фермионы, у них — полуцелый спин. Другие — называемые мезонами, состоят из кварка и антикварка. Мезоны — бозоны, у них — целый спин. (О бозонах, фермионах и барионах уже говорилось выше.)

Нуклоны являются самыми легкими барионами. Протон состоит из двух u -кварков и одного d -кварка ($p = uud$), нейтрон из двух d -кварков и одного u -кварка ($n = ddu$). Нейтрон тяжелее протона, поскольку d -кварк тяжелее u -кварка. Но вообще-то, как легко видеть, массы нуклонов почти на два порядка превышают сумму масс трех соответствующих кварков. Это объясняется тем, что нуклоны состоят не из «голых» кварков, а из кварков, «укнутанных» в своеобразные тяжелые «глюонные шубы» (о глюонах речь пойдет в следующем разделе).

Барионы, состоящие не только из u - и d -кварков, называются гиперонами. Например, самый легкий из гиперонов — Λ -гиперон состоит из трех разных кварков: $\Lambda = uds$.

Самые легкие из мезонов — π -мезоны, или пионы: π^+ , π^- , π^0 . Кварковая структура заряженных пионов проста:

$$\pi^+ = u\tilde{d}, \quad \pi^- = d\tilde{u}.$$

Что касается нейтрального пиона, то он представляет собой линейную комбинацию состояний $u\tilde{u}$ и $d\tilde{d}$: часть времени он проводит в состоянии $u\tilde{u}$, часть — в состоянии $d\tilde{d}$. С равной вероятностью π^0 -мезон можно застать в каждом из этих состояний:

$$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u\tilde{u} - d\tilde{d}).$$

Массы π^+ - и π^- -мезонов (эти мезоны взаимно являются античастицами) равны примерно 140 МэВ; масса π^0 -мезона (π^0 -мезон подобно фотону истинно нейтрален) равна примерно 135 МэВ.

Следующие в порядке возрастания масс мезоны — это K -мезоны, их масса равна примерно 500 МэВ. K -мезоны содержат s -кварки:

$$K^+ = u\tilde{s}, \quad K^0 = d\tilde{s}, \quad \bar{K}^0 = s\tilde{d}, \quad K^- = s\tilde{u}.$$

K^+ - и K^- -мезоны являются античастицами по отношению друг к другу. То же относится и к K^0 - и \tilde{K}^0 -мезонам, которые, таким образом, не являются истинно нейтральными частицами.

Заметим, что частицы, содержащие s -кварки, называют странными частицами, а сам s -кварк — странным кварком. Это название возникло в 50-е годы, когда некоторые свойства странных частиц казались удивительными.

Очевидно, что из трех кварков (u , d , s) и трех антикварков (\tilde{u} , \tilde{d} , \tilde{s}) можно построить девять различных состояний:

$$\begin{array}{ccc} u\tilde{u} & u\tilde{d} & u\tilde{s} \\ d\tilde{u} & d\tilde{d} & d\tilde{s} \\ s\tilde{u} & s\tilde{d} & s\tilde{s}. \end{array}$$

Семь из этих девяти состояний (три для π -мезонов и четыре для K -мезонов) мы уже обсудили; два оставшиеся представляют собой суперпозиции — линейные комбинации состояний $u\tilde{u}$, $d\tilde{d}$ и $s\tilde{s}$. Масса одной из двух частиц — масса η -мезона — равна 550 МэВ, масса другой — масса η' -мезона — равна 960 МэВ;

$$\begin{aligned} \eta^0 &= \frac{1}{\sqrt{6}} (u\tilde{u} + d\tilde{d} - 2s\tilde{s}), \\ \eta' &= \frac{1}{\sqrt{3}} (u\tilde{u} + d\tilde{d} + s\tilde{s}). \end{aligned}$$

Подобно π^0 -мезону, η - и η' -мезоны являются истинно нейтральными частицами. (Более подробно о квантовомеханических суперпозициях сказано на с. 48.)

Девять мезонов, которые мы только что рассмотрели, имеют нулевой спин: $J = 0$. Каждый из этих мезонов состоит из кварка и антикварка, имеющих нулевой орбитальный момент: $\mathbf{L} = 0$. Спины кварка и антикварка смотрят навстречу друг другу, так что их суммарный спин также равен нулю: $S = 0$. Спин мезона \mathbf{J} является геометрической суммой орбитального момента кварков \mathbf{L} и их суммарного спина \mathbf{S} :

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}.$$

В данном случае сумма двух нулей, естественно, дает нуль.

Каждый из обсуждаемых девяти мезонов — самый легкий в своем роде. Рассмотрим, например, мезоны, у которых орбитальный момент кварка и антикварка по-прежнему равен нулю, $L = 0$, но спины кварка и антикварка параллельны, так что $S = 1$

и, следовательно, $J = 1$. Такие мезоны образуют более тяжелую девятку (ρ^+ , ρ^- , ρ^0 , K^{*+} , K^{*0} , K^{*-} , \tilde{K}^{*0} , ω^0 , φ^0):

ρ^+, ρ^-, ρ^0	$K^{*+}, K^{*0}, K^{*-}, \tilde{K}^{*0}$
770 МэВ	892 МэВ
ω^0	φ^0
783 МэВ	1020 МэВ

Известны многочисленные мезоны, у которых $L \neq 0$ и $J > 1$. Отметим, что в 1983 г. на Серпуховском ускорителе был открыт мезон с рекордно большим спином: $J = 6$.

Обратимся теперь к барионам, построенным из u -, d -и s -кварков. Согласно кварковой модели, орбитальные моменты трех кварков в нуклоне равны нулю, и спин нуклона J равен геометрической сумме спинов кварков. Так, например, спины двух u -кварков в протоне параллельны, а спин d -кварка смотрит в противоположную сторону. Так что у протона $J = 1/2$.

Согласно кварковой модели, протон, нейтрон, Λ -гиперон и еще пять других гиперонов образуют октет (восьмерку) барионов с $J = 1/2$; а барионы с $J = 3/2$ образуют декуплет (десятку):

ddd	udd	uud	uuu	Δ^-	Δ^0	Δ^+	Δ^{++}	1232 МэВ
dds	uds	uus		Σ^-	Σ^0	Σ^+		1385 МэВ
dss	uss			Ξ^-	Ξ^0			1530 МэВ
sss				Ω^-				1672 МэВ.

Ω^- -гиперон — вершина этой перевернутой пирамиды, был найден экспериментально в 1964 г. Масса его оказалась именно такой, какой ее предсказала кварковая модель.

ОЧАРОВАННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Но настоящим триумфом кварковой модели явилось открытие очарованных частиц, содержащих c -кварки (русское слово «очарование» соответствует английскому *charm*). Первая очарованная частица — так называемый J/ψ -мезон с массой 3,1 ГэВ — была открыта в 1974 г. (Иногда про эту частицу говорят, что она обладает скрытым очарованием, поскольку она состоит из пары $c\bar{c}$.) J/ψ -мезон был открыт практически одновременно на двух различных ускорителях. На протонном ускорителе J/ψ -мезон на-

блюдался среди продуктов столкновения протонного пучка с бериллиевой мишенью по его распаду $J/\psi \rightarrow e^+e^-$. На электронно-позитронном коллайдере его наблюдали в реакции $e^+e^- \rightarrow J/\psi$. Первая группа физиков назвала этот мезон J , вторая — ψ , так J/ψ -мезон получил свое двойное имя.

J/ψ -мезон является одним из уровней системы $c\bar{c}$, которая называется «чармоний» (от английского *charm*). В некотором смысле система $c\bar{c}$ напоминает атом водорода. Однако в каком бы состоянии ни находился атом водорода (на каком бы уровне ни находился его электрон), его все равно называют атомом водорода. В отличие от этого, разные уровни чармония (и не только чармония, но и других кварковых систем) рассматриваются как отдельные мезоны. В настоящее время обнаружено и исследовано около десятка мезонов — уровней чармония. Уровни эти отличаются друг от друга взаимной ориентацией спинов кварка и антикварка, значениями их орбитальных угловых моментов, различиями в радиальных свойствах их волновых функций.

Вслед за чармонием были открыты и мезоны с явным очарованием:

$$\begin{array}{lll} D^+ = c\bar{d}, & D^0 = c\bar{u}, & F^+ = c\bar{s}, \\ D^- = d\bar{c}, & \bar{D}^0 = u\bar{c}, & F^- = s\bar{c}, \\ 1869 \text{ МэВ} & 1865 \text{ МэВ} & 2020 \text{ МэВ} \end{array}$$

(здесь указаны приближенные значения масс очарованных мезонов). Были открыты также и очарованные барионы.

Открытие очарованных частиц, а затем и еще более тяжелых адронов, содержащих b -кварки, и исследование их свойств явилось блестящим подтверждением кварковой теории адронов. Впервые, благодаря большой массе c - и b -кварков, предстала во всем своем богатстве и наглядности картина уровней системы кварк–антикварк. Психологический эффект этого открытия был очень велик. В кварки поверили даже те, кто раньше относился к ним более чем скептически.

НЕВЫЛЕТАНИЕ КВАРКОВ

Если все адроны состоят из кварков, то, казалось бы, должны существовать и свободные кварки. Обнаружить свободные кварки было бы легко. Ведь они обладают дробными электрическими зарядами. А нейтрализовать дробный заряд никаким числом электронов и протонов нельзя: всегда будет или «недо-

лет» или «перелет». Если, скажем, в капельке масла содержится один кварк, то заряд всей капельки будет дробным. Опыты с капельками проводились еще в начале века, когда измеряли заряд электрона. В поисках кварков их повторили в наше время с гораздо более высокой точностью. Но дробных зарядов так и не обнаружили. К отрицательному результату привел и очень точный масс-спектроскопический анализ воды, который дал верхний предел для отношения числа свободных кварков к числу протонов порядка 10^{-27} .

Правда, экспериментаторы в лаборатории Стенфордского университета, подвешивая маленькие ниобиевые шарики в магнитном и электрическом полях, обнаружили у них дробные заряды. Но эти результаты не подтвердились в других лабораториях. Сегодня большинство специалистов в своих выводах склоняется к тому, что в свободном состоянии кварки в природе не существуют.

Сложилось парадоксальное положение. Внутри адронов кварки, несомненно, существуют. Об этом свидетельствует не только описанная выше кварковая систематика адронов, но и прямое «просвечивание» нуклонов высокоэнергичными электронами. Теоретический анализ этого процесса (он носит название глубоко-неупругого рассеяния) показывает, что внутри адронов электроны рассеиваются на точечных частицах с зарядами, равными $+2/3$ и $-1/3$, и спином, равным $1/2$. В процессе глубоко-неупругого рассеяния электрон резко меняет свой импульс и энергию, отдавая значительную их часть кварку (рис. 9). В принципе это очень похоже на то, как резко меняет свой импульс α -частица, наталкиваясь на ядро атома (рис. 10). Именно так в начале XX века в лаборатории Резерфорда было установлено существование атомных ядер.

Дробные заряды кварков проявляются и в другом глубоко-неупругом процессе: рождении струй адронов в аннигиляции e^+e^- при высоких энергиях (на больших коллайдерах). Более подробно об адронных струях в e^+e^- -аннигиляции будет рассказано в конце книги.

Итак, кварки внутри адронов несомненно есть. А вот вырвать их из адронов невозможно. Это явление называется английским словом «конфайнмент», что означает пленение, тюремное заключение. Кварк, приобретший энергию в результате столкновения с электроном (см. рис. 9), не вылетит из нуклона как свободная частица, а растратит свою энергию на образование кварк-анти-

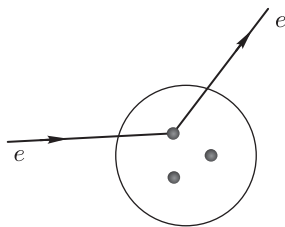


Рис. 9. Рассеяние электрона на одном из трех кварков протона. Протон — большой кружок, кварки — черные точки

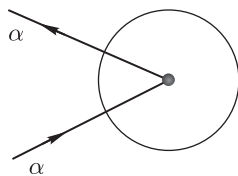


Рис. 10. Рассеяние α -частицы на ядре атома. Атом — большой кружок, ядро — черная точка в центре

кварковых пар, т. е. на образование новых адронов, в основном — мезонов.

В некотором смысле попытка разбить какой-нибудь мезон на составляющие его кварк и антикварк похожа на попытку разломить стрелку компаса на южный и северный полюсы: сломав стрелку, мы получим вместо одного магнитного диполя — два. Разломив мезон, мы получим два мезона. Энергия, которую мы затратим на то, чтобы растащить исходные кварк и антикварк, пойдет на создание новой пары антикварк плюс кварк, которые образуют с исходными два мезона.

Но аналогия с магнитной стрелкой неполна и обманчива. Ведь мы знаем, что в железе не только на макроуровне, но и на микроуровне никаких магнитных полюсов нет, есть только магнитные дипольные моменты, обусловленные спинами и орбитальным движением электронов. Напротив, глубоко внутри адронов отдельные кварки существуют — чем глубже мы проникаем внутрь, тем отчетливее мы их видим.

В гравитации и в электродинамике мы привыкли к тому, что силы между частицами растут, когда частицы сближаются, и ослабевают, когда частицы расходятся (потенциалы типа $1/r$). В случае кварка и антикварка ситуация другая. Имеется критический радиус $r_0 \approx 10^{-13}$ см: при $r \ll r_0$ потенциал между кварком и антикварком более или менее похож на кулоновский или ньютоновский, но при $r \gtrsim r_0$ его поведение резко меняется — он начинает расти.

Можно думать, что если бы в мире не было легких кварков (u , d , s), а были бы только тяжелые (c , b , t), то в этом случае начиная с $r \approx r_0$ потенциал возрастал бы линейно с ростом r , и мы имели бы конфайнмент, описываемый потенциалом типа

воронки (см. рис. 11 и для сравнения рис. 5). Линейно растущему потенциалу соответствует сила, не меняющаяся с расстоянием. Напомним, что при растяжении обычной жесткой пружины ее потенциальная энергия квадратично растет с ее удлинением. Поэтому конфайнмент, описываемый линейно растущим потенциалом, естественно назвать мягким.

К сожалению, в реальном мире рождение пар легких кварков не дает возможности развести исходные кварк и антикварк на расстояния, большие 10^{-13} см, без того, чтобы исходные кварк и антикварк вновь не оказались связанными, на этот раз — в двух различных мезонах. Так что испытать мягкую пружину конфайнмента на больших расстояниях не удастся.

Какие же силовые поля заставляют кварки вести себя столь странным образом?

Что за необычный клей их склеивает?

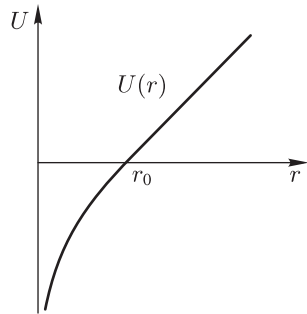


Рис. 11. Потенциал типа воронки, описывающий пленение кварка в адроне

ГЛЮОНЫ. ЦВЕТ

Сильное силовое поле, создаваемое кварками и антикварками и действующее на них, получило название глюонного поля, а частицы g , являющиеся квантами возбуждения этого поля, назвали глюонами (от английского *glue* — клей). Глюоны находятся в таком же соответствии с глюонным полем, как фотоны с электромагнитным полем. Установлено, что подобно фотонам, глюоны имеют спин, равный единице: $J = 1$ (как всегда — в единицах \hbar). Четность глюонов, как и фотонов, отрицательна: $P = -1$. (О четности будет рассказано ниже, в специальном разделе « C -, P -, T -симметрии».)

Частицы со спином, равным единице, и отрицательной четностью ($J^P = 1^-$) называются векторными, поскольку при вращениях и отражениях координат их волновые функции преобразуются как обычные пространственные векторы. Так что глюон, подобно фотону, принадлежит к классу частиц, называемых фундаментальными векторными бозонами.

Теория взаимодействия фотонов с электронами называется квантовой электродинамикой. Теорию взаимодействия глюонов с кварками назвали квантовой хромодинамикой (от греческого «хромос» — цвет). Термин «цвет» до сих пор не появлялся на страницах этой книги. Сейчас я попытаюсь рассказать, что за ним кроется.

Вы уже знаете, что на опыте наблюдали пять различных типов (или, как говорят, ароматов) кварков (u, d, s, c, b) и собираются открыть шестой (t). Так вот, согласно квантовой хромодинамике, каждый из этих кварков — это не одна, а три различных частицы. Так что всего кварков не 6, а 18, а с учетом антикварков — их 36. Принято говорить, что кварк каждого аромата существует в виде трех разновидностей, отличающихся друг от друга цветом. В качестве цветов кварков выбирают обычно желтый ($ж$), синий ($с$) и красный ($к$). Цвета антикварков — антижелтый ($\tilde{ж}$), антисиний ($\tilde{с}$), антикрасный ($\tilde{к}$). Разумеется, все эти названия чисто условные и никакого отношения к обычным оптическим цветам не имеют. Ими физики обозначают специфические заряды, которыми обладают кварки, и которые являются источниками глюонных полей, подобно тому, как электрический заряд является источником фотонного (электромагнитного) поля.

Я не оговорился, когда употребил множественное число, говоря о глюонных полях, и единственное число, говоря о фотонном поле. Дело в том, что существует восемь цветовых разновидностей глюонов. Каждый глюон несет пару зарядов: цветовой заряд ($ж$ или $с$, или $к$) и «антицветовой» ($\tilde{ж}$ или $\tilde{с}$, или $\tilde{к}$). Всего из трех цветов и трех «антицветов» можно построить девять парных комбинаций:

$$\begin{array}{ccc} ж\tilde{ж} & ж\tilde{с} & ж\tilde{к} \\ с\tilde{ж} & с\tilde{с} & с\tilde{к} \\ к\tilde{ж} & к\tilde{с} & к\tilde{к}. \end{array}$$

Эти девять парных комбинаций естественным образом разбиваются на шесть недиагональных «явно окрашенных»:

$$ж\tilde{с}, с\tilde{ж}, с\tilde{к}, к\tilde{с}, к\tilde{ж}, ж\tilde{к}$$

и на три диагональных (стоящих на диагонали нашей таблицы), обладающих как бы «скрытым цветом»:

$$ж\tilde{ж}, с\tilde{с}, к\tilde{к}.$$

Цветовые заряды, подобно электрическому заряду, сохраняются. Поэтому шесть недиагональных «явно окрашенных» цветовых пар не могут перемешиваться между собой. Что же касается трех диагональных пар со «скрытым цветом», то сохранение цветовых зарядов не препятствует переходам:

$$\tilde{ж}\tilde{ж} \leftrightarrow \tilde{с}\tilde{с} \leftrightarrow \tilde{к}\tilde{к}.$$

В результате этих переходов возникают три линейных комбинации (линейных суперпозиции), одна из которых

$$\frac{1}{\sqrt{3}} (\tilde{ж}\tilde{ж} + \tilde{с}\tilde{с} + \tilde{к}\tilde{к})$$

полностью симметрична относительно цветов. Она не обладает даже скрытым цветовым зарядом, являясь полностью бесцветной, или, как говорят, белой. Две другие диагональные комбинации можно выбрать, например, так:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (\tilde{ж}\tilde{ж} - \tilde{с}\tilde{с}) \quad \text{и} \quad \frac{1}{\sqrt{6}} (\tilde{ж}\tilde{ж} + \tilde{с}\tilde{с} - 2\tilde{к}\tilde{к}).$$

Или же двумя другими способами (путем циклической замены $\tilde{ж} \rightarrow \tilde{с} \rightarrow \tilde{к} \rightarrow \tilde{ж}$). Коэффициенты в этих линейных суперпозициях мы здесь обсуждать не будем, так как это выходит за рамки данной книги. То же относится и к физической эквивалентности трех различных выборов диагональных суперпозиций. Здесь важно, что каждой из восьми комбинаций (шести явно окрашенных и двух скрыто окрашенных) отвечает глюон. Итак, глюонов — восемь: $8 = 3 \cdot 3 - 1$.

Очень существенно, что в цветовом пространстве нет выделенного направления: три цветных кварка равноправны, три цветных антикварка равноправны и восемь цветных глюонов равноправны. Цветовая симметрия является строгой.

Ипуская и поглощая глюоны, кварки осуществляют сильное взаимодействие между собой.

Рассмотрим для определенности красный кварк. Ипуская глюон типа $\tilde{к}\tilde{ж}$, он, в силу сохранения цвета, перейдет в желтый кварк, ведь, согласно правилам игры, испускание антицвета равносильно поглощению цвета. Ипуская глюон $\tilde{к}\tilde{с}$, красный кварк перейдет в синий. Ясно, что к тем же результатам приводит и поглощение красным кварком глюона $\tilde{к}\tilde{ж}$ и глюона $\tilde{к}\tilde{с}$. В первом случае кварк пожелтеет, во втором — посинеет. Эти

процессы испускания и поглощения глюонов красным кварком можно записать в виде:

$$\begin{aligned} q_K &\rightarrow q_J + g_{K\tilde{J}}, & q_K + g_{\tilde{K}J} &\rightarrow q_J, \\ q_K &\rightarrow q_C + g_{K\tilde{C}}, & q_K + g_{\tilde{K}C} &\rightarrow q_C, \end{aligned}$$

где q_K , q_J , q_C обозначают соответственно красный, желтый и синий кварки любого аромата, а $g_{K\tilde{J}}$, $g_{\tilde{K}J}$, $g_{K\tilde{C}}$ и $g_{\tilde{K}C}$ — красно-антижелтый, антикрасно-желтый, красно-антисиний и антикрасно-синий глюоны.

Аналогичным образом можно рассмотреть испускание и поглощение недиагональных глюонов желтым и синим кварками.

Очевидно, что испускание и поглощение диагональных глюонов не меняет цвет кварка.

То обстоятельство, что глюоны несут цветовые заряды, приводит к кардинальному отличию этих частиц от фотонов. Фотон не обладает электрическим зарядом. Поэтому фотон не испускает, не стряхивает с себя фотонов. Глюоны же обладают цветовыми зарядами. Поэтому глюон испускает глюоны. Чем меньше масса заряженной частицы, тем легче частица излучает. Глюоны безмассовы, поэтому излучение глюонов глюонами, если бы они могли быть свободными, было бы катастрофически сильным. Но до катастрофы дело не доходит. Сильные взаимодействия между глюонами приводят к конфайнменту как их самих, так и кварков. Сильное взаимодействие цветовых зарядов на расстояниях порядка 10^{-13} см становится настолько сильным, что на большие расстояния изолированные цветовые заряды вырваться не могут. В результате, в свободном виде могут существовать только такие комбинации цветовых зарядов, которые в целом цветового заряда не имеют.

Электродинамика допускает существование как изолированных электронейтральных атомов, так и изолированных электронов и ионов. Хромодинамика же допускает существование в изолированном состоянии только бесцветных, «белых», адронов, в которых поровну намешано всех цветов. Так например, π^+ -мезон равное время проводит в каждом из трех возможных цветовых состояний $u_J\tilde{d}_{\tilde{J}}$, $u_C\tilde{d}_{\tilde{C}}$ и $u_K\tilde{d}_{\tilde{K}}$: он представляет собой сумму этих состояний.

Последнее утверждение, как и утверждение о глюонах со скрытым цветом, должно быть не очень понятно неподготовленному читателю. Но, как уже говорилось выше, не все в физи-

ке элементарных частиц можно объяснить просто и наглядно, «на пальцах». В связи с этим мне кажется, что здесь уместно сделать ряд замечаний, которые имеют отношение не только к этому разделу, но и к другим разделам книги, да и вообще к научно-популярной литературе. Позволяя читателю как-то ориентироваться в многомерном, огромном и запутанном лабиринте науки, научно-популярные книги и статьи приносят несомненную и большую пользу. Вместе с тем они приносят известный вред. Давая словесное, крайне приблизительное и карикатурно упрощенное описание научных теорий и экспериментов (а иное описание в популярных книгах зачастую невозможно), они могут создавать у читателя ложное ощущение простоты и полного понимания. У многих создается впечатление, что описываемые научные теории в значительной степени, а то и полностью необязательны, произвольны. Можно, дескать, и не такое насочинить. Именно научно-популярная литература ответственна за тот неиссякаемый поток писем, содержащих малограмотные «опровержения» и «кардинальные улучшения» теории относительности, квантовой механики и теории элементарных частиц, который обрушивается на основные физические институты страны. Мне кажется, что автор научно-популярной книги должен не только просто объяснить простое, но и предупредить читателя о наличии сложного, доступного лишь специалистам.

Цветные кварки и глюоны — не измышление досужего ума. Квантовая хромодинамика навязана нам природой, она подтверждена и продолжает подтверждаться огромным количеством экспериментальных фактов. Это одна из самых сложных физических теорий (а может быть, и самая сложная) с очень нетривиальным и не до конца разработанным математическим аппаратом.

В настоящее время нет ни одного факта, который бы противоречил квантовой хромодинамике. Однако целый ряд явлений находится в ней лишь качественное объяснение, а не количественное описание. В частности, до сих пор отсутствует полное понимание механизма того, как развиваются адронные струи из родившихся на малых расстояниях пар «кварк + антикварк». Не построена до сих пор теория конфайнмента. Над этими вопросами работают сейчас сильнейшие физики-теоретики во всем мире. Работа идет не только с помощью традиционных средств — карандаша и бумаги, но и путем многочасовых расчетов на мощных современных компьютерах. В этих «численных экспериментах»

непрерывные пространство и время заменяются дискретными четырехмерными решетками, содержащими порядка 10^4 узлов, и глюонные поля рассматриваются на этих решетках.

ЛЕПТОНЫ

В нескольких последних разделах мы обсуждали свойства и структуру адронов — многочисленных родственников протона. Обратимся теперь к родственникам электрона. Их называют лептонами (по-гречески «лептос» — мелкий, маленький, а «лепта» — мелкая монета). Подобно электрону, все лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях и имеют спин, равный $1/2$. Подобно электрону, все лептоны на современном уровне знаний можно назвать истинно элементарными частицами, поскольку ни у одного из лептонов не обнаружена структура, подобная той, которой наделены адроны. В этом смысле лептоны называют точечными частицами.

В настоящее время установлено существование трех заряженных лептонов: e^- , μ^- , τ^- , и трех нейтральных: ν_e , ν_μ , ν_τ (последние названы соответственно: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино). У каждого из заряженных лептонов есть, разумеется, своя античастица: e^+ , μ^+ , τ^+ . Что касается трех нейтрино, то обычно полагают, что у каждого из них тоже есть своя античастица: $\tilde{\nu}_e$, $\tilde{\nu}_\mu$, $\tilde{\nu}_\tau$. Но пока нельзя исключить и того, что ν_e , ν_μ и ν_τ — истинно нейтральные частицы и каждая из них так же одинока, как и фотон. Поговорим теперь о каждом из лептонов в отдельности.

Об электроне мы уже подробно говорили на предыдущих страницах книги.

Мюон был открыт в космических лучах. Процесс открытия мюона (от первого его наблюдения до осознания того факта, что эта частица является продуктом распада заряженного пиона: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, $\pi^- \rightarrow \mu^- \tilde{\nu}_\mu$) растянулся на десятилетие — от конца 30-х до конца 40-х годов. Заметим, что наличие у мюона своего собственного, мюонного нейтрино было установлено еще позже — в начале 60-х годов.

Что касается тау-лептона, то он был открыт в 1975 г. в реакции $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ на электронно-позитронном коллайдере.

Массы мюона и τ -лептона равны 106 МэВ и 1784 МэВ соответственно. В отличие от электрона, мюон и τ -лептон неста-

бильны. Время жизни мюона составляет $2 \cdot 10^{-6}$ с, время жизни τ -лептона — примерно $5 \cdot 10^{-13}$ с.

Распад мюона идет по одному каналу. Так, продуктами распада μ^- являются $e^- \tilde{\nu}_e \nu_\mu$, а продуктами распада μ^+ являются $e^+ \nu_e \tilde{\nu}_\mu$. У τ -лептона существует много каналов распада:

$$\tau^- \rightarrow e^- \tilde{\nu}_e \nu_\tau, \quad \tau^- \rightarrow \mu^- \tilde{\nu}_\mu \nu_\tau, \quad \tau^- \rightarrow \nu_\tau + \text{мезоны},$$

$$\tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \tilde{\nu}_\tau, \quad \tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \tilde{\nu}_\tau, \quad \tau^+ \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + \text{мезоны}.$$

Такое обилие каналов распада объясняется тем, что из-за большой массы τ -лептон может распадаться на такие частицы, на которые распад мюона запрещен законом сохранения энергии.

Наши сведения о нейтрино очень неполные. Меньше всего мы знаем о ν_τ . В частности, про массу ν_τ мы не знаем даже, равна ли она нулю или довольно велика. Верхний экспериментальный предел $m_{\nu_\tau} < 150$ МэВ. Аналогичный верхний предел для мюонного нейтрино: $m_{\nu_\mu} < 0,5$ МэВ. Для электронного нейтрино точность измерений несравненно выше. На пределе этой точности одна из экспериментальных групп сообщила, что $m_{\nu_e} \approx 30$ эВ. Это сообщение ожидает в настоящее время независимой проверки в других лабораториях *).

Экспериментально установлено, что каждый из заряженных лептонов принимает участие в слабых взаимодействиях вместе со своим нейтрино: e с ν_e , μ с ν_μ , τ с ν_τ . Например,

$$n \rightarrow p e^- \tilde{\nu}_e, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, \quad \tau^+ \rightarrow \tilde{\nu}_\tau e^+ \nu_e.$$

ПОКОЛЕНИЯ ЛЕПТОНОВ И КВАРКОВ

Различия между кварками и лептонами бросаются в глаза: первые — цветные и дробнозарядные, вторые — бесцветные и целозарядные. Но есть у них и общие черты: и те, и другие имеют спин, равный $1/2$; и те, и другие на современном уровне знания выглядят как точечные частицы. Поэтому лептоны и кварки называют фундаментальными фермионами.

*) Современные данные о массах нейтрино см. в разделе «20 лет спустя».

Фундаментальные фермионы естественным образом разбиваются на три группы, которые принято называть поколениями:

$$\begin{array}{ccc} u & c & t? \\ d & s & b \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \\ e^- & \mu^- & \tau^- \end{array}.$$

Вопросительный знак напоминает, что t -кварк пока что не открыт *). Но тот факт, что в двух поколениях заполнены все вакансии, наводит на мысль, что и третье поколение имеет ту же структуру.

Частицы первого поколения — самые легкие, частицы третьего — самые тяжелые.

Из заряженных частиц первого поколения построены атомы, а электронное нейтрино, хотя и прячется от глаз, но также играет важную роль, — не будь его, погасли бы Солнце и звезды. По существу, вся Вселенная покоится на плечах частиц первого поколения.

Зачем нужны частицы двух других поколений, мы пока не знаем и только начинаем догадываться. Самая долгоживущая из них — мюон — живет микросекунды ($2 \cdot 10^{-6}$ с). Странные частицы живут 10^{-8} — 10^{-10} с, остальные — меньше 10^{-12} с. С большим трудом рожденные на специально построенных ускорителях, эти частицы практически мгновенно гибнут. Исключение составляют лишь ν_μ и, возможно, ν_τ в том случае, если ν_τ безмассово или очень легкое.

Невольно возникают вопросы: «Зачем нужно изучать эти эфемерные и экзотические создания, если никакой роли в нашей жизни они не играют? Оправданы ли затраты на дорогие ускорительные лаборатории?» В конце книги я попытаюсь собрать воедино различные ответы на первый вопрос и обосновать положительный ответ на второй. Здесь же хотелось бы сделать лишь два утверждения.

Во-первых, изучение странных, очарованных и других частиц второго и третьего поколений позволило вскрыть кварковую структуру обычных нуклонов. Ведь на идею о кварках физиков натолкнуло экспериментальное исследование странных частиц, а окончательное подтверждение существования кварков дал чар-

*) Современные данные о t -кварке см. в разделе «20 лет спустя».

моний. Не исключено поэтому, что дальнейшие эксперименты на еще более мощных ускорителях позволят обнаружить и понять внутреннюю структуру самих лептонов и кварков.

Во-вторых, изучение процессов с участием фермионов второго и третьего поколений позволило понять фундаментальные силы, действующие не только между ними, но и между фундаментальными фермионами первого поколения. Без многочисленных экспериментов последнего десятилетия, в особенности без экспериментов на больших коллайдерах, мы не смогли бы убедиться в существовании глюонов, склеивающих кварки в обычных ядрах обычных атомов. Другой пример, к рассмотрению которого мы сейчас перейдем, это устройство фундаментальных слабых сил, о природе которых мы так много узнали, изучая слабые взаимодействия лептонов и кварков всех трех поколений. Кульминационным моментом этих исследований было открытие в 1983 г. так называемых промежуточных векторных бозонов: W^+ , W^- и Z^0 — фундаментальных переносчиков слабого взаимодействия.

РАСПАДЫ ЛЕПТОНОВ И КВАРКОВ

В сильных и электромагнитных взаимодействиях кварки и антикварки данного аромата рождаются и уничтожаются только парами. Поэтому, если бы не было слабого взаимодействия, то ароматы кварков и лептонов сохранялись бы, и все двенадцать фундаментальных фермионов были бы стабильны.

Мы уже познакомились выше с β -распадом нейтрона и родственной ему слабой термоядерной реакцией, в которой сгорают протоны и электроны Солнца. Посмотрим теперь, как выглядят эти и другие слабые процессы на кварковом языке. Начнем с β -распада нейтрона. Напомню, что $p = uud$, а $n = ddu$. Так что β -распад нейтрона

$$n \rightarrow pe^-\bar{\nu}_e$$

сводится к β -распаду d -кварка (рис. 12)

$$d \rightarrow ue^-\bar{\nu}_e.$$

Аналогичным образом солнечная реакция

$$pe^-p \rightarrow D\nu_e$$

(напомню, что D обозначает ядро тяжелого водорода — дейтрон) сводится, как нетрудно проверить, к реакции

$$ue^- \rightarrow d\nu_e.$$

Этот последний процесс может быть (мысленно, конечно) получен из процесса распада d -кварка путем двух операций: 1) замены одной из античастиц (в данном случае $\bar{\nu}_e$) в конечном состоянии на соответствующую частицу (в данном случае ν_e) в начальном; 2) поворота стрелки на 180° , т. е. замены начального состояния конечным, а конечного — начальным.

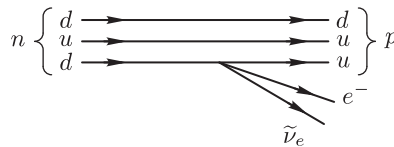


Рис. 12. Одна из двух кварковых диаграмм β -распада нейтрона

Смысл второй операции ясен. Ее можно назвать обращением времени, поскольку при этом, как в обращенном во времени кинофильме, процесс идет в обратную сторону. Законность первой операции менее очевидна. Мы остановимся, чтобы подробно рассмотреть ее здесь, поскольку эта операция играет важную, можно сказать, узловую роль в теоретическом анализе всех процессов, в которых участвуют элементарные частицы.

Какой бы сложный процесс, идущий в природе, мы ни рассматривали, всегда можно быть уверенным в том, что законами сохранения электрического, барионного и других возможных зарядов будут разрешены и процессы, в которых испускание (поглощение) любой из частиц заменено поглощением (испусканием) соответствующей античастицы. Эта «алгебра античастиц» (перенос частицы из одной части «равенства», описывающего реакцию, в другую с одновременным изменением знака зарядов) основана на том, что все заряды у частицы и античастицы имеют противоположные знаки. Эта «алгебра» лежит в основе всей современной теории элементарных частиц — квантовой теории поля. Легко, например, проверить, что все электромагнитные процессы, равно как и все глюонно-кварковые процессы, рассмотренные нами на предыдущих страницах, подчиняются этой алгебре.

Однако сохранения всех зарядов еще недостаточно, чтобы тот или иной процесс действительно имел место в природе. Для

этого еще необходимо (и достаточно *)), чтобы в этом процессе выполнялись фундаментальные законы сохранения, в частности, необходимо сохранение энергии и импульса. А здесь все определяют конкретные условия, в которых находятся взаимодействующие частицы. Так, например, реакция $e^-p \rightarrow n\nu_e$ запрещена (и мы должны быть благодарны природе, что она запрещена) для электрона и протона, образующих атом водорода, поскольку нейтрон тяжелее, чем протон и электрон, вместе взятые. Подумайте только, как выглядел бы мир, в котором время жизни водорода измерялось бы секундами!

С другой стороны, реакция $e^-p \rightarrow n\nu_e$ в некоторых атомах идет. Примером является нестабильный изотоп бериллия (^7_4Be). Ядро этого атома захватывает один из атомных электронов, в результате чего возникает изотоп лития (^7_3Li). Дело здесь в том, что атом с ядром ^7_3Li легче, чем атом с ядром ^7_4Be . Аналогично обстоит дело и с термоядерной реакцией $p\bar{p} \rightarrow D\nu_e$: масса дейтрона меньше, чем сумма масс двух протонов и электрона.

Из сказанного следует, что если на водородную мишень падает пучок электронов, энергия которых превышает порог реакции

$$e^-p \rightarrow n\nu_e,$$

то эта реакция будет идти. Точно так же должна идти и реакция

$$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+n,$$

если энергия $\bar{\nu}_e$ превышает величину $(m_n - m_p + m_e)c^2$. Эта реакция действительно наблюдалась в пучках антинейтрино низких энергий от ядерных реакторов и в пучках антинейтрино высоких энергий на ускорителях. Что касается реакции

$$\nu_e n \rightarrow e^-p,$$

то она наблюдалась не на свободных нейтронах (достаточно плотных мишеней, состоящих из свободных нейтронов, не существует), а на нейтронах, связанных в ядре дейтерия или в более тяжелых ядрах.

«Орудуя» обращением времени и алгеброй античастиц, легко выписать многочисленные кварковые процессы, родственные

*) В физике все, что не запрещено, обязательно должно происходить. Последовательное применение этого принципа позволит Вам многое понять и упорядочить в калейдоскопическом мире реакций и распадов элементарных частиц. Именно в силу этого принципа атом переходит из возбужденного состояния в основное.

процессу распада d -кварка, $d \rightarrow ue^{-}\tilde{\nu}_e$. Например, превращение пары кварк–антикварк в пару лептон–антилептон:

$$d\tilde{u} \rightarrow e^{-}\tilde{\nu}_e \quad \text{или} \quad u\tilde{d} \rightarrow e^{+}\nu_e \quad \text{и т. д.}$$

Первый из этих процессов ответственен за распад $\pi^{-} \rightarrow e^{-}\tilde{\nu}_e$, второй — за распад $\pi^{+} \rightarrow e^{+}\nu_e$ (рис. 13 и 14).

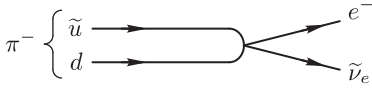


Рис. 13. Кварковая диаграмма распада $\pi^{-} \rightarrow e^{-}\tilde{\nu}_e$

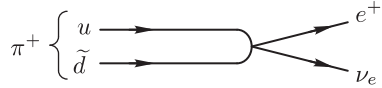


Рис. 14. Кварковая диаграмма распада $\pi^{+} \rightarrow e^{+}\nu_e$

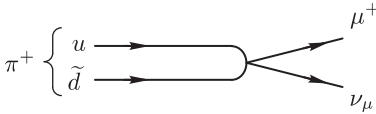


Рис. 15. Кварковая диаграмма распада $\pi^{+} \rightarrow \mu^{+}\nu_{\mu}$

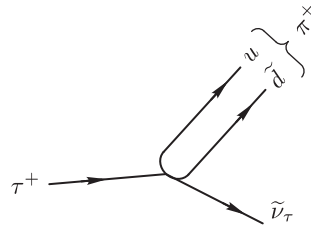


Рис. 16. Кварковая диаграмма распада $\tau^{+} \rightarrow \pi^{+}\tilde{\nu}_{\tau}$

Итак, мы видим, что слабое взаимодействие кварковой пары ud с лептонной парой $\nu_e e$ лежит в основе целого класса процессов. Точно так же взаимодействуют с кварковой парой ud и две другие лептонные пары: $\nu_{\mu}\mu$ и $\nu_{\tau}\tau$. В качестве примера приведем здесь распады (рис. 15, 16)

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+}\nu_{\mu}, \quad \tau^{+} \rightarrow \pi^{+}\tilde{\nu}_{\tau}$$

и реакцию захвата мюона в водороде (рис. 17)

$$\mu^{-}p \rightarrow n\nu_{\mu}.$$

Заметьте, что каждый заряженный лептон «верен» своему нейтрину.

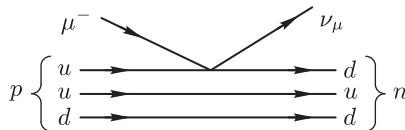


Рис. 17. Кварковая диаграмма реакции захвата мюона $\mu^{-}p \rightarrow n\nu_{\mu}$

Переходя к другим кварковым парам, было бы естественно ожидать, что кварки, подобно лептонам, осуществляют слабые переходы только внутри своих поколений. Если бы это было так, то в слабом взаимодействии участвовали бы только три кварковые пары: ud , cs , tb . При этом s -кварк и b -кварк были бы стабильны, поскольку s -кварк много легче c -кварка, а b кварк много легче t -кварка. А это значило бы, что были бы стабильны и странные частицы, и адроны, содержащие b -кварки. Мы знаем, что в действительности это не так и что существуют многочисленные слабые процессы, в которых кварки одного поколения переходят в кварки другого поколения, как это изображено на рис. 18.

Итак, всего в слабом взаимодействии должны участвовать три лептонных и девять кварковых пар. Взаимодействия лептонных пар с кварками дают многочисленные лептон-адронные реакции и распады. Приведу дополнительные примеры распадов, в которых участвуют как лептоны, так и адроны (их называют иногда полулептонными):

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, \quad \Lambda \rightarrow p e^- \tilde{\nu}_e, \quad F^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \quad \tau^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \tilde{\nu}_\tau \text{ и т. д.}$$

Наряду с лептон-адронными процессами должны существовать и существуют как чисто лептонные (примеры которых приведены на рис. 19), так и чисто адронные, так называемые нелептонные процессы. Последние обусловлены слабыми взаимо-

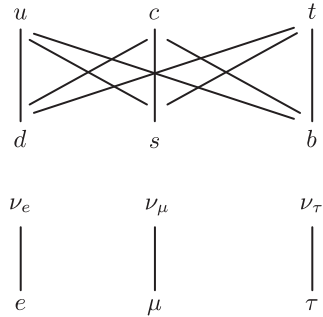


Рис. 18. Три поколения лептонов и кварков. Линиями указаны три «слабые пары» лептонов и девять «слабых пар» кварков

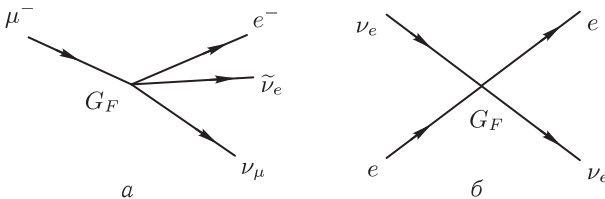


Рис. 19. Два примера чисто лептонных слабых процессов: распад мюона (а) рассеяние электронного нейтрино на электроне (б). В каждом из этих процессов участвуют четыре фермиона, взаимодействие между которыми характеризуется константой Ферми G_F

действиями между кварковыми парами, например:

$$(ud)(du) \text{ или } (ud)(cs), \text{ или } (cs)(bc).$$

Примером нелептонных распадов, обусловленных взаимодействием $(du)(us)$, являются распады (рис. 20)

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0, \quad \Lambda \rightarrow p \pi^-.$$

Как нетрудно подсчитать, 12 «слабых пар» должны в общей сложности давать $\frac{1}{2} \cdot 12(12 + 1) = 78$ различных взаимодействий, каждое из которых, подобно взаимодействию $(ud)(e\nu_e)$, вызывает множество различных процессов.

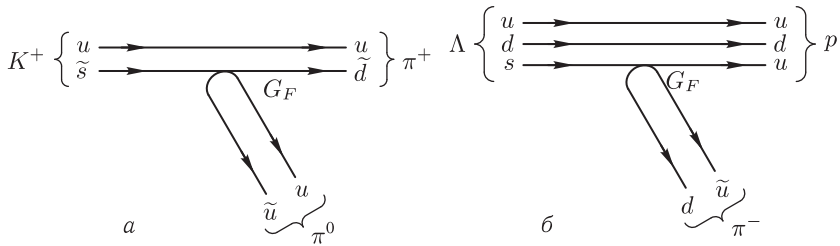


Рис. 20. Два примера кварковых диаграмм, описывающих чисто адронные слабые процессы: распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ (а); распад $\Lambda \rightarrow p \pi^-$ (б). Слабое четырехфермионное взаимодействие, характеризуемое константой Ферми G_F , происходит между кварками

Большинство из 78 «затравочных» взаимодействий пока что не наблюдалось: в 33 из них участвуют не открытые пока t -кварки *), в ряде случаев, как, например, в случае $(\nu_\tau \tau)(\tau \nu_\tau)$, нет подходящих мишеней и пучков. Однако во всех тех случаях, когда предсказанное взаимодействие было доступно наблюдению, оно всегда наблюдалось.

Все разнообразие слабых процессов «управляется» одной фундаментальной постоянной — так называемой константой четырехфермионного взаимодействия или константой Ферми G_F . В единицах СИ $G_F = 1,4 \cdot 10^{-62}$ Дж \cdot м³, но более поучительно выразить G_F в электрон-вольтах, в явном виде выделив множители \hbar и c :

$$G_F \approx 1,2 \cdot 10^{-5} \hbar^3 c^3 \text{ ГэВ}^{-2}.$$

*) Об открытии t -кварка см. раздел «20 лет спустя».

Вероятности всех слабых реакций и слабых распадов пропорциональны G_F . Так, например, время жизни мюона τ_μ следующим образом выражается через G_F и массу мюона m_μ :

$$\frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5 c^4}{192 \pi^3 \hbar^7}.$$

Чем больше энергия, выделяемая в распаде, тем быстрее этот распад происходит. Так, время жизни частиц, более тяжелых, чем мюон: τ -лептона, c -кварка и b -кварка, — на шесть-семь порядков меньше времени жизни мюона. С другой стороны, нейтрон живет в миллиард раз дольше, чем мюон. Для грубой оценки можно исходить из того, что вероятность слабого распада растет как пятая степень энергосодержания. В распадах τ -лептона, c -кварка и b -кварка практически вся энергия, содержащаяся в массе, переходит в кинетическую энергию продуктов распада. Так что энергосодержание большое. В распаде же нейтрона выделяемая энергия составляет всего 0,8 МэВ, поэтому нейтрон и живет так долго.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Но почему каждая из «слабых пар» взаимодействует с каждой? Ответ на этот вопрос нам опять (в который уже раз!) поможет найти аналогия с электродинамикой. Почему электрон рассеивается на протоне? Потому что каждая из этих частиц взаимодействует с электромагнитным полем, взаимодействует с фотонами. Рассеяние свободного электрона на свободном протоне с передачей энергии и импульса можно описать следующим образом. Одна из этих частиц, скажем, электрон, испускает фотон, а другая — поглощает его. Но фотон, которым обмениваются электрон и протон, — это не обычный свободный фотон. Действительно, рассмотрим испускание фотона электроном, который как до, так и после испускания был и остается свободным. Применяя к этому элементарному «подпроцессу» закон сохранения энергии–импульса, легко убедиться, что у испущенного фотона энергия не равна импульсу (умноженному на скорость света c), как это должно быть для свободных реальных фотонов. Напомним, что для свободной частицы с массой m должно выполняться соотношение $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4$, а у фотона $m = 0$. В случае же фотона, которым обмениваются электрон и протон, $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 < 0$. Особенно легко это увидеть, если рассмотреть

ер-рассеяние в системе центра масс электрона и протона. В этой системе энергия электрона в результате рассеяния не меняется, а меняется лишь направление его импульса. В результате, фотон, которым обмениваются электрон и протон, переносит импульс \mathbf{p} , но его энергия E равна нулю, так что $E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = -\mathbf{p}^2 c^2 < 0$.

Фотоны, для которых справедливо неравенство

$$E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 \neq 0,$$

называются виртуальными. Слово «виртуальный» в этом контексте имеет смысл, противоположный смыслу слова «реальный». Виртуальный фотон может уйти от испустившего его источника лишь на малое расстояние, которое тем меньше, чем больше виртуальность фотона. Если поблизости от электрона пролетит протон, который сможет поглотить виртуальный фотон, то произойдет рассеяние; и электрон и протон изменят свои импульсы. Процесса же, при котором виртуальный фотон испустился и не поглотился, по определению быть не может.

Понятие виртуальных частиц — частиц, для которых выполняется неравенство

$$m^2 c^4 \neq E^2 - \mathbf{p}^2 c^2,$$

играет важную роль в квантовой теории поля. По существу, все, даже самые сложные процессы сводятся к испусканию, распространению и поглощению реальных и виртуальных частиц.

При теоретическом анализе различных процессов очень удобен язык так называемых фейнмановских диаграмм, на которых реальные частицы изображаются «лучами» — линиями, приходящими из бесконечности или уходящими на бесконечность, а распространению виртуальных частиц отвечают «отрезки» — линии, соединяющие другие линии. Обычно (хотя и не обязательно) фермионы изображают прямыми линиями, а бозоны — волнистыми. Так, на рис. 21 изображено рассеяние электрона на протоне путем обмена виртуальным фотоном. На рис. 22 — рассеяние электрона на протоне, при котором электрон, кроме того, излучает реальный, так называемый тормозной фотон (импульс электрона при этом уменьшается, электрон «тормозится»). На этом рисунке электронная линия, соединяющая точки испускания виртуального и реального фотонов, изображает виртуальный электрон. (Как Вы уже знаете, свободный электрон не может испустить свободный фотон, все время оставаясь свободным.)

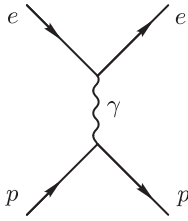


Рис. 21. Фейнмановская диаграмма, описывающая упругое рассеяние электрона на протоне. Волнистая линия изображает виртуальный фотон

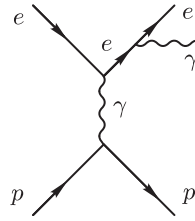


Рис. 22. Фейнмановская диаграмма, описывающая неупругое рассеяние электрона на протоне, при котором испускается «тормозной» фотон. На этой диаграмме имеются две виртуальные частицы: не только виртуальный фотон, но и виртуальный электрон.

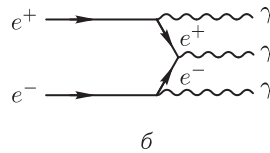
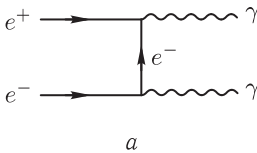


Рис. 23. Фейнмановские диаграммы, описывающие аннигиляцию электрона и позитрона в два фотона (a) и в три фотона (б)

Фейнмановские диаграммы рис. 23 и 24 изображают некоторые процессы аннигиляции. На рис. 23, a и б показаны процессы аннигиляции электрона и позитрона в два и три фотона соответственно. Здесь виртуальными являются электроны. На рис. 24 изображен процесс аннигиляции электрона и позитрона в пару $\mu^+\mu^-$. В этом процессе, если рассматривать его в системе центра масс сталкивающихся частиц, где сумма импульсов электрона и позитрона равна нулю, виртуальный фотон не переносит импульса, он переносит только энергию.

Места соединений линий на фейнмановских диаграммах называются вершинами. Вершины с прилегающими к ним линиями называются вершинными частями. Вершинные части описывают испускание и поглощение частиц, линии — их распространение. Каждая вершина характеризуется некоторой величиной (вообще

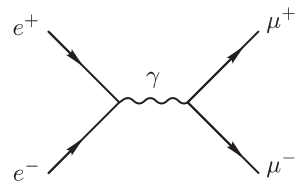


Рис. 24. Фейнмановская диаграмма, описывающая аннигиляцию электрона и позитрона в пару мюонов

говоря, не безразмерной), которую называют константой взаимодействия или константой связи. Чем меньше эта константа, тем слабее соответствующее взаимодействие.

В случае слабых распадов и реакций константой взаимодействия, как мы уже знаем, является константа Ферми (см., например, рис. 19).

В случае электромагнитных процессов константой взаимодействия является электрический заряд e . Обычно в качестве характеристики заряда используют безразмерную величину $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$, которая (как уже упоминалось выше) с тех давних времен, когда создавалась теория атомных спектров, получила название постоянной тонкой структуры. (Тонкой структурой называют расщепление атомных уровней, возникающее из-за взаимодействия собственного (спинового) магнитного момента электрона с магнитным моментом его орбитального движения.) Потенциальная энергия кулоновского притяжения электрона к протону, отвечающая обмену виртуальным фотоном, показанному на рис. 21, имеет вид

$$U(r) = -\frac{e^2}{r} = -\frac{\alpha\hbar c}{r}.$$

Медленное (пропорциональное $1/r$) спадание потенциальной энергии с ростом r связано с тем, что фотон не имеет массы покоя. Можно показать, что если бы у фотона была масса m , то потенциал, отвечающий обмену таким «массивным фотоном», имел бы вид

$$U(r) = -\frac{\alpha\hbar c}{r} e^{-\frac{r}{\hbar/mc}}$$

и экспоненциально спадал бы при $r > \hbar/mc$. Потенциал такого вида носит имя японского физика Х. Юкавы. (Напомним, что \hbar/mc — это комптоновская длина волны частицы с массой m .)

Обратите внимание на то, что эффективность этого потенциала резко падает с ростом массы «массивного фотона». Это вполне естественно. Чем больше масса фотона, тем на меньшее расстояние его «отпустит» квантовомеханическое соотношение неопределенности, тем меньшее влияние он окажет на электронное облако атома. В научно-популярных книгах виртуальные частицы иногда сравниваются с волейбольным мячом, обмениваясь которым, игроки удерживают друг друга на площадке. Это, разумеется, очень поверхностное сравнение: ведь физического притяжения мяч не осуществляет. Но если это сравнение про-

должить, то будет ясно, что чем тяжелее мяч, тем меньше будут эффективные размеры волейбольной площадки. Пудовую гирию далеко не отобьешь.

Фейнмановские диаграммы содержат в себе рецепт расчета вероятностей соответствующих процессов. Согласно квантовой механике, вероятность процесса определяется квадратом модуля некоторой, вообще говоря, комплексной величины, которая называется амплитудой процесса. Фейнмановская диаграмма задает алгоритм вычисления амплитуды. Каждому элементу диаграммы отвечают определенные множители. Так, линиям реальных частиц отвечают волновые функции этих частиц, вершинам ставятся в соответствие константы связи. Линиям виртуальных частиц в фейнмановских диаграммах сопоставляются функции распространения этих виртуальных частиц, называемые пропагаторами (от английского *propagate* — распространять(ся)).

Пропагатор виртуального фотона, переносящего четырехмерный импульс q , имеет вид

$$-1/q^2,$$

здесь $q^2 = q_0^2 - \mathbf{q}^2$, $q_0 = E/c$, где E — энергия, переносимая фотоном, \mathbf{q} — переносимый им импульс. Учитывая, что вероятность процесса пропорциональна квадрату амплитуды, мы можем отсюда сделать вывод, что вероятность передачи импульса q при рассеянии, скажем, электрона на электроне падает как $1/q^4$.

Пропагатор виртуального векторного бозона с массой m («тяжелого фотона»), переносящего четырехмерный импульс q , имеет вид

$$1/(m^2 - q^2).$$

Заметим, что когда $m^2 \gg |q^2|$, пропагатор фактически не зависит от импульса и сводится к постоянной величине $1/m^2$.

Мы рассмотрели случай обмена «очень тяжелым фотоном», потому что в дальнейшем он нам понадобится в связи со слабым взаимодействием. Слабое взаимодействие, как окончательно было экспериментально доказано в 1983 г., имеет место именно благодаря обмену очень тяжелыми векторными частицами. Подобно тому, как все электромагнитные взаимодействия лептонов и кварков обусловлены виртуальными фотонами, все слабые процессы лептонов и кварков обусловлены обменом тяжелыми промежуточными бозонами W^+ , W^- и Z^0 . Мы рассмотрели

в качестве упрощенного примера несуществующий в природе массивный фотон именно затем, чтобы вспомнить о нем при обсуждении массивных промежуточных бозонов.

ТОКИ

Для того чтобы более или менее вразумительно рассказать об испускании и поглощении промежуточных бозонов, необходимо ввести еще один новый термин — ток. Неявно мы уже имели дело с токами на протяжении всей книги, начиная с того места, где впервые зашла речь об излучении и поглощении фотонов, о взаимодействии электрона с электромагнитным полем. С цветными токами мы имели дело, когда обсуждали излучение и поглощение глюонов, со слабыми токами — когда обсуждали проявление «алгебры античастиц» в слабых взаимодействиях.

По существу, весь процесс развития физики — это процесс выработки все более абстрактных, все более удаленных от нашего непосредственного житейского опыта понятий, которые все более адекватно описывают природу. Понятия заряда (не обязательно электрического) и тока являются одними из наиболее фундаментальных, первичных понятий современной физики. Невозможно в полной мере объяснить смысл этих понятий, не прибегая к математическому языку квантовой теории поля. Но читатель может попытаться научиться в какой-то степени пользоваться ими даже без полного понимания.

Начнем с электромагнитного тока. Для первого знакомства можно сказать, что электромагнитный ток — это движущийся электрический заряд, т. е. почти то же самое, что и обыкновенный электрический ток. Но для нас важно то, что электромагнитный ток — это источник фотонов. На фейнмановских диаграммах электромагнитному току электрона отвечает та часть электрон-фотонной вершинной части (рис. 25, *а*), которая содержит лишь электронные линии, а именно рис. 25, *б*.

Электронный электромагнитный ток отвечает за излучение и поглощение фотонов не только электроном, но и позитроном (рис. 25, *в*). Кроме того, он же ответственен за рождение и аннигиляцию электронно-позитронных пар в вершинах (рис. 25, *г*, *д*). По существу, в электромагнитном токе заложены все электронно-позитронные переходы, все взаимодействия электронов и позитронов с реальными и виртуальными фотонами. То же относится и к электромагнитным токам мюона, тау-лептона,

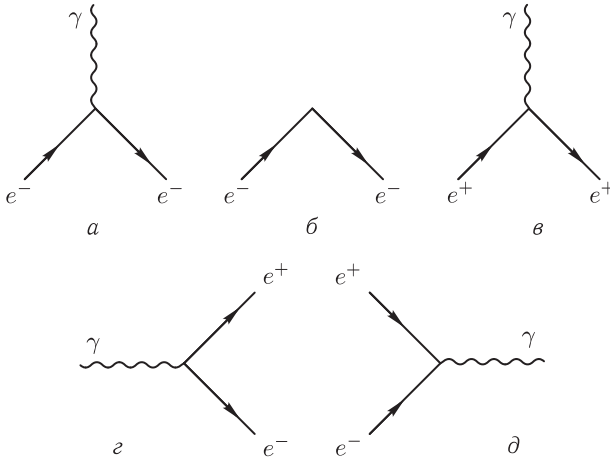


Рис. 25. Части фейнмановских диаграмм, описывающие испускание и поглощение фотона электроном (*а*), позитроном (*б*), рождение фотоном пары e^+e^- (*в*) и аннигиляцию пары e^+e^- в фотон (*г*). Часть рис. *а*, отвечающая электромагнитному току, изображена на рис. *б*

кварков и соответствующих античастиц. Все электромагнитные взаимодействия лептонов и кварков можно условно записать как взаимодействие фотона с суммарным электромагнитным током j^{em} . Константа этого взаимодействия — заряд электрона e . Электромагнитный ток имеет вид

$$j^{em} = \bar{e}e + \bar{\mu}\mu + \bar{\tau}\tau + \frac{1}{3}\bar{d}d + \frac{1}{3}\bar{s}s + \frac{1}{3}\bar{b}b - \frac{2}{3}\bar{u}u - \frac{2}{3}\bar{c}c - \frac{2}{3}\bar{t}t.$$

Дробные числа — это отношения зарядов кварков к заряду электрона.

Такая запись электромагнитного тока очень упрощена. В действительности ток является четырехмерным вектором и имеет четыре компоненты:

$$j_{\mu}^{em} \quad (\mu = 0, 1, 2, 3).$$

Для покоящегося электрона отлична от нуля только одна, временная компонента тока j_0 , для движущегося — все четыре компоненты.

К сожалению, это замечание мало что пояснит читателю, не знакомому хотя бы немного с квантовой электродинамикой. Но то обстоятельство, что электромагнитный ток является четырехмерным вектором, слишком существенно, чтобы его можно было обойти молчанием. Вспомните, что фотон является векторной частицей. А векторная частица испускается и поглощается векторным током. Более подробно речь об этом еще пойдет ниже.

Заметим, что каждый из кварковых токов представляет собой сумму по трем цветам кварков:

$$\bar{u}u = \bar{u}_R u_R + \bar{u}_C u_C + \bar{u}_K u_K,$$

$$\bar{c}c = \bar{c}_R c_R + \bar{c}_C c_C + \bar{c}_K c_K$$

и т. д.

Ведь фотон — «дальтоник» и цветов не различает. Итак, с точностью до множителей $1/3$ и $-2/3$ все слагаемые электромагнитного тока выглядят одинаково. Поэтому физическую суть тока мы обсудим на примере одного из них — первого слагаемого, $\bar{e}e$.

Какой смысл несут в этом выражении символы e и \bar{e} ? Этими символами обозначены так называемые операторы, описывающие в квантовой теории поля процессы рождения и уничтожения частиц и античастиц. Так, оператор e уничтожает электрон, оператор \bar{e} рождает электрон. Таким образом, оператор тока $\bar{e}e$ уничтожает старый электрон и тут же на смену ушедшему рождает, вообще говоря, в другом состоянии, новый («Король умер, да здравствует король!») Но каждый из операторов e и \bar{e} имеет не по одной, а по две обязанности. Оператор e , кроме того, что он уничтожает электроны, еще и рождает позитроны, а оператор \bar{e} , кроме того, что рождает электроны, еще и уничтожает позитроны. Отсюда и возникает вся описанная выше «алгебра античастиц». Отсюда же возникает и возможность на языке фейнмановских диаграмм рассматривать позитрон как электрон, движущийся «вспять во времени» (на рис. 23, *а* и *б* на каждой из линий виртуальных электронов можно заменить e^- на e^+ и обратить стрелку).

Мы говорили выше об электромагнитном токе лептонов и кварков. Аналогично устроены цветные и слабые токи.

Цветные кварковые токи, ответственные за испускание кварками глюонов, имеют определенные цветовые индексы, значение которых определяется тем, какой из восьми глюонов испускается или поглощается. Так, например, ток $\bar{u}_R u_K$ превращает красный u -кварк в желтый u -кварк, испуская красно-антижелтый ($k\bar{j}$) глюон или поглощая желто-антикрасный ($j\bar{k}$) глюон. Этот же ток описывает превращение антижелтого антикварка в антикрасный антикварк, рождение пары «желтый кварк + антикрасный антикварк» и аннигиляцию пары «антижелтый антикварк + красный кварк».

Слабые токи, подобно электромагнитным токам, бесцветны, т. е. представляют собой суммы по трем цветовым индексам.

По существу, мы уже ввели слабые токи в разделе «Распады лептонов и кварков», когда говорили о «слабых парах» лептонов и «слабых парах» кварков. Каждой такой паре отвечают два взаимно сопряженных тока, назовем их положительным и отрицательным токами. Например, паре $e\nu_e$ отвечают токи $\bar{\nu}_e e$ и $e\bar{\nu}_e$. Первый из них $\bar{\nu}_e e$ описывает превращение электрона в нейтрино (и антинейтрино — в позитрон) при поглощении W^+ -бозона или испускании W^- -бозона, а также превращение W^+ в пару $e^+\nu_e$ и превращение пары $e^-\bar{\nu}_e$ в W^- (рис. 26). Второй ток описывает зарядово-сопряженные процессы (рис. 27).

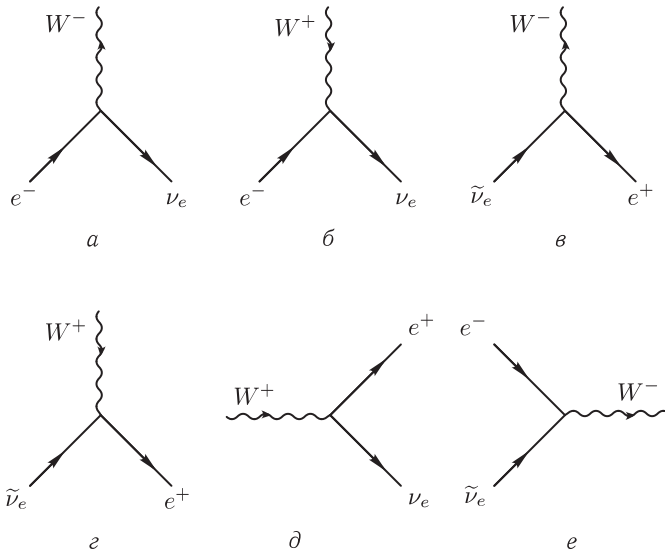


Рис. 26. Вершинные части фейнмановских диаграмм, описывающие испускание W^- -бозона и поглощение W^+ -бозона слабым положительным током $\bar{\nu}_e e$

Суммарный положительный ток, ответственный за поглощение положительных W -бозонов, состоит из двенадцати слагаемых: трех лептонных и девяти кварковых. То же относится и к отрицательному току. Названия положительный ток и отрицательный ток обычно в литературе не используются; мы их ввели здесь, чтобы сделать более ясным изложение. В литературе об этих токах говорят как о заряженном токе и сопряженном ему токе, подразумевая обычно под первым наш отрицательный ток, а под вторым — положительный. Итак, все слабые процессы, обсуждавшиеся выше, обусловлены тем, что заряженный слабый

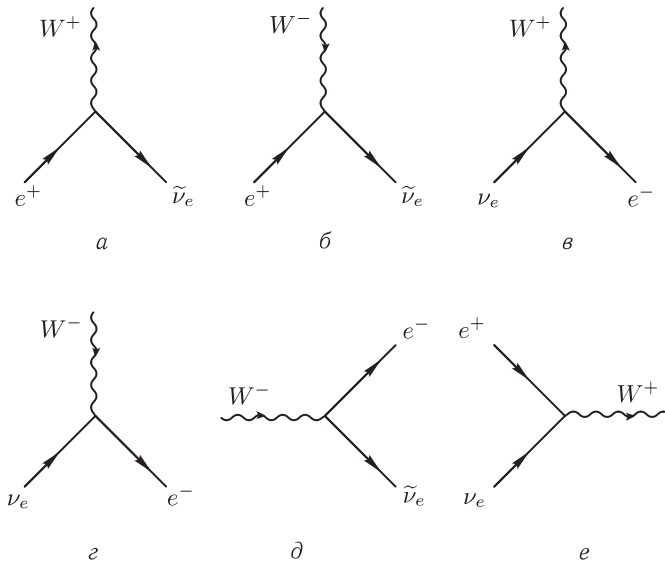


Рис. 27. Вершинные части фейнмановских диаграмм, описывающие испускание W^+ -бозона и поглощение W^- -бозона слабым отрицательным током $\bar{e}\nu_e$

ток взаимодействует со своим сопряженным током, обмениваясь виртуальными W^\pm -бозонами.

Различия между лептонными и кварковыми токами, проиллюстрированные схемой рис. 18, можно лучше понять, если взглянуть на рис. 28 и 29.

Лептонный ток можно представить как сумму скалярных произведений ортов, изображенных на рис. 28, а и б. Как видно из рис. 28, орт каждого из нейтрино параллелен орту соответствующего заряженного лептона и перпендикулярен двум

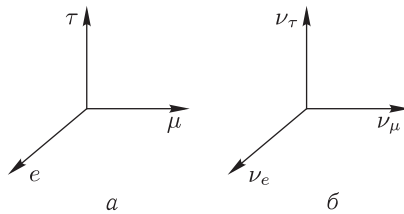


Рис. 28. Орты, соответствующие трем заряженным лептонам (а) и трем нейтрино (б). Слабые лептонные токи отвечают скалярным произведениям ортов (а) и (б). Поскольку соответствующие лептонные орты (а) и (б) параллельны друг другу, имеется всего три отрицательных лептонных тока ($\bar{e}\nu_e$, $\bar{\mu}\nu_\mu$, $\bar{\tau}\nu_\tau$) и три положительных

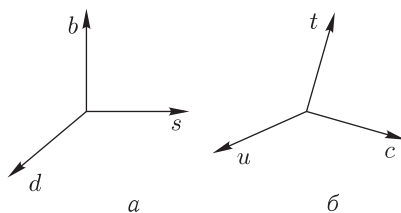


Рис. 29. Орты, соответствующие трем кваркам с зарядами $-1/3$ (а) и трем кваркам с зарядами $+2/3$ (б). Слабые кварковые токи отвечают скалярным произведениям ортов (а) и (б). Поскольку кварковые орты (а) и (б) повернуты друг относительно друга имеется девять отрицательных слабых кварковых токов ($\bar{d}u$, $\bar{s}u$, $\bar{b}u$, $\bar{d}s$, $\bar{s}s$, $\bar{b}s$, $\bar{d}t$, $\bar{s}t$, $\bar{b}t$) и девять положительных

остальным ортам. Поэтому лептонный ток состоит только из трех слагаемых.

Кварковый ток можно представить как сумму скалярных произведений ортов, изображенных на рис. 29, а и б. Как видно из рис. 29, тройка ортов «верхних» кварков (u , c , t) повернута относительно тройки ортов «нижних» кварков (d , s , b). В результате кварковый ток состоит из девяти слагаемых. Но коэффициенты при каждом из этих девяти слагаемых меньше, чем у лептонных токов (соответствующие косинусы меньше единицы). Эти коэффициенты определяют относительную силу различных кварк-кварковых и кварк-лептонных слабых взаимодействий.

Сравнивая между собой вероятности различных слабых процессов, можно найти из опыта значения углов, характеризующих взаимную ориентацию троек ортов, изображенных на рис. 29, а и б. Опыт указывает на то, что эта ориентация примерно такова, как это изображено на рисунке, т.е. u -кварк «предпочитает» переходить в d -кварк, а не в s - и b -кварки; c -кварк предпочитает переходить в s -кварк, т.е. c -орт почти параллелен s -орту. Отсюда сразу же следует, что пока еще не открытый t -кварк*) должен отдавать предпочтение в своих слабых переходах b -кварку: t - и b -орты должны быть практически параллельны.

C-, P-, T-СИММЕТРИИ

Вообще слабое взаимодействие гораздо могущественнее, чем его более сильные собратья — электромагнитное и сильное взаимодействия. Только слабое взаимодействие может менять аро-

*) Об открытии t -кварка см. раздел «20 лет спустя».

маты кварков и лептонов. Только оно может нарушать три так называемые дискретные симметрии:

зарядовую — относительно зарядового сопряжения, т. е. относительно замены всех частиц в некотором процессе на соответствующие античастицы, эту симметрию обозначают C (от английского *charge* — заряд),

зеркальную — относительно зеркального отражения, т. е. относительно замены некоторого процесса зеркально отраженным, эту симметрию обозначают P (от английского *parity* — четность),

временную — относительно обращения времени, т. е. относительно замены некоторого процесса на обратный, эту симметрию обозначают T (от английского *time* — время).

До 1956 г. физики считали эти три симметрии такими же неизбежными, как и однородность и изотропию пространства и однородность времени. Однако некоторые странности в распадах странных мезонов навели на подозрение, что это не так, а специально поставленные опыты вскоре обнаружили, что во всех слабых процессах P - и C -симметрии нарушаются максимально возможным образом.

Чтобы обнаружить это, пришлось осуществить серию экспериментов, в которых измерялась поляризация частиц. Слово поляризация имеет в физике несколько различных смысловых значений. Одно из них — то, которое нам здесь понадобится, — это ориентированность спинов некоторого ансамбля частиц. Если спины ориентированы произвольно, то говорят, что поляризация равна нулю. Если все они направлены одинаковым образом, то говорят, что поляризация равна единице.

Эксперименты, проведенные в 1956–1957 гг. показали, что частицы в слабых процессах рождаются продольно поляризованными. Слово «продольно» в этом контексте означает, что частицы поляризованы вдоль своих импульсов. Согласно установившейся терминологии частица называется правополяризованной, если ее спин направлен по ее импульсу, и левополяризованной, если ее спин направлен против ее импульса.

Экспериментально было обнаружено, что частицы (e^- , ν_e , μ^- , ν_μ) в слабых процессах рождаются левополяризованными, а античастицы (e^+ , $\bar{\nu}_e$, μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$) — правополяризованными*), при-

*) О некоторых исключениях из этой закономерности, обусловленных сохранением углового момента, будет сказано ниже.

чем степень поляризации в обоих случаях равна v/c , где v — скорость частицы, а c — скорость света. (То обстоятельство, что при скорости, стремящейся к нулю, продольная поляризация также стремится к нулю, вполне естественно. Ведь в предельном случае нулевого импульса, продольной поляризации по определению быть не может.)

Обнаружение продольной поляризации частиц означало крушение зеркальной симметрии. Обнаружение того, что для частиц и античастиц поляризация различна, означало крушение зарядовой симметрии. Справедливость последнего утверждения самоочевидна. Что же касается первого, то оно нуждается в пояснении.

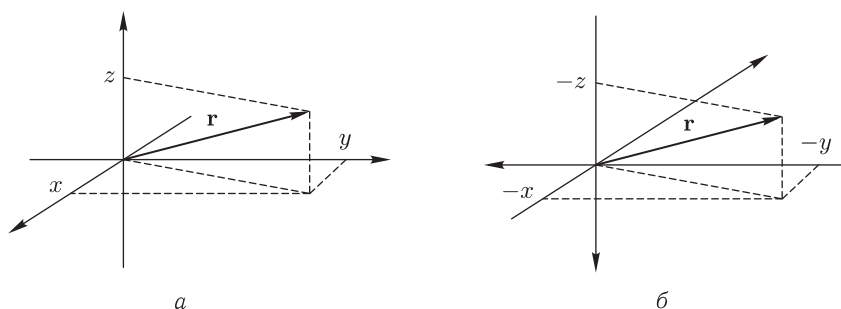


Рис. 30. Компоненты радиус-вектора при переходе от левой системы координат к правой меняют знак

Введем понятие полярного и аксиального векторов. Рассмотрим декартову систему координат и в ней радиус-вектор \mathbf{r} с координатами x, y, z (рис. 30, а). Затем рассмотрим зеркально отраженную систему координат (рис. 30, б). Новые координаты того же радиус-вектора равны теперь $-x, -y, -z$. В таких случаях говорят, что радиус-вектор \mathbf{r} меняет знак при зеркальном отражении координатных осей. Так же ведут себя при зеркальном отражении вектор импульса \mathbf{p} и вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} . Все такие векторы называются полярными векторами.

Рассмотрим теперь векторное произведение двух полярных векторов, например, угловой момент $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$. При зеркальном отражении каждый из сомножителей меняет знак, а их произведение знак не меняет (см. рис. 3). Аналогичным образом не меняют знак вектор, характеризующий собственный угловой момент частицы — спин \mathbf{J} , и вектор напряженности магнитного

поля **Н**. Все такие векторы называются аксиальными векторами или, по-иному, псевдовекторами.

Скалярное произведение двух полярных векторов (или двух аксиальных векторов) не меняет знак при зеркальном отражении. Это — скаляр. Скалярное произведение аксиального и полярного векторов меняет знак при зеркальном отражении. Это — псевдоскаляр. Про скаляр говорят, что он *P*-четен, про псевдоскаляр, что он *P*-нечетен.

Сказанного выше достаточно, чтобы понять, что испускание продольно поляризованных частиц означает нарушение *P*-симметрии, нарушение сохранения *P*-четности. Например, при отражении в зеркале β -распада нейтрона мы увидели бы β -распад, в котором вылетает правополяризованный электрон. А такого в природе быть не может.

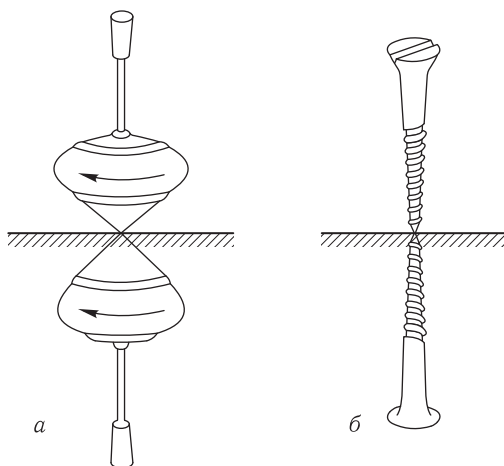


Рис. 31. Вращающаяся юла (а) и винт (б) отличаются от своих зеркальных отражений

Отражение в зеркале продольно поляризованной частицы напоминает отражение в зеркале детской юлы (рис. 31, а) или винта (рис. 31, б). Здесь роль полярного вектора играют оси юлы, и винта. И юла, и винт не совпадают со своими зеркальными отражениями. Но в принципе «зеркальную» юлу изготовить можно. Винты с нестандартным направлением резьбы тоже делают. А вот правополяризованных β -электронов найти нельзя: в природе они все левополяризованы.

Речь идет здесь именно об электронах, испускаемых в β -распаде, а не вообще об электронах. Пропуская пучок электронов через намагниченную вдоль оси пучка железную пластину, можно, меняя знак магнитного поля, получать и левополяризованные, и правополяризованные электроны. В этом случае поляризация электрона создается искусственно, подобно нарезке винта. В случае же β -распада и других слабых процессов продольная поляризация частиц и связанная с ней зеркальная асимметрия не привносятся извне, а являются неотъемлемыми свойствами самих этих процессов.

Открытие несохранения четности было неожиданным, как гром среди ясного неба. Я вспоминаю в связи с этим, как в конце 1954 г, когда я поступил в аспирантуру, мой научный руководитель И. Я. Померанчук поставил задачу — рассчитать угловое распределение электронов при распаде поляризованного мюона и придумать способ, с помощью которого можно было бы получить поляризованные мюоны.

Расчет распада оказался очень громоздким, поскольку в ту пору была неизвестна простая релятивистски-инвариантная техника расчетов процессов с участием поляризованных частиц. Сегодня все выкладки уместились бы на двух страницах, тогда же расчет занял 20 ученических тетрадей. Но в конце концов я получил (и как впоследствии подтвердилось, — правильный) компактный результат.

Пытался я изобрести и метод поляризации мюона в холодном намагниченном веществе. (Мюон живет всего две микросекунды, и надо успеть поляризовать его после того, как он затормозится в веществе, но до того, как распадется.) Однако ничего разумного так и не придумал, а через полтора года выяснилось, что мюоны при распаде π -мезонов (а это основной источник мюонов) рождаются полностью продольно поляризованными!

Поляризация мюонов в распадах

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad \text{и} \quad \pi^- \rightarrow \mu^- \tilde{\nu}_\mu$$

равна соответственно -1 и $+1$ (а не $+v/c$ и $-v/c$, как в большинстве распадов других частиц), поскольку поляризация мюонов в этих распадах вынужденная. Она определяется тем, что спин π -мезона равен нулю, а нейтрино и антинейтрино стопроцентно поляризованы, так как движутся практически со скоростью света. В жестких условиях побеждает быстрееший, и, вопреки своему обычаю, μ^+ вынужден иметь левую поляризацию, а μ^- —

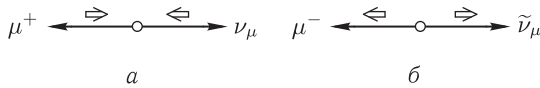


Рис. 32. Ориентация импульсов и спинов μ^+ и ν_μ при распаде π^+ -мезона (а) и μ^- и $\bar{\nu}_\mu$ при распаде π^- -мезона (б). Спины изображены светлыми стрелками

правую (см. рис. 32, где длинными черными стрелками показаны импульсы частиц, а короткими светлыми — их спины).

В настоящее время поляризованные мюоны широко используются в химии и физике твердого тела. Наблюдая за вращением спина мюонов в различных веществах, получают такие сведения о свойствах этих веществ, которые никакими другими способами получить невозможно.

Зеркальная и зарядовая асимметрия слабых распадов заложена в самом виде заряженного слабого тока, в который входят только левые (левоспиральные) компоненты лептонов и кварков и правые (правоспиральные) компоненты антилептонов и антикварков. Этим слабый заряженный ток отличается от электромагнитного и цветового токов, в которые левые и правые компоненты частиц входят симметричным образом.

Электромагнитный и цветовой токи являются четырехмерными векторами. Это означает, что при преобразованиях Лоренца и зеркальных отражениях они преобразуются подобно четырехмерному вектору энергии-импульса $p_\mu = (E/c, \mathbf{p})$ или четырехмерному пространственно-временному вектору $x_\mu = (ct, \mathbf{r})$.

У четырехмерного вектора V_μ четыре компоненты ($\mu = 0, 1, 2, 3$, где индекс 0 — временной, а индексы 1, 2, 3 — пространственные: $V_\mu = V_0, \mathbf{V}$). При P -отражении

$$V_0 \rightarrow +V_0, \quad \mathbf{V} \rightarrow -\mathbf{V}.$$

Таким образом, V_0 представляет собой скаляр в трехмерном пространстве, а \mathbf{V} — трехмерный полярный вектор.

В отличие от электромагнитного и цветовых токов, слабые токи являются линейными комбинациями четырехмерного вектора V_μ и четырехмерного аксиального вектора A_μ .

Четырехмерный аксиальный вектор A_μ ведет себя при лоренцевых преобразованиях так же, как V_μ , но при P -отражении — наоборот:

$$A_0 \rightarrow -A_0, \quad \mathbf{A} \rightarrow +\mathbf{A}.$$

Таким образом, A_0 представляет собой псевдоскаляр в трехмерном пространстве, \mathbf{A} — трехмерный аксиальный вектор. Слабый левоспи-

ральный заряженный ток является разностью токов V_μ и A_μ :

$$L_\mu = \frac{1}{2} (V_\mu - A_\mu).$$

Легко видеть, что при зеркальном отражении компоненты L_μ не переходят сами в себя, а переходят в компоненты правоспирального тока:

$$R_\mu = \frac{1}{2} (V_\mu + A_\mu).$$

Это похоже на то, как при отражении в зеркале правая и левая руки меняются местами. Очевидно, что при P -отражении

$$L_0 \leftrightarrow R_0, \quad \mathbf{L} \leftrightarrow -\mathbf{R}.$$

До 1964 г. существовала надежда, что, хотя и зеркальная, и зарядовая симметрии полностью нарушаются в слабых процессах, их комбинация — CP -симметрия — не нарушена. Так что, глядя в зеркало на β -распад нейтрона, мы должны были бы видеть β -распад антинейтрона. Однако, в 1964 г. был обнаружен распад так называемого долгоживущего нейтрального K -мезона *) на два π -мезона:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-.$$

Этот распад запрещен, если имеет место CP -симметрия. В дальнейшем был найден и другой CP -запрещенный распад

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0,$$

а также была обнаружена небольшая зарядовая асимметрия в распадах

$$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu \quad \text{и} \quad K_L^0 \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu.$$

В последнем случае вероятность распадов с испусканием положительных лептонов (e^+ , μ^+) оказалась примерно на 0,3% больше, чем распадов с испусканием отрицательных лептонов (e^- , μ^-).

В распадах все тех же K_L^0 -мезонов было установлено, что нарушается и T -симметрия. Ни в каких других процессах, кроме

*) Существуют два типа нейтральных K -мезонов. Короткоживущий нейтральный K -мезон K_S^0 живет примерно 10^{-10} с, долгоживущий K_L^0 — примерно $5 \cdot 10^{-8}$ с. Основными распадами K_S^0 являются распады на $\pi^+ \pi^-$ и $\pi^0 \pi^0$. Основными распадами K_L^0 -мезона — распады на $\pi^0 \pi^0 \pi^0$, $\pi^+ \pi^- \pi^0$, $\pi^\pm e^\mp \nu$, $\pi^\pm \mu^\mp \nu$.

как в распадах K_L^0 -мезонов, нарушение CP -симметрии и T -симметрии пока что не обнаружено *). Природа этого нарушения, его механизм остаются пока неясными, хотя предложен ряд теоретических моделей, с помощью которых пытаются объяснить это явление.

Единственной не нарушенной дискретной симметрией осталась в настоящее время CPT -симметрия — симметрия относительно произведения всех трех преобразований C , P и T . Эта симметрия настолько глубоко заложена в основах современной теории поля, что физики-теоретики в большинстве своем убеждены в ее абсолютной незыблемости. Заметим, что одной только CPT -симметрии достаточно для того, чтобы были равны друг другу массы частицы и античастицы, а также их времена жизни.

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ТОКИ

До сих пор, говоря о слабых процессах, мы все время имели в виду взаимодействия заряженных слабых токов. В 1973 г. был открыт новый тип слабых процессов, а именно — процессы, обусловленные взаимодействием нейтральных токов.

Нейтральными называют токи, не меняющие электрические заряды участвующих в них лептонов и кварков, например, $\bar{\nu}_\mu \nu_\mu$, $\bar{e}e$, $\bar{u}u$, $\bar{d}d$ и т. д. Но наблюдаемые на опыте нейтральные токи истинно нейтральны: они не меняют не только заряды, но и другие квантовые числа частиц, они, как говорят, диагональны, т. е. переводят лептон или кварк в самих себя. Недиagonalных нейтральных токов типа $\bar{d}s$ или $\bar{e}\mu$, или $\bar{u}c$ в природе нет.

Диагональность нейтральных токов легко понять, глядя на рис. 28 и 29. В силу сохранения электрического заряда нейтральные токи не могут переводить друг в друга частицы из разных троек. А в пределах каждой отдельной тройки орты частицы ортогональны друг другу. Так что каждая из двенадцати частиц может перейти лишь сама в себя (с учетом цвета их уже, разумеется, не 12, а 24).

Именно потому, что нейтральные токи не меняют ароматов частиц, их нашли так поздно — лишь через три четверти века после открытия β -распада. Не умея превращать фундаментальные фермионы друг в друга, нейтральные токи не могут проявиться

*) Нарушения CP обнаружены также в распадах B -мезонов, см. раздел «20 лет спустя»

в таких распадах частиц, где меняется аромат лептонов или кварков. А в распадах с сохранением аромата слабое взаимодействие нейтральных токов не может конкурировать с электромагнитным взаимодействием, поскольку последнее существенно более интенсивное.

Впервые нейтральные токи наблюдали в 1970-х годах в нейтринных экспериментах на больших ускорителях, где энергичные пучки нейтрино, проходя через мишень, давали реакции типа

$$\nu_{\mu} + p \rightarrow \nu_{\mu} + p + \pi^{+} + \pi^{-}.$$

Подобные реакции являются результатом встряски нуклона при взаимодействии нейтрино с одним из кварков: $(\bar{\nu}_{\mu}\nu_{\mu})(\bar{u}u)$ или $(\bar{\nu}_{\mu}\nu_{\mu})(\bar{d}d)$. Вероятности этих реакций оказались примерно такими же, как и вероятности аналогичных реакций, идущих под действием заряженных токов, например, реакции

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p + \pi^{+} + \pi^{-}.$$

Так же как и заряженные токи, нейтральные токи обнаружили нарушение зеркальной симметрии. Именно по нарушению этой симметрии был открыт в 1978 г нейтральный электронный ток $\bar{e}e$. Найти ток $\bar{e}e$ было гораздо сложнее, чем найти нейтральный нейтринный ток. Ведь эффекты слабого электронного тока надо было искать на фоне гораздо более сильного — электромагнитного взаимодействия электрона.

Сначала было найдено исключительно слабое вращение плоскости поляризации лазерного луча в парах атомарного висмута. Вращение это — явно P -нечетное, поскольку при полной зеркальной симметрии атомов висмута ни правое, ни левое направления вращения ничем не выделены и плоскость поляризации луча сохраняла бы свое положение подобно «буриданову ослу».

Вращение плоскости поляризации света в растворах, содержащих зеркально асимметричные молекулы, это — хорошо известное явление. Поворот плоскости поляризации можно наблюдать, например, пропуская поляризованный свет через стакан сладкого чая. Ни о каком нарушении четности на уровне фундаментальных взаимодействий этот школьный опыт, разумеется, не свидетельствует. Он свидетельствует только о том, что молекулы сахара зеркально асимметричны.

Зеркальные двойники молекул сахара могут быть созданы искусственно, но сахарная свекла отказывается их синтезировать. Здесь мы сталкиваемся с частным случаем замечательного яв-

ления — все живое зеркально асимметрично. Обсуждение этого явления — очень интересная тема. Но она увела бы нас очень далеко.

Вернемся к атомарному висмуту. Здесь «вся соль» в том, что речь идет об атоме, а не о молекуле. Если бы P -четность сохранялась, атом висмута должен был бы быть зеркально симметричен. Небольшая «закрученность» атома висмута вызвана слабым P -нечетным взаимодействием атомарных электронов с ядром (При нарушении P -четности и с той точностью, с какой имеет место CP -симметрия, зеркальным двойником атома висмута является антиатом антивисмута. Делать такие тяжелые антиатомы мы пока не умеем, да и не видно, зачем это могло бы быть полезно.)

Вскоре после сообщения о результатах эксперимента на висмуте стали известны результаты другого эксперимента, на этот раз выполненного на электронном ускорителе. В этом эксперименте наблюдали взаимодействие пучка продольно поляризованных электронов с дейтериевой мишенью. Оказалось, что левополяризованные электроны рассеиваются на дейтерии примерно на одну сотую процента более эффективно, чем правополяризованные. Это явление, как легко понять, тоже свидетельствует о нарушении зеркальной симметрии во взаимодействии электронов с кварками. Эффект, как показывают расчеты, согласуется с тем предположением, что ответственно за него именно слабое взаимодействие нейтральных токов.

В 1982 г. проявления нейтральных токов наблюдали также и в реакциях $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$, идущих на встречных электрон-позитронных пучках.

В согласии с теорией, нейтральные токи имеются у всех лептонов и кварков. У всех нейтрино нейтральные токи такие же левоспиральные, как и заряженные токи. У других частиц нейтральные токи содержат как левоспиральную (L_μ), так и правоспиральную (R_μ) компоненты.

ПРЕДСКАЗАННЫЕ W - И Z -БОЗОНЫ

Теория взаимодействия векторных бозонов с нейтральными и заряженными токами, которую сейчас называют стандартной теорией электрослабого взаимодействия (о смысле этого термина будет сказано ниже), была создана в 60-е годы. В 1979 г. основные ее создатели — физики-теоретики Ш. Глэшоу, А. Салам

и С. Вайнберг были удостоены высшей международной научной награды — Нобелевской премии. Заметим, что присуждение премии произошло за четыре года до того, как были открыты W - и Z -бозоны, т.е. до того, как справедливость теории была окончательно подтверждена опытом. Дело в том, что очень внушительным подтверждением правильности теории явилось открытие в 1973 г. нейтральных токов и экспериментальные данные об их структуре, полученные в последующие годы.

Согласно стандартной теории все взаимодействия между заряженными токами осуществляются путем обмена W -бозонами, а между нейтральными — путем обмена Z -бозонами. Подобно фотону и глюонам, эти бозоны являются векторными: их спин равен единице.

Константа взаимодействия W -бозонов с заряженным током, g_W , играет роль, аналогичную той, которую в электродинамике играет электрический заряд e . Подобно постоянной тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c$, можно ввести величину $\alpha_W = g_W^2/\hbar c$. Отношение α/α_W получило специальное обозначение:

$$\alpha/\alpha_W = \sin^2 \theta_W,$$

где θ_W — так называемый электрослабый угол, или угол Вайнберга. Экспериментальное изучение нейтральных слабых токов позволило определить (см. ниже), что $\sin^2 \theta_W = 0,20 \div 0,23$. Таким образом, $\alpha_W \approx 1/30$. Заметьте, что слабый заряд g_W оказался больше, чем электрический заряд e . То обстоятельство, что слабые взаимодействия, как правило, гораздо слабее электромагнитных, связано не с малостью слабого заряда, а с тем, что W -бозоны очень тяжелые.

Зная α_W , можно сразу же выразить массу W -бозона через α_W и константу Ферми G_F (вспомним, что $G_F \approx 1,2 \times 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2} \hbar^3 c^3$). Рассмотрим, например, распад мюона (рис.33). Импульс q (деленный на скорость света c), переносимый виртуальным W -бозоном в этом процессе, не больше массы мюона и потому на много порядков меньше, чем масса W -бозона. Пропагатор, описывающий распространение виртуального векторного бозона, имеет вид такой же, как у «массивного фотона» (о котором речь шла выше в разделе «Виртуальные частицы»):

$$\frac{1}{m_W^2 - q^2}.$$

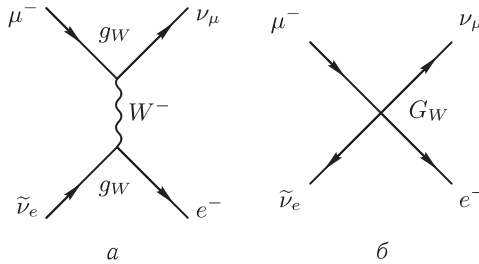


Рис. 33. Фейнмановская диаграмма, описывающая распад мюона, происходящий путем рождения и распада виртуального W -бозона (а). Та же диаграмма — в приближении четырехфермионного взаимодействия (б); g_W — слабый заряд, G_F — константа Ферми

При $q^2 \ll m_W^2$ можно пренебречь значением q^2 по сравнению с m_W^2 , и записать

$$\frac{1}{m_W^2 - q^2} \approx \frac{1}{m_W^2}.$$

Для виртуального W -бозона в распаде мюона это приближенное равенство справедливо с точностью, превышающей 10^{-6} . Именно с такой точностью можно заменить «истинную» диаграмму рис. 33, а на приближенную диаграмму рис. 33, б, изображающую четырехфермионное взаимодействие.

Возможно, здесь Вам поможет следующее сравнение. Виртуальную частицу можно уподобить пружине. Рассмотрим, например, виртуальный фотон. Он описывается пропагатором $-1/q^2$. Если q^2 велико, то «фотонная пружина» короткая, если q^2 мало, то она длинная: в силу соотношения неопределенности ее длина $l \approx \hbar/q$. У тяжелого виртуального W -бозона «пружина» всегда короткая ($l \lesssim \hbar/m_W c \approx 2 \cdot 10^{-16}$ см) и жесткая. Пока импульс, передаваемый пружине, мал, она практически не сжимается (не чувствует его) и действует как твердое тело. Именно этому предельному случаю отвечает пренебрежение значением q^2 в пропагаторе. Приведенные здесь соображения согласуются с соотношением неопределенности и с формулой для потенциала, обусловленного обменом тяжелым виртуальным фотоном (см. раздел «Виртуальные частицы»).

Итак, попробуем определить массу W -бозона. Глядя на диаграммы рис. 33, можно установить, что

$$2\sqrt{2} G_F = 4\pi\hbar^2 c^2 \frac{(g_W/\sqrt{2})^2}{m_W^2}.$$

Буквенное соотношение между G_F , g_W и m_W ясно из сопоставления диаграмм 33, *a* и *б*. Что касается числовых коэффициентов, то их Вы легко воспроизведете, когда и если станете физиком-теоретиком.

Предыдущее равенство можно переписать в виде

$$m_W = \left(\frac{\sqrt{2} G_F}{\pi \alpha_W \hbar^3 c^3} \right)^{-1/2} \approx \frac{37,3 \text{ ГэВ}}{\sin \theta_W}.$$

(Проверьте последнее равенство.) Отсюда при $\sin^2 \theta_W = 0,21$ получаем: $m_W = 81,4 \text{ ГэВ}$.

Таким образом, зная экспериментальное значение $\sin^2 \theta_W$ можно было предсказать массу W -бозона!

Сведения о значении $\sin^2 \theta_W$ были получены путем изучения нейтральных токов. Дело в том, что согласно стандартной теории электрослабый угол θ_W характеризует взаимодействие не только W -бозонов, но и Z -бозонов. В последнем случае он входит в выражения для трех физических величин:

1) массы Z -бозона

$$m_Z = m_W / \cos \theta_W$$

(при $m_W = 81,4 \text{ ГэВ}$ отсюда следует, что $m_Z = 91,6 \text{ ГэВ}$);

2) константы взаимодействия Z -бозона с нейтральным током

$$g_Z = g_W / \cos \theta_W;$$

3) самого нейтрального тока, который для частицы с электрическим зарядом Q имеет вид

$$\pm \frac{1}{2} L_\mu - (L_\mu + R_\mu) Q \sin^2 \theta_W.$$

Здесь L_μ и R_μ — лево- и правоспиральные токи; знак плюс в первом слагаемом отвечает «верхним» лептонам и кваркам (ν_e , ν_μ , ν_τ , u , c , t), а знак минус — «нижним» (e^- , μ^- , τ^- , d , s , b).

Из выражений для m_Z и g_Z сразу же следует, что $g_Z^2/m_Z^2 = g_W^2/m_W^2$ и что константа четырехфермионного взаимодействия для нейтральных токов такая же, как для заряженных. Таким образом, вся зависимость от $\sin^2 \theta_W$ вероятностей процессов с нейтральными токами определяется только что приведенным выражением для нейтрального тока. Из этого выражения видно, что для частиц с различными зарядами степень продольной поляризации, т. е. соотношение между левой и правой компо-

нентами тока, различна и однозначно определяется значением $\sin^2 \theta_W$. Опыт показал, что нейтральные токи нейтрино ($Q_\nu = 0$), электронов и мюонов ($Q_e = Q_\mu = -1$) и кварков ($Q_u = +2/3$, $Q_d = -1/3$) описываются приведенным выше выражением для нейтрального тока при значении $\sin^2 \theta_W \approx 0,21$.

В качестве примера на рис. 34 изображена диаграмма, описывающая рассеяние мюонного нейтрино на электроном путем обмена между ними виртуальным Z -бозоном. Измеряя сечение этого процесса, можно найти значение $\sin^2 \theta_W$. Как уже говорилось, всесторонней проверке стандартная теория подверглась в экспериментах по изучению этого и других слабых процессов (некоторые из них изображены на рис. 35).

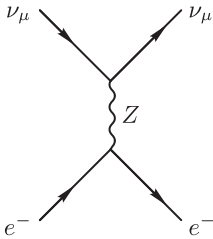


Рис. 34. Фейнмановская диаграмма, описывающая рассеяние мюонного нейтрино электроном путем обмена между ними виртуальным Z -бозоном

Стандартная теория электрослабого взаимодействия основана на так называемой электрослабой симметрии, которой отвечают четыре безмассовых векторных бозона: два заряженных и два нейтральных.

Отличие, скажем, от цветовой симметрии, электрослабая симметрия в природе нарушена. В результате этого нарушения остается лишь один безмассовый векторный бозон — фотон. Три остальных бозона: W^+ , W^- и Z^0 — приобретают массы.

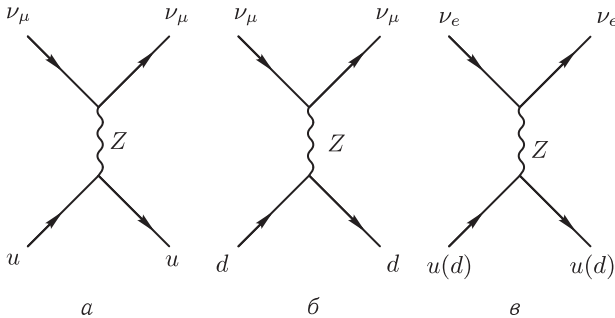


Рис. 35. Рассеяние на u - и d -кварках мюонного нейтрино (а и б) и электронного нейтрино (в)

Теория получила название электрослабой потому, что она описывает не только слабое, но и электромагнитное взаимодействие. (Напомним, что $\sin \theta_W = e/g_W$.) К сожалению, существующая электрослабая теория не до конца объединила

электромагнитное и слабое взаимодействия, поскольку величина электрослабого угла θ_W берется из опыта, а не предсказывается в рамках этой теории на основе каких-то общих принципов.

ОТКРЫТИЕ W - И Z -БОЗОНОВ

Для рождения таких тяжелых частиц, как W - и Z -бозоны, необходима столь высокая энергия сталкивающихся частиц, какой до начала 80-х годов не обладала ни одна лаборатория в мире. И это несмотря на то, что в двух лабораториях — Фермиевской ускорительной лаборатории (ФНАЛ) и в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) — имелись пучки частиц с энергией, в 5–6 раз превышающей массу промежуточных бозонов. Дело в том, что эти пучки направлялись на неподвижные мишени, а при этом энергия, которая может идти на рождение новых частиц, составляет лишь малую долю ($\sqrt{2mc^2/E}$, где m — масса нуклона) от энергии E частиц в пучке. Было ясно, что для рождения промежуточных бозонов нужны столкновения встречных пучков.

В 1976 г. Д. Клайн, П. МакИнтайр и К. Руббиа предложили построить на базе протонных ускорителей ФНАЛ и ЦЕРН протон-антипротонные коллайдеры. В 1978 г. в ЦЕРН было принято решение о таком строительстве, а в 1981 г. коллайдер, в котором протоны с энергией 270 ГэВ сталкиваются с антипротонами той же энергии, начал работать. Вначале интенсивность коллайдера была недостаточной для рождения промежуточных бозонов (протоны и антипротоны сталкивались очень редко). Но осенью 1982 г. она достигла необходимой величины, и в январе 1983 г. руководитель одного из экспериментов на коллайдере (этот эксперимент известен под названием UA1) — К. Руббиа сообщил о наблюдении первых W -бозонов.

Как происходит рождение промежуточных бозонов? Быстрый протон можно представить себе как пучок составляющих его частиц — кварков и глюонов. Примерно половину импульса быстрого протона несут кварки, половину — глюоны. Аналогичным образом быстрый антипротон — это пучок антикварков и глюонов. При столкновении протона и антипротона один из кварков q и один из антикварков \bar{q} могут превратиться в промежуточный бозон (рис. 36). Всего возможно четыре таких кварк-антикварковых реакции; они изображены на рис. 37. При этом осталь-

ные кварки, антикварки и глюоны в рождении промежуточных бозонов активного участия не принимают — они играют роль наблюдателей. Однако, лишившись своих спутников, претерпевших лобовое столкновение, эти наблюдатели «испытывают глубокое потрясение» и рассыпаются или, как говорят, фрагментируют в адроны. При этом образуются две адронные струи, одна из которых продолжает путь исходного протона, а другая — антипротона. Такое столкновение изображено на рис. 38, где прямые линии изображают кварки и антикварки, а волнистая линия — это W - (или Z -) бозон; глюоны на рисунке не показаны.

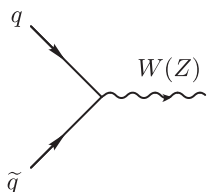


Рис. 36. Рождение промежуточного бозона при столкновении кварка и антикварка

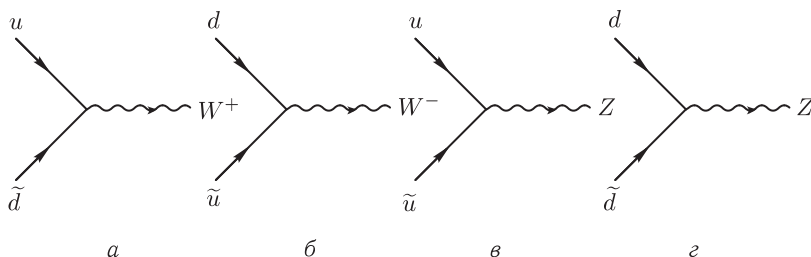


Рис. 37. Рождение W^+ -бозона (а), W^- -бозона (б) и Z -бозона (в, г) при столкновениях кварка и антикварка

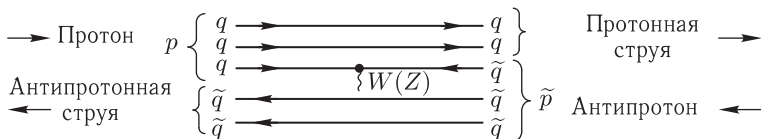


Рис. 38. Рождение промежуточного бозона (W или Z) при столкновении протона и антипротона. Оставшиеся кварки и антикварки дают две адронные струи

Обратите внимание, что на рис. 38 линия, изображающая промежуточный бозон, очень короткая. Так я попытался отразить то обстоятельство, что, согласно стандартной теории, промежуточный бозон живет всего $3 \cdot 10^{-25}$ с и не успевает за это время даже выбраться из толпы кварков и антикварков — свидетелей его рождения. Но как же в таком случае можно узнать, что промежуточный бозон вообще рождался? Ответ на

этот вопрос заключается в том, что, погибая, промежуточный бозон иногда посылает очень яркий сигнал.

В большинстве случаев промежуточные бозоны должны распадаться на кварк и антикварк, которые затем превращаются в две струи адронов. К сожалению, отличить эти струи от адронов, родившихся в столкновении за счет сильных взаимодействий, очень трудно. Зато распады W - и Z -бозонов на лептоны практически не заглушаются никаким фоном. Речь идет, в частности, о распадах

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e, \quad W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e, \quad Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

в тех случаях, когда электроны и позитроны вылетают под большими углами по отношению к сталкивающимся пучкам p и \bar{p} .

Экспериментальные установки, в которых наблюдались W - и Z -бозоны, уникальны. Они сочетают гигантские размеры с ювелирной точностью. На рис. 39, 40 и 41 схематически изображена установка UA1. На рис. 39 показан вид сбоку, вдоль пучка протонов, на рис. 40 — вид спереди: протоны влетают по оси установки слева, антипротоны — справа. На рис. 41 установка частично разобрана, так что виден цилиндрический центральный детектор, помещенный в магнитное поле 0,7 Тл, создаваемое магнитом, масса которого 8 тыс. тонн. Внутренний объем магнита равен 80 м³, из которых 25 м³ занимает центральный детектор длиной 5,8 м и диаметром 2,3 м.

Центральный детектор представляет собой так называемую дрейфовую камеру, заполненную газовой смесью аргона и этана, в которой имеется 6000 тончайших проволочек, регистрирующих электроны, выбиваемые из атомов газовой смеси ионизирующими частицами. Эти проволочки образуют плоскости, расстояние между которыми составляет 18 см. Еще 17000 проволочек создают электрическое поле, в котором электроны дрейфуют со скоростью 5,3 см/мкс. Так что максимальное время дрейфа электрона равно 3,6 мкс. Это время меньше, чем интервал (3,8 мкс) между последовательными столкновениями сгустков протонов и антипротонов в вакуумной трубке коллайдера, проходящей вдоль оси цилиндра. Сигналы регистрирующих проволочек считываются быстрой электроникой, и компьютер, восстанавливая траектории частиц, определяет их импульсы. Центральный детектор окружен электромагнитным калориметром, в котором поглощаются электроны, позитроны и фотоны и который измеряет энергию этих частиц. (Электромагнитный калориметр состоит из чере-

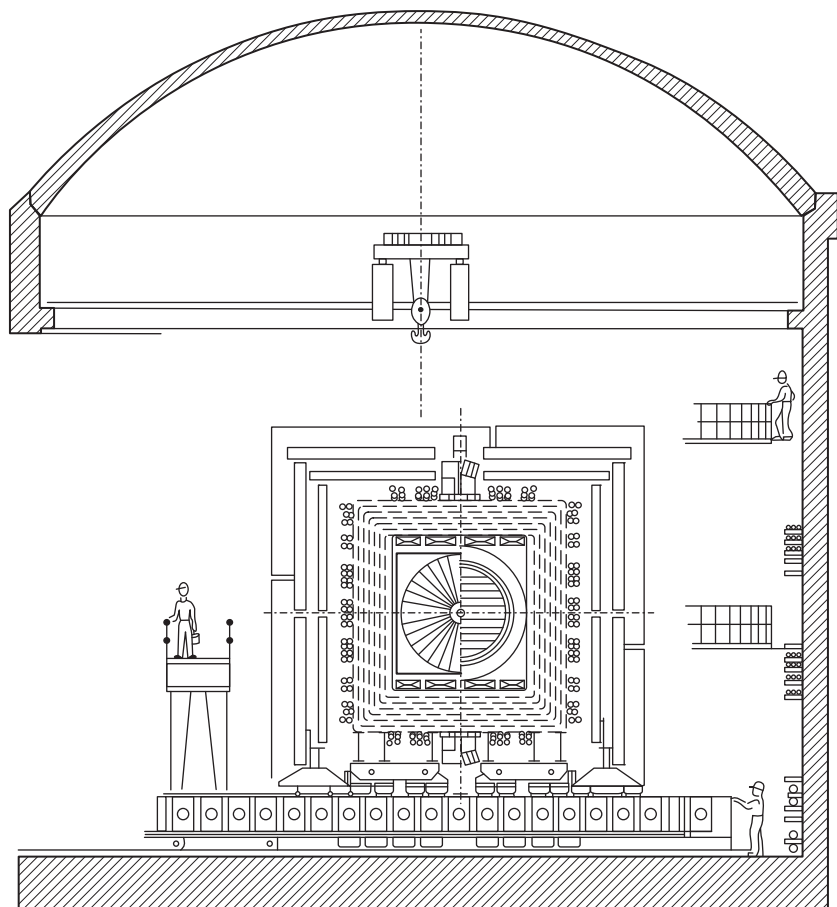


Рис. 39. Схематический вид установки UA1 сбоку, вдоль пучка протонов

дующихся слоев сцинтиллятора и свинца. О том, что калориметр измеряет полную энергию частиц, можно догадаться по самому слову «калориметр».)

Энергичные адроны проходят через электромагнитный калориметр, практически не теряя в нем энергии. Они останавливаются в адронном калориметре, которым служит ярмо магнита, прослоенное сцинтилляторами. Адронный калориметр измеряет энергию адронов.

Наконец, снаружи всю установку окружают 50 пластин дрейфовых камер (размером 4×6 м каждая), предназначенных для регистрации мюонов.

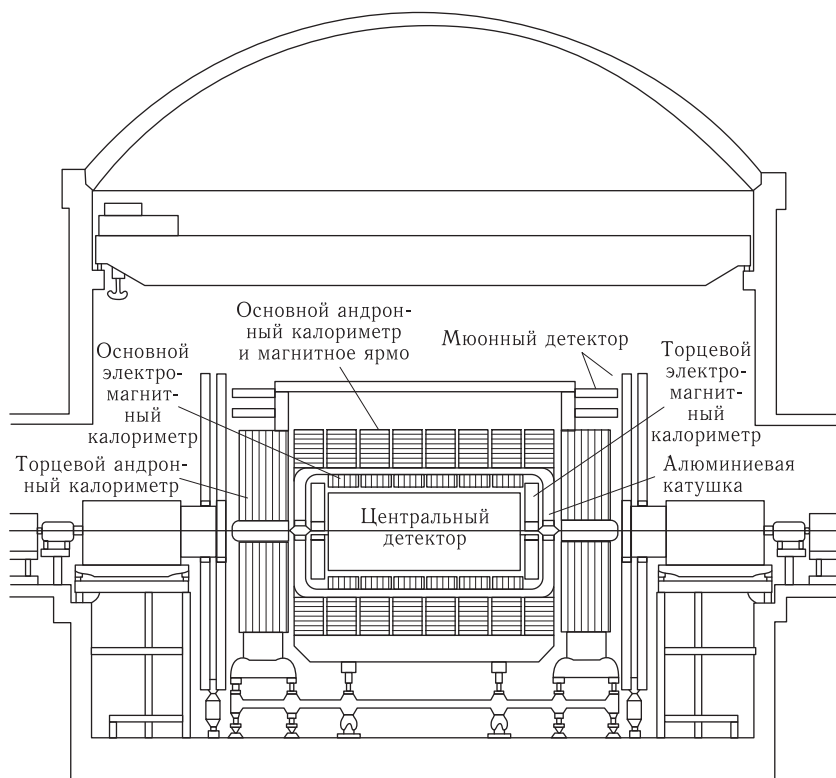


Рис. 40. Схематический вид установки UA1 спереди

Для установки UA1 оборудованы две вертикальные шахты диаметром 20 м каждая. Через одну из них горизонтально проходят пучки коллайдера, а другая служит «гаражом» для установки, когда коллайдер не работает. Вся установка UA1 имеет массу 2 тыс. тонн и передвигается из одной шахты в другую по рельсам.

Другая установка, UA2, предназначенная для детектирования промежуточных бозонов, не имеет большого магнита: она меньше и легче, чем UA1, и передвигается на воздушной подушке в экспериментальном зале, расположенном на глубине 50 м под поверхностью Земли. (Буквы UA означают Underground Area. Всего в 1981–1983 гг. проведено шесть экспериментов на $p\bar{p}$ -коллайдере ЦЕРН, от UA1 до UA6.)

О масштабах описываемых экспериментов свидетельствует то, что у статей, опубликованных по результатам UA1, 137 авторов.

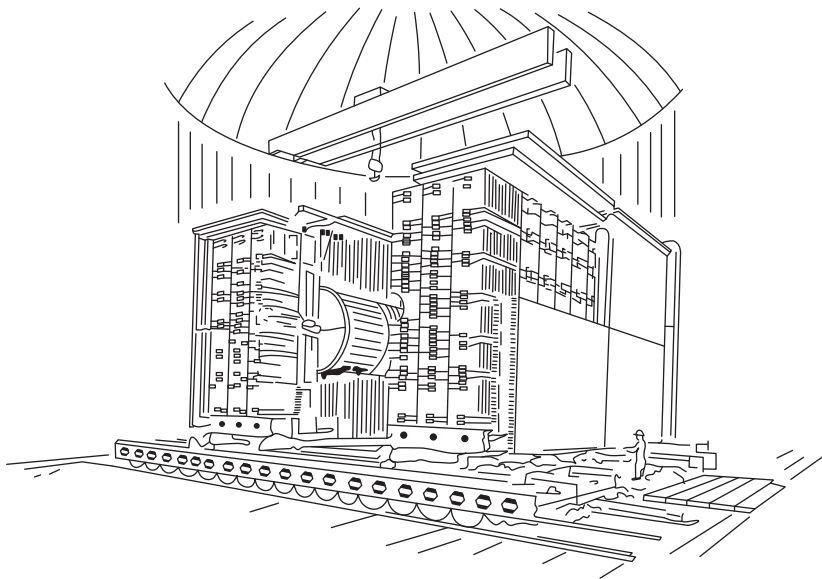


Рис. 41. Аксонометрическое изображение установки UA1 в нерабочем состоянии, когда передняя и задняя части магнита раздвинуты

Основная трудность в поисках промежуточных бозонов связана с тем, что вероятности их рождения очень малы. Так, доля процесса

$$p\bar{p} \rightarrow W + \text{адроны} \\ \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad e^{\pm}\nu$$

составляет примерно 10^{-8} , а доля процесса

$$p\bar{p} \rightarrow Z + \text{адроны} \\ \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad e^+e^-$$

составляет примерно 10^{-9} полного числа процессов, идущих при столкновении протона с антипротоном. Так что иголку промежуточного бозона надо отыскать в стог, содержащем миллиарды событий сильного взаимодействия, в каждом из которых рождаются десятки частиц. Эти большие числа наталкивают и на другое сравнение: отыскать нужного человека среди пяти миллиардов жителей Земли. Из миллиарда $p\bar{p}$ -столкновений, происшедших в установке UA1 в течение 30-дневного сеанса в ноябре–декабре 1982 г., быстрая электроника отбросила как неинтересные 999 млн и отправила в компьютер лишь миллион

событий — тех, в которых были частицы с большой поперечной энергией, т.е. частицы с большой энергией, летящие на большие углы. Среди этих событий электроника отметила около тысячи событий, содержащих электрон с поперечной энергией, превышающей 15 ГэВ. Из этой тысячи событий физики, путем всестороннего анализа отобрали шесть кандидатов в W -бозоны.

Как уже было сказано, характерным признаком W -бозона является электрон с большой поперечной энергией. При распаде покоящегося W -бозона с массой около 80 ГэВ электрон и нейтрино делят W -наследство пополам, так что каждый из них имеет кинетическую энергию около 40 ГэВ. Если электрон с энергией порядка 40 ГэВ вылетит под углом $(90 \pm 30)^\circ$ по отношению к оси установки, то его поперечная энергия будет превышать 30 ГэВ. Четыре из шести W -кандидатов удовлетворяли этому критерию.

Другим характерным признаком распада $W \rightarrow e\nu_e$ является нейтрино. В силу закона сохранения импульса поперечный импульс нейтрино должен быть равен по величине и противоположен по направлению поперечному импульсу электрона (поскольку малым поперечным импульсом распадающегося W -бозона можно пренебречь). Нейтрино является очень проникающей частицей. Для нейтрино с энергией 40 ГэВ длина пробега в железе превышает миллион километров, так что из установки UA1 нейтрино исчезает бесследно. Эта бесследность и является главной уликой, по которой определяют участие нейтрино. Ведь все остальные частицы либо останавливаются в установке (электроны, фотоны, адроны), либо, по крайней мере, оставляют в ней след (мюон). Итак, свидетельством вылета нейтрино с большим поперечным импульсом является кажущееся нарушение сохранения поперечного импульса как раз на величину поперечного импульса нейтрино. У четырех упомянутых выше W -кандидатов значение недостающего поперечного импульса находилось в интервале от 30 до 40 ГэВ!

Вскоре после сообщения группы UA1, сообщила о наблюдении первых W -бозонных событий и группа UA2.

В апреле–июне 1983 г. состоялся еще один сеанс работы коллайдера, во время которого суммарная статистика W -бозонных событий приблизилась к сотне, и было обнаружено около десяти случаев электронно-позитронных распадов Z -бозонов. Массы W - и Z -бозонов оказались на опыте несколько большими 80

и 90 ГэВ соответственно. Сечения рождения бозонов и угловые распределения продуктов распада, найденные на опыте, также находятся в согласии с предсказаниями стандартной теории.

Открытие W - и Z -бозонов — это триумф теории, ставший возможным только благодаря высочайшему искусству физиков-ускорительщиков и физиков-экспериментаторов. В научно-популярной брошюре, изданной в 1981 г. информационным отделом ЦЕРН и озаглавленной «Антипротонный проект ЦЕРН», история этого проекта открывается следующими строками:

«1967 г. В Институте ядерной физики в Новосибирске, СССР, изобретен метод электронного охлаждения, предназначенный для получения интенсивных антипротонных пучков в целях исследования физических явлений при столкновениях протон-антипротонных пучков при энергии 25 ГэВ,

1968 г. В ЦЕРН изобретен метод стохастического охлаждения...»

«Отцом» электронного охлаждения был советский академик Г. И. Будкер (1918–1977). Стохастическое охлаждение было изобретено голландским физиком С. Ван дер Меером. Не разъясняя здесь сути этих методов, отметим только, что без охлаждения антипротонов $p\bar{p}$ -коллайдер сделать нельзя. Не удивительно поэтому, что Нобелевская премия за открытие промежуточных бозонов была присуждена осенью 1984 г. физику-экспериментатору К. Руббиа и физику-ускорительщику С. Ван дер Мееру. Как Вы помните, физики-теоретики получили Нобелевскую премию за промежуточные бозоны еще в 1979 г., так сказать, авансом. Пожалуй, ни в одном другом фундаментальном физическом открытии не сливались столь гармонично усилия такого большого числа ученых и инженеров различных специальностей.

Поучительно сравнить открытие Z -бозона с открытием в начале прошлого века его ближайшего родственника — фотона. Мы купаемся в океане света, фотоны буквально «бросаются в глаза». Основная трудность в открытии фотонов заключалась не в том, чтобы создать их, а в том, чтобы различить в этом фотонном океане отдельные частицы — кванты. Для Z -бозонов счет с самого начала идет на штуки. Здесь основная трудность связана с созданием этих частиц. А в основе этого различия лежит то, что фотон безмассов, а Z -бозон очень тяжелый. Если бы Z -бозон был тоже безмассов, его было бы легче наблюдать, чем фотон: ведь заряд g_Z больше, чем электрический заряд e .

В ближайшие годы исследование W - и Z -бозонов продолжится на $p\bar{p}$ -коллайдере ЦЕРН. В 1987 г. к нему присоединится тэватрон — $p\bar{p}$ -коллайдер Фермиевской лаборатории, в котором энергии протонов и антипротонов должны равняться $1 \text{ ТэВ} = 1000 \text{ ГэВ}$.

Затем должны начать работу « Z -бозонные фабрики» — электронные коллайдеры СЛК (1986 г.) и ЛЭП (1988 г.). Первый из них строится на основе Стенфордского линейного ускорителя. Электроны и позитроны будут ускоряться в нем синхронно и встречаться в вершине «ракетки» (рис. 42). Второй коллайдер — кольцевой с окружностью кольца 27 км — строится в ЦЕРН. Он будет производить на свет 20–30 Z -бозонов в минуту. В обоих коллайдерах энергия электронов и позитронов будет подбираться таким образом (примерно по 46 ГэВ у каждой частицы), чтобы e^+ и e^- , сталкиваясь, рождали Z -бозон резонансным образом*).

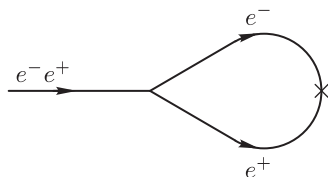


Рис. 42. Схема станфордского линейного коллайдера

Под стать гигантским размерам ЛЭП и масштабы подготавливаемых для него четырех экспериментальных установок. Упомянем здесь только об одной из них — установке ЛЗ (кстати, в ее создании принимают участие и московские физики). Вся эта установка будет помещаться в большом железном электромагните массой 6 тыс. тонн с внешними размерами $16 \times 16 \times 16 \text{ м}$ и внутренним объемом $12 \times 12 \times 12 \text{ м}$. В этом объеме будет установлен 300-тонный адронный калориметр из урана, внутри которого будет помещен 10-тонный электромагнитный калориметр из 12 тыс. сцинтиллирующих монокристаллов $\text{BGO} (\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12})$.

ФИЗИКА НА КОЛЛАЙДЕРАХ ПОСЛЕ Z

После открытия Z -бозонов задачей номер один для физики высоких энергий являются поиск, открытие и исследование скалярных бозонов — фундаментальных частиц со спином, равным нулю. Эти частицы названы хиггсовыми бозонами по имени английского физика-теоретика П. Хиггса.

*) О результатах работы ЛЭП и СЛК см. в разделе «20 лет спустя».

В современной теоретической физике хиггсовы бозоны — или, как их еще называют, хиггсы — играют очень важную роль, вернее сказать, несколько ролей. Во-первых, они дают массы лептонам, кваркам и промежуточным бозонам. Во-вторых, они ответственны за «перекос» верхних кварков относительно нижних и существование девяти (а не трех) заряженных кварковых токов. В-третьих, некоторые теоретики связывают с ними нарушение CP -симметрии и, возможно, P -симметрии в слабых процессах. К сожалению, объяснить «на пальцах», как хиггсовы бозоны умудряются все это сделать, очень трудно. Для этого нужна отдельная книга, которую, несомненно, напишут после того, как эти частицы будут открыты.

Теория хиггсовых бозонов находится пока не в таком хорошем положении, в каком находилась теория промежуточных W - и Z -бозонов пятнадцать лет назад. В ней еще много произвола (свободных параметров) и, что самое главное, нет четких предсказаний относительно того, какова масса (или массы) этих частиц. Нижний предел лежит вблизи 10 ГэВ, верхний — около 1000 ГэВ.

Если хиггсовы бозоны легкие, то их, может быть, откроют на существующих коллайдерах или на ЛЭП. Если они тяжелые, то придется ожидать 90-х годов, когда должны будут вступить в строй суперколлайдеры: УНК — ускорительно-накопительный комплекс в Протвино (вблизи Серпухова) с энергиями сталкивающихся протонов по 3 ТэВ, и ССК в США. Параметры этого последнего проекта пока не фиксированы. Планируется постройка в тоннеле ЛЭП коллайдера с энергиями сталкивающихся протонов, равными 10 ТэВ. В Новосибирске планируют ВЛЭПП — встречные линейные пучки e^+ и e^- с энергиями 500 ГэВ *).

С этими машинами связываются также надежды на открытие так называемых преонов — гипотетических частиц, из которых, согласно некоторым теоретическим построениям, состоят лептоны и кварки. А может быть, не только лептоны и кварки, но и некоторые или даже все векторные бозоны: W , Z , глюоны, фотон, а также хиггсовы бозоны.

На размышления о преонах физиков наталкивает существование большого количества фермионов и бозонов, которые в настоящее время числятся фундаментальными, и большое разнообразие их свойств. Однако к сколько-нибудь убедительной преонной

*) О судьбе этих коллайдерных проектов см. в разделе «20 лет спустя».

теории эти размышления пока не привели. По-видимому, здесь не хватает какого-то нового принципа.

Коллайдеры высоких энергий понадобятся и для поисковой проверки еще одного изобретения физиков-теоретиков — суперсимметрии. Суперсимметрия — это симметрия между фермионами и бозонами. Так, согласно простейшему варианту суперсимметрии, у каждой из уже известных частиц есть свой «суперпартнер», спин которого отличается на $1/2$: у фотона — фотино (частица со спином $1/2$), у лептонов и кварков — лептино и кваркино (частицы со спином 0, иногда эти скалярные частицы называют иначе: слептоны и скварки), у хиггсова бозона — хиггсино (частица со спином $1/2$) и т. д. Если суперсимметрия осуществляется в природе, то, разумеется, — лишь в сильно нарушенном виде. Предполагают, что все перечисленные выше «ино» достаточно тяжелые, и именно поэтому они не были открыты до сих пор. Однозначных предсказаний о массах «ино», к сожалению, нет. Но есть серьезные соображения, согласно которым они не могут быть существенно тяжелее 100 ГэВ.

Наряду с рискованной охотой за диковинными порождениями теоретических фантазий (рискованной, так как шансы на успех не гарантированы), у физиков, работающих на коллайдерах, есть, если можно так выразиться, и «верный кусок хлеба». Я имею в виду количественное изучение сильных взаимодействий между глюонами и кварками. Особый интерес представляет экспериментальное исследование струй адронов, которые уже несколько раз упоминались на страницах этой книги.

На электрон-позитронных коллайдерах рождаются в основном так называемые кварковые адронные струи, у истоков которых стоит рождение пары кварк — антикварк (рис. 43, a_1). Разлетаясь, кварк и антикварк высокой энергии генерируют большое

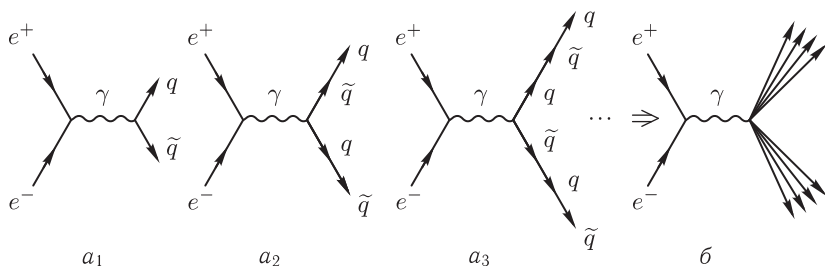


Рис. 43. Образование двух адронных струй при разлете кварка и антикварка, рожденных в электрон-позитронном столкновении высокой энергии

число кварк-антикварковых пар (рис. 43, a_2, a_3, \dots), так что цветные частицы уходят на большие расстояния уже в виде бесцветных комплексов, впоследствии эволюционирующих в адроны. В результате вдоль направления каждого из исходных кварков вылетает сравнительно остро направленный пучок адронов (рис. 43, б). Угловое распределение оси пучка совпадает с угловым распределением прародительской пары кварк — антикварк.

Иногда, находясь еще на близком расстоянии друг от друга, один из прародительских кварков может излучить под большим углом энергичный глюон (рис. 44, а), который инициирует еще одну, глюонную, струю (рис. 44, б). Очень большой интерес представляет изучение различий между кварковыми и глюонными струями адронов.

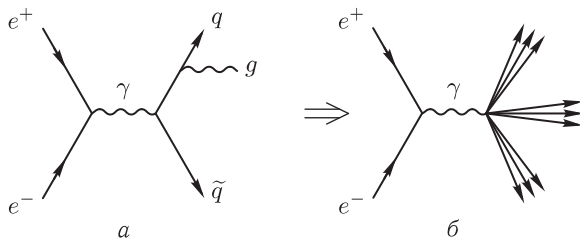


Рис. 44. Испускание кварком глюона (а) и образование в результате этого трех адронных струй (происходящих от кварка, антикварка и глюона) (б)

На протон-антипротонных и протон-протонных коллайдерах глюонные струи должны рождаться даже чаще, чем кварковые. Две кварковые струи рождаются при рассеянии на большие углы кварка на кварке или кварка на антикварке. Две глюонные струи рождаются при рассеянии глюона на глюоне. Кварковая и глюонная струи рождаются совместно при рассеянии кварка на глюоне (рис. 45).

Как уже упоминалось, примерно половину импульса энергичного протона несут глюоны. Глюонные струи рождаются чаще, потому что вероятность столкновения глюона с глюоном больше, чем вероятности остальных процессов, изображенных на рис. 45. Это связано с тем, что глюоны, грубо говоря, имеют двойные цветовые заряды (они красно-антижелтые, сине-антикрасные и т. д.). Изучая образование глюонных струй, можно детально исследовать взаимодействие глюона с глюоном. Это очень интересная и важная задача. Очень интересно, в частности, проверить наличие специфического четырехглюонного взаимодействия

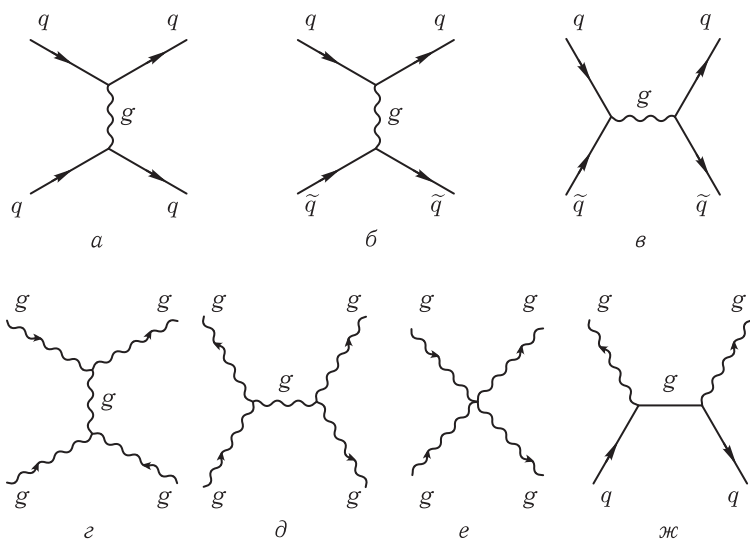


Рис. 45. Рассеяние кварка на кварке (а), кварка на антикварке (б, в), глюона на глюоне (г, д, е) и глюона на кварке (ж)

(рис. 45, е), существование которого предсказывает квантовая хромодинамика.

Говоря о физике на коллайдерах, я не упомянул поиски t -кварка. Но это, конечно, только потому, что я убежден, что читатель и без излишнего напоминания сам ждет не дождется открытия этой частицы.

«ТИХАЯ ФИЗИКА» И ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

Было бы неправильно думать, что все интересные эксперименты в будущем будут обязательно связаны с гигантскими ускорителями. Большой интерес в последнее время привлекает к себе и «тихая физика» — эксперименты, которые проводятся в так называемых низкофоновых подземных лабораториях. Прежде всего, здесь имеются в виду опыты по проверке стабильности протона.

Как известно, протоны очень стабильны; их время жизни превышает возраст Земли по крайней мере на 20 порядков. Установить такой высокий нижний предел для времени жизни протона удалось потому, что протонов вокруг нас очень много: в одном грамме водорода содержится $6 \cdot 10^{23}$ протонов. Так что если взять, скажем, 9 тонн воды (т.е. 1 тонну свободных протонов)

и удостовериться, что в течение года в них не произошло ни одного распада протона, то можно будет сделать вывод, что время жизни свободного протона превышает $6 \cdot 10^{29}$ лет. В последнем, наиболее точном эксперименте такого рода был использован детектор, содержащий 8 тыс. тонн воды. Этот огромный детектор был помещен в глубокую шахту, чтобы уменьшить фон, который создается космическими лучами. Экспериментаторы искали распад $p \rightarrow e^+ \pi^0$. Они установили, что время жизни свободных протонов по отношению к этому распаду превышает $1,9 \cdot 10^{31}$ лет, а с учетом протонов в ядре кислорода — $6,5 \cdot 10^{31}$ лет *).

Большой интерес к поискам распада протона возник примерно десять лет тому назад в связи с появлением теорий великого объединения. Эти теории или, вернее, теоретические модели, пытаются решить задачу о таком объединении сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, при котором все эти взаимодействия описываются единым зарядом g . Каким образом в принципе может быть создана такая теория, если на опыте $g_S > g_W > e$?

Ключ к решению этой проблемы дает явление, которое носит название поляризации вакуума. Поляризация вакуума подобна поляризации диэлектрика, в который внесен электрический заряд. Под действием поляризации вакуума электрический заряд электрона в некоторой мере нейтрализуется или, как говорят, экранируется виртуальными электрон-позитронными парами и парами других частиц и античастиц, которые имеются в физическом вакууме. Это экранирование заряда электрона происходит из-за того, что он притягивает положительные частицы и отталкивает отрицательные. В результате, наблюдаемый с больших расстояний заряд электрона оказывается меньше его «голого» заряда. По мере проникновения в глубь облака пар, окружающих электрон, наблюдаемый электрический заряд электрона возрастает. Электрические заряды всех частиц растут с уменьшением расстояния до частицы или (что в силу соотношения неопределенности — то же самое) с ростом переданного частице импульса q . Так что электрический заряд e есть функция от q : $e = e(q)$, причем функция растущая.

Аналогичным образом функциями от q являются сильный и слабый заряды:

$$g_S = g_S(q), \quad g_W = g_W(q).$$

*) К 2008 году эта нижняя граница поднялась до $5,5 \cdot 10^{33}$ лет.

Но в отличие от электрического заряда, $g_S(q)$ и $g_W(q)$ не возрастают, а уменьшаются с ростом q . Это замечательное свойство сильного и слабого зарядов называется асимптотической свободой (при асимптотически больших импульсах заряды g_S и g_W стремятся к нулю, сильное и слабое взаимодействия «выключаются» и частицы ведут себя как невзаимодействующие, как свободные)*).

Особенно сильно свойство асимптотической свободы проявляется у сильного заряда g_S . (Здесь оно обусловлено спецификой взаимодействий между глюонами и является, так сказать, обратной стороной конфайнмента.) Так, например, при $q = 1$ ГэВ $\alpha_S \approx 0,3$, а при $q = 100$ ГэВ $\alpha_S \approx 0,1$ и продолжает падать с ростом q . (Вспомним, что $\alpha_S = g_S^2/\hbar c$, $\alpha_W = g_W^2/\hbar c$.)

Если экстраполировать изменение «констант» $\alpha_S(q)$ и $\alpha_W(q)$, то окажется, что они должны встретиться при импульсах $q \approx 10^{14} \div 10^{15}$ ГэВ, где каждая из них примерно равна $1/40$. Замечательным фактом является то, что на это место великого объединения приходит и электромагнитная «константа» $\alpha(q)$, вернее — величина $\alpha_{em}(q) = (8/3)\alpha(q)$, где коэффициент $8/3$ вычисляется на основе теоретических моделей великого объединения (в точке великого объединения $\sin^2 \theta_W = 3/8$). Итак, в точке великого объединения (при $q \approx 10^{15}$ ГэВ)

$$\alpha_{em} = \alpha_W = \alpha_S = \alpha_{GU} \approx 1/40$$

(индекс GU происходит от английского *grand unification*).

Встреча «бегущих констант» трех фундаментальных взаимодействий изображена на рис. 46. Взглянув на этот рисунок (карту трех фундаментальных сил), невольно мысленно возвращаешься к рисунку на обложке книги, символизирующему первое знакомство физиков с этими силами, и осознаешь, какой путь пройден физиками между этими двумя рисунками.

Согласно простейшей модели великого объединения, цветовая и электрослабая симметрии объединяются при q порядка 10^{15} ГэВ в единую симметрию, содержащую 24 векторных бозона. Половина из них — наши старые знакомые: глюоны, промежуточные бозоны и фотон. Вторая половина — это сверх-сверх-тяжелые частицы, так называемые X - и Y -бозоны с массами порядка 10^{15} ГэВ. Каждый из этих бозонов, подобно кварку,

*) Предсказание асимптотической свободы было увенчано в 2004 году Нобелевской премией, см. раздел «20 лет спустя».

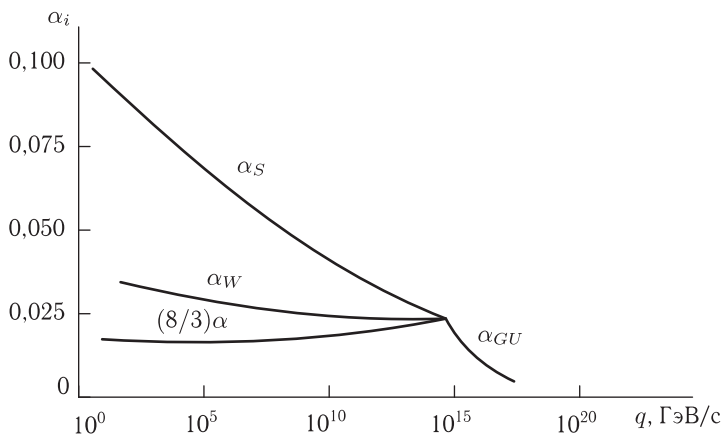


Рис. 46. Изменение эффективных зарядов сильного (g_S), слабого (g_W) и электромагнитного (e) взаимодействия с изменением импульса q , переданного частице; $\alpha_S = g_S^2/\hbar c$, $\alpha_W = g_W^2/\hbar c$, $\alpha = e^2/\hbar c$, $\alpha_{GU} = g_{GU}^2/\hbar c$, где g_{GU} — заряд единого универсального взаимодействия

имеет три цвета, что с учетом соответствующих античастиц, \tilde{X} и \tilde{Y} , дает число 12. Заряды X -бозонов равны $4/3$, а заряды Y -бозонов $1/3$.

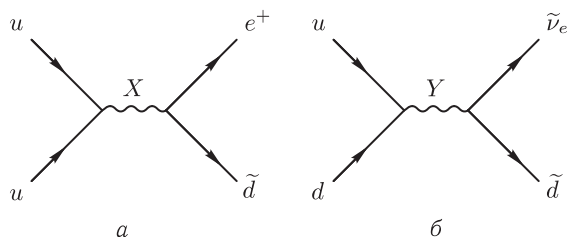


Рис. 47. Процессы с участием X - и Y -бозонов, ведущие к превращению протона в позитрон (а) и нейтрона в электронное антинейтрино (б)

Замечательным свойством X - и Y -бозонов является то, что оба они взаимодействуют с двумя различными типами токов: двухкварковыми и кварк-лептонными (рис. 47). Глядя на рис. 47, а и б и мысленно заменяя в них вылетающий \tilde{d} -кварк на влетающий d -кварк, нетрудно понять, что первый из них описывает превращение протона в позитрон, а второй — нейтрона в антинейтрино. В реальных распадах это превращение должно сопровождаться испусканием дополнительного мезона (π^0) или нескольких мезонов, чтобы удовлетворить законам сохранения

энергии и импульса. Оценивая на основе диаграмм рис. 47 время жизни протона τ_p , можно получить

$$\frac{1}{\tau_p} \approx \frac{\alpha_{GU}^2 m_p^5 c^2}{m_X^4 \hbar},$$

где $\alpha_{GU} \approx 1/40$ — константа великого объединения, m_X — масса X -бозона, m_p — масса протона (сравните эту формулу с формулой для времени жизни мюона). Переходя к обычным единицам, нетрудно убедиться, что ожидаемое время жизни протона составляет примерно 10^{30} лет. Более точные расчеты подтверждают эту оценку, они показывают, что простейшая модель великого объединения действительно дает время жизни протона, не превышающее 10^{30} лет, и потому не выдерживает сопоставления с экспериментом, который дает нижнюю границу, близкую к 10^{32} лет. Но существуют более сложные варианты великого объединения, которые не противоречат опыту. К сожалению, в настоящее время нет достаточных оснований для того, чтобы отдать предпочтение какому-то одному из них.

Будет очень обидно, если протон живет, скажем, 10^{35} лет. Ведь пройдут десятилетия, прежде чем удастся создать такие большие и такие изощренные детекторы, которые могли бы зарегистрировать столь медленный распад. Наши ускорители, даже если бы их диаметр в несколько раз превысил диаметр Земного шара, все равно не смогли бы достичь энергии великого объединения, достичь порога рождения X - и Y -бозонов. В этом нетрудно убедиться, если взять энергию тэватрона (1 ТэВ) и умножить ее на отношение окружности земного экватора (около 40000 км) к окружности тэватрона (около 7 км). Поэтому нам приходится надеяться на милость природы. Ведь кроме распада протона, в принципе есть всего лишь несколько явлений, которые могли бы пролить свет на то, каким образом в природе происходит великое объединение.

Отметим прежде всего переходы нейтрона в антинейтрон в вакууме с ожидаемым периодом перехода порядка нескольких лет и более. Это явление нейтрон-антинейтронных вакуумных осцилляций ищут сейчас несколько экспериментальных групп в пучках нейтронов, производимых ядерными реакторами.

Особый интерес привлекают к себе в последние годы (и в значительной степени благодаря проблеме великого объединения) вопросы о массах нейтрино и о взаимопревращениях в вакууме

нейтрино различных ароматов:

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau; \quad \nu_\mu \rightarrow \nu_e, \nu_\tau; \quad \nu_\tau \rightarrow \nu_e, \nu_\mu.$$

По существу речь идет о том, не повернута ли тройка нейтрино (ν_e, ν_μ, ν_τ) относительно тройки заряженных лептонов (e, μ, τ) на рис. 28, подобно тому, как повернуты друг относительно друга тройки «верхних» и «нижних» кварков на рис. 29. Тонкость здесь заключается в том, что если массы нейтрино равны нулю, то такой поворот принципиально ненаблюдаем. Заметим, что если бы массы u -, c -, t - (или d -, s -, b -) кварков равнялись нулю или даже просто равнялись друг другу, то был бы ненаблюдаем и взаимный поворот верхних и нижних кварков.

Чтобы пояснить, в чем тут дело, рассмотрим рис. 48 и 49. Из того, что мы говорили о слабом заряженном токе, следует, что этот ток может быть записан в виде

$$\nu'_e e + \nu'_\mu \mu + \nu'_\tau \tau + u' d + c' s + t' b,$$

где штрихованные состояния представляют собой линейные комбинации нештрихованных (см. рис. 48, *в* и 49, *в*). Если бы массы

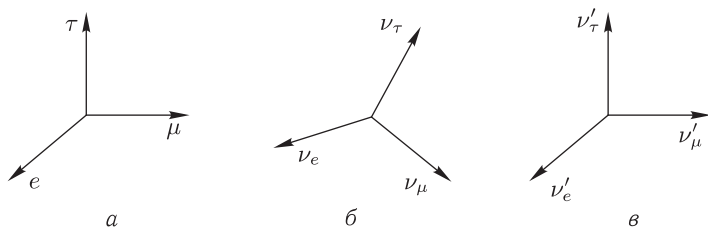


Рис. 48. Орты, соответствующие трем заряженным лептонам (а) и трем нейтрино (б). Штрихованные нейтринные орты (в) получены поворотом нештрихованных ортов (б). Штрихованные нейтринные орты параллельны ортам соответствующих заряженных лептонов

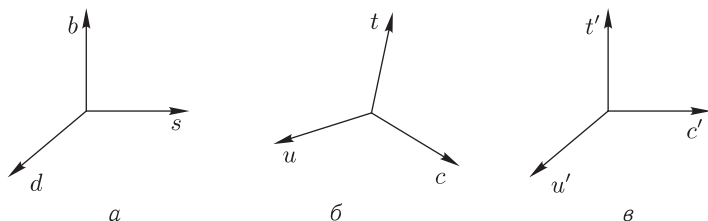


Рис. 49. Орты, соответствующие трем «нижним» кваркам (а) и трем верхним кваркам (б). Штрихованные орты верхних кварков (в) получены поворотом ортов (б) и параллельны ортам соответствующих нижних кварков

трех нештрихованных состояний были равны нулю (или даже не равны нулю, а только равны друг другу), то во все физические наблюдаемые явления входили бы только штрихованные состояния, и мы никогда не узнали бы о существовании нештрихованных состояний. Ненулевые и не равные друг другу массы нештрихованных состояний ($m_1 \neq m_2 \neq m_3$) приводят к тому, что в вакууме волновая функция каждого из них имеет свою фазу $e^{ipx/\hbar}$ и свой импульс

$$p = \sqrt{E^2/c^2 - m^2c^2}.$$

В результате в вакууме возникают взаимные превращения штрихованных состояний. Итак, для существования вакуумных нейтринных осцилляций необходимо не только, чтобы нейтринная тройка была повернута, как это изображено на рис. 48, но чтобы и массы по крайней мере двух типов нейтрино не были равны друг другу.

Поиски нейтринных осцилляций на пучках нейтрино от ядерных реакторов и на ускорителях пока что не обнаружили этого явления. Возможно, это связано с тем, что очень малы углы поворота, возможно, — с тем, что очень малы разности масс. А возможно, малы и те и другие. Если предположить, что углы поворота на рис. 48 не малы, то опыты указывают на то, что разность квадратов масс нейтрино существенно меньше 1 эВ^2 . Модели великого объединения не дают однозначного ответа на вопрос о том, чему должны равняться массы нейтрино. Но в большинстве моделей эти массы малы (меньше или порядка 10^{-5} эВ *).

Очень интересными объектами, существующими в моделях великого объединения (по крайней мере, на бумаге, на кончике пера физика-теоретика), являются магнитные монополи — изолированные магнитные заряды. Согласно теории, массы этих объектов должны быть примерно еще на два порядка больше, чем массы X - и Y -бозонов. Ясно, что создать такие тяжелые объекты в лаборатории невозможно. Можно лишь надеяться, что такой монополь вдруг залетит в ждущую его экспериментальную установку из глубин Вселенной в качестве живого свидетеля той далекой поры, когда Вселенная была настолько горячей, что

*) Нейтринные осцилляции обнаружены и подвергаются тщательным исследованиям. См. раздел «20 лет спустя».

могла рождать пары монополей, и настолько быстро расширялась и охлаждалась, что эти пары не успевали проаннигилировать.

О горячей Вселенной речь пойдет через несколько страниц. А пока обратимся к вопросу о том, каковы перспективы суперобъединения, т.е. единой теории сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного взаимодействий.

СУПЕРОБЪЕДИНЕНИЕ?

Поговорив немного в начале книги о вращении спутника вокруг Земли и используя его в качестве трамплина для обсуждения энергии связи электрона в атоме, мы затем уже не возвращались к гравитационному взаимодействию. Известным оправданием для этого может служить то обстоятельство, что в лабораторных условиях гравитационное взаимодействие исключительно слабое. Так, например, потенциальная энергия гравитационного притяжения между двумя медленными протонами

$$U(r) = -G_N m_p^2 / r,$$

где r — расстояние между протонами, m_p — их масса, а G_N — константа Ньютона. В единицах СИ

$$G_N = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}.$$

В этих единицах трудно понять, мала или велика константа G_N , но если перейти к электрон-вольтам, выделив, как всегда, множители \hbar и c , то сразу же видно, что константа Ньютона исключительно мала:

$$G_N = 6,7 \cdot 10^{-39} \hbar c^5 \text{ ГэВ}^{-2}.$$

В естественных единицах, $\hbar, c = 1$, константа G_N примерно на 33 порядка меньше константы слабого четырехфермионного взаимодействия:

$$G_F = 1,2 \cdot 10^{-5} \hbar^3 c^3 \text{ ГэВ}^{-2}.$$

Гравитационное притяжение двух медленных протонов примерно на 36 порядков слабее, чем их кулоновское отталкивание. В случае же двух электронов различие превышает 42 порядка. Однако по мере увеличения энергии E сталкивающихся электронов гравитационное взаимодействие между ними начинает набирать силу. Дело в том, что потенциал такого взаимодействия растет как E^2 , и только для медленных нерелятивистских ча-

стиц он пропорционален m^2 . Легко проверить, что при энергиях $E \approx 10^{18}$ ГэВ гравитационное притяжение двух сталкивающихся электронов должно превзойти их кулоновское отталкивание. Если же перейти к энергии $E \approx 10^{19}$ ГэВ и к прицельным расстояниям $r \approx \hbar c / 10^{19}$ ГэВ $\approx 10^{-33}$ см, то гравитационная потенциальная энергия сравняется с кинетической энергией электронов: гравитационное взаимодействие станет по-настоящему сильным.

Величину

$$m_{Pl} = (\hbar c / G_N)^{1/2} \approx 10^{19} \text{ ГэВ} / c^2 \approx 10^{-5} \text{ г}$$

называют массой Планка. При энергиях и переданных импульсах порядка m_{Pl} гравитационное взаимодействие становится определяющим. Обратите внимание на то, что масса Планка отличается от энергии великого объединения всего на 4–5 порядков, а от масс монополей и того меньше. Это дает основание думать, что именно вблизи массы Планка находится та кузница, где выковываются основные закономерности физического мира.

Согласно современным теоретическим представлениям, квантами гравитационного поля являются гравитоны — безмассовые фундаментальные бозоны со спином, равным двум. То обстоятельство, что масса гравитона (так же, как и масса фотона) равна нулю, находится в соответствии с тем, что ньютоновский потенциал (подобно кулоновскому потенциалу) спадает на больших расстояниях медленно: степенным образом, как $1/r$.

То обстоятельство, что спин гравитона равен двум, обуславливает важные различия между гравитационным и электромагнитным взаимодействиями (напомним, что спин фотона равен единице). Одно из основных различий заключается в том, что обмен гравитонами между двумя какими-либо частицами всегда приводит к притяжению между этими частицами, в то время как обмен фотонами дает притяжение между частицами с разноименными электрическими зарядами и отталкивание между частицами с одноименными зарядами. Так как обычное вещество электрически нейтрально (заряды электронов экранируют заряды ядер), то на больших расстояниях, намного превышающих размеры атомов, электрические силы между атомами малы. В случае же гравитационного притяжения такого взаимного экранирования «гравитационных зарядов» нет, они все одного знака. Поэтому именно гравитация определяет основные закономерности движения небесных тел. И все это из-за того, что гравитоны, являясь не векторными, а тензорными частицами (так называют

бозоны со спином, равным двум), испускаются и поглощаются не векторным, а тензорным током: тензором энергии–импульса. Здесь не место подробно объяснять, что такое тензор энергии–импульса и почему обмен тензорными бозонами приводит к взаимодействию, которое квадратично растет с ростом E — энергии сталкивающихся частиц. Заметим лишь, что фейнмановская вершина испускания и поглощения тензорной частицы должна содержать дополнительный множитель E по сравнению с аналогичной вершиной для испускания и поглощения векторной частицы.

Из-за малости гравитационной константы и слабости гравитационного взаимодействия при низких энергиях наблюдение отдельных гравитонов является экспериментальной задачей, с которой, быть может, удастся справиться лишь в том случае, если «небо пошлет» в подземную лабораторию фантастически интенсивный поток гравитонов с фантастически высокой энергией. Детектировать же кванты гравитационного поля, созданные в земных условиях, практически невозможно.

В чисто теоретическом плане анализ гравитационного взаимодействия при энергии порядка массы Планка — это самая сложная проблема, с которой когда-либо встречались физики. Большие надежды здесь возлагают на суперсимметрию и ее детище — супергравитацию. Однако идеи супергравитации слишком сложны и специальные, чтобы говорить о них на этих страницах. В экспериментальном же плане положение выглядит совсем безнадёжным, поскольку очевидно, что никакие ускорители никогда до массы Планка не доберутся. Но как без лабораторной проверки можно будет выяснить, какая из конкурирующих теорий правильна, а какая нет? Ответ на этот вопрос заключается в том, что хотя планковских ускорителей нет и не будет, планковская лаборатория существует. Это лаборатория — ранняя Вселенная.

КОСМОЛОГИЯ И АСТРОФИЗИКА

Астрономические наблюдения приводят к ряду фундаментальных заключений. Вот наиболее важные из них.

1. Далекие галактики удаляются от нас и друг от друга, причем скорость v разлета любых двух галактик тем больше, чем больше расстояние R между ними. Коэффициент пропорциональности H между v и R называется постоянной Хаббла. Этот

коэффициент меняется по мере старения Вселенной. В настоящее время

$$H \approx 70 \text{ км/с на мегапарсек,}$$

или

$$H \approx 21 \text{ км/с на } 10^6 \text{ световых лет.}$$

Как нетрудно видеть, величина $1/H$ имеет размерность времени; можно показать, что она характеризует возраст t Вселенной. Более точно, $t = 1/2H \approx 10^{10}$ лет.

Примерно 10^{10} лет назад Вселенная была очень молодой, очень плотной и очень горячей, возникнув в результате так называемого Большого Взрыва. Теория Большого Взрыва устанавливает связь между возрастом t и температурой T Вселенной:

$$t \approx m_{Pl} c^2 \hbar / (kT)^2;$$

k — константа Больцмана; по существу k — это пересчетный множитель от Кельвинов (К) к энергетическим единицам, а температура измеряется в единицах энергии: $1 \text{ К} \approx 10^{-4} \text{ эВ}$. Соотношение между возрастом Вселенной и ее температурой можно записать так:

$$t \text{ (в секундах)} \approx 1/T^2 \text{ (в МэВ}^2\text{)}.$$

2. В первые секунды Большого Взрыва во Вселенной было очень много жестких γ -квантов. По мере расширения и остывания Вселенной длины волн этих γ -квантов увеличились, а их энергия уменьшилась. В настоящее время они наблюдаются как радиоволновое излучение с температурой около 3 К. Это реликтовое радиоволновое излучение, открытое в 1965 г., изотропно и однородно. В одном кубометре межзвездного пространства содержится примерно $4 \cdot 10^8$ таких реликтовых радиоволновых фотонов. Реликтовых фотонов в миллиард раз больше, чем атомов водорода — наиболее распространенного элемента во Вселенной. (Если мысленно равномерно размешать по Вселенной все звездное вещество, то в одном кубометре окажется всего один атом водорода.)

3. Наряду с веществом светящихся звезд и реликтовыми фотонами во Вселенной имеется так называемое невидимое вещество, суммарная масса которого примерно в шесть раз превышает массу видимого вещества. Присутствие невидимого вещества обнаруживается по его гравитационному воздействию на движение звезд и галактик.

Физическая природа невидимого вещества пока не установлена. Существует гипотеза, что невидимое вещество — это реликтовые нейтрино. Согласно теории горячей Вселенной, концентрация реликтовых нейтрино должна быть примерно такой же, как и концентрация реликтовых фотонов. Зная это, легко дать следующую оценку: чтобы масса всех нейтрино на порядок превышала массу всех атомов водорода, необходимо, чтобы масса одного нейтрино составляла примерно 20–30 эВ *).

Если уж речь зашла о нейтрино во Вселенной, то нельзя не упомянуть и о некоторых других аспектах этой темы. Так, например, распространенность гелия во Вселенной очень чувствительна к тому, чему равно число сортов нейтрино. Наблюдаемая распространенность лучше всего согласуется с предположением о том, что кроме ν_e , ν_μ и ν_τ , других типов нейтрино в природе не существует. Как уже было сказано в начале книги, нейтрино испускается при термоядерных реакциях в звездах. Специальная подземная установка для детектирования нейтрино, идущих из центральных областей Солнца, обнаружила, что поток солнечных нейтрино с энергией, превышающей 10 МэВ, примерно в три раза меньше, что предсказывали теоретики-астрофизики. Возможно, это указывает на необходимость уточнения модели Солнца, положенной в основу расчетов. Другая возможность заключается в том, что по дороге к Земле электронные нейтрино, вылетевшие из Солнца, из-за нейтринных осцилляций превращаются в смесь равных количеств ν_e , ν_μ и ν_τ . А нейтрино ν_μ и ν_τ с энергиями ниже порога рождения мюона и τ -лептона детектором не регистрируются **).

Но вернемся от Солнца к первым мгновениям жизни Вселенной, когда ее температура была близка к планковской $T \approx \approx m_{Pl}c^2/k \approx 10^{19}$ ГэВ/ $k \approx 10^{32}$ К) или к температуре великого объединения ($T \approx 10^{28}$ К). Именно в эти первые мгновения ($t \approx 10^{-43} \div 10^{-35}$ с) были «запрограммированы» основные характеристики современного состояния Вселенной и, в частности, темп ее расширения, ее плотность и отношение числа протонов к числу фотонов. В этом «программировании» участвовали не

*) Природа невидимого вещества по-прежнему не установлена, но установлено, что масса всех нейтрино составляет лишь малую долю массы невидимого вещества. См. раздел «20 лет спустя».

**) В настоящее время установлено, что наблюдаемая «нехватка» солнечных нейтрино обусловлена их осцилляциями, см. раздел «20 лет спустя».

только легкие фермионы и бозоны, которые мы создаем и исследуем на ускорителях, но и сверхтяжелые гиганты типа X - и Y -бозонов.

Кажется все более правдоподобным, что физика на планковских масштабах определяет не только всю физику более низких энергий, но и все устройство Вселенной.

ПОХВАЛЬНОЕ СЛОВО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На физику элементарных частиц ежегодно тратятся десятки и сотни миллионов рублей, долларов, франков, марок, десятки и сотни миллиардов лир и йен *). Оправданы ли эти затраты? Одна из задач книги — показать, что эти затраты более чем оправданы.

В некотором смысле затраты на физику высоких энергий напоминают затраты на детей. Без детей немислимо будущее человечества, без физики элементарных частиц немислимо будущее науки. К этой мысли мы еще вернемся, а пока обратимся к ряду примеров того, какие плоды уже сегодня приносит физика высоких энергий развивающим ее странам.

Начнем с того, что пучки частиц, полученные на ускорителях, находят себе разнообразные и все более многочисленные применения. Так, протонные пучки используются в медицине для разрушения опухолей. В отличие от рентгеновских лучей и γ -лучей, протонные пучки могут иметь очень маленькие поперечные размеры, но главное — протоны выделяют большую часть своей энергии в конце своего пробега, на заданной глубине, так что поражение окружающих опухоль здоровых тканей оказывается минимальным.

Мюоны широко используются для исследования тончайших физико-химических свойств различных веществ. В силу несохранения четности, электрон, возникший при распаде мюона, вылетает вдоль направления спина последнего. А по спину мюона направлен его магнитный момент. В результате вылетающий электрон «сообщает» экспериментатору об ориентации магнитного момента мюона. Мюон представляет собой как бы «миниатюрную говорящую магнитную стрелку», измеряющую распределе-

*) Этот раздел был написан до того, как французские франки, немецкие марки и итальянские лиры были заменены единой европейской валютой — евро.

ние магнитных полей в веществе, например, внутри кристалла. По своим химическим свойствам атом мюония (μ^+e^-) похож на атом водорода. Но его судьбу гораздо легче проследить.

Другое перспективное направление практического использования мюонов — это мюонный катализ реакций ядерного синтеза. Размеры атомов мюонного водорода (атомов μ^-p , или μ^-D , где D — дейтрон, или μ^-T , где T — тритон, в которых мюон играет роль электрона) примерно в 200 раз (в отношении m_μ/m_e) меньше размеров атомов обычного, электронного, водорода: e^-p , e^-D или e^-T . Это позволяет нейтральному атому мюонного водорода очень близко подойти к ядру соседнего обычного электронного атома. Так что два ядра тяжелого водорода (например, D и T) можно сблизить, преодолев их кулоновское отталкивание не за счет высокой температуры, а за счет «мюонного обмана». Мюон играет роль «троянского коня»: его отрицательный заряд экранирует положительный заряд тяжелого водорода и делает возможной реакцию слияния при низкой температуре в жидком водороде: $T + D \rightarrow {}^4\text{He} + n$.

Мюоны, рожденные космическими лучами в атмосфере, были использованы лет десять тому назад для просвечивания египетских пирамид. Имеются проекты использования мюонных пучков очень высокой энергии для просвечивания земной коры и исследования рудных месторождений.

Широкое использование находит в науке, медицине, технике и народном хозяйстве синхротронное излучение, испускаемое электронами высоких энергий при их движении по орбите кольцевого ускорителя. Здесь применения простираются от структурного анализа живой клетки и кино съемки работы заболевшего сердца до уничтожения сельскохозяйственных вредителей в больших объемах зерна.

Детектируя антинейтрино, испускаемые ядерными реакторами атомных электростанций, можно более надежно, чем по другим показателям, судить об интенсивности процессов деления и, следовательно, о расходе ядерного горючего. Такой нейтринный расходомер уже работает на одной из атомных электростанций.

Недавно появились проекты использования нейтринных пучков высокой энергии для геологических исследований (поисков нефти), для точных измерений скорости дрейфа континентов. Нейтринная астрономия дает уникальную возможность детектировать коллапс звезд и заглянуть внутрь Солнца. Ведь фотон диффундирует из центра Солнца к его поверхности примерно сто

тысяч лет. Нейтрино же вылетает практически мгновенно. С помощью достаточно мощных нейтринных телескопов можно будет постоянно следить за процессами внутри Солнца и составлять долгосрочные прогнозы.

Большие надежды возлагаются на пучки тяжелых ионов, которые предполагают использовать для поджигания термоядерных реакций путем облучения специальных таблеток, содержащих изотопы легких элементов. Такие тяжелоионные термоядерные реакторы могут стать основой энергетики XXI века.

Говоря о физике высоких энергий, нельзя не упомянуть о многочисленных научных и технических новинках, которые были созданы для решения ее задач, а затем нашли широкое применение и в других областях физики. Физика высоких энергий с ее предельно высокими точностями, скоростями, энергиями, интенсивностями предъявляет экстремальные требования к целому ряду физических параметров приборов и установок. Она явилась той «колыбелью», где были созданы исключительно эффективные вакуумные насосы, где было налажено массовое производство больших сверхпроводящих магнитов, где были созданы разнообразные, очень чувствительные детекторы ионизирующих частиц, где была создана быстродействующая электроника. Особенно широко известно создание в ЦЕРНе мировой электронной паутины WWW с ее интернетом.

Но, конечно, не в этих многочисленных прикладных аспектах основная ценность физики элементарных частиц. Исключительная роль этой науки определяется тем, что она является фундаментом всего естествознания. Уровень этой науки определяет уровень понимания всего окружающего нас мира, определяет уровень интеллектуальной зрелости человечества. Без физики элементарных частиц невозможно понять прошлое нашего мира, невозможно понять основные процессы, идущие в нем, невозможно прогнозировать будущее.

История физики учит, что каждый новый успешный шаг на пути познания фундаментальных закономерностей природы неизбежно приводил к огромным (и почти всегда неожиданным) изменениям в технике и радикальным образом сказывался на жизни всего человечества. Достаточно вспомнить о тех плодах, которые принесли людям такие абстрактные теории, как электродинамика, теория относительности и квантовая механика. Нет абсолютно никаких оснований ожидать, что теории, которые создаются сегодня, окажутся менее плодотворными. Наоборот,

мы знаем, что они имеют дело с самыми основными понятиями физического мира, такими, как время, пространство, вакуум, масса, заряд, спин. Будущие исследования откроют совершенно неожиданные аспекты этих фундаментальных сущностей. И хотя сегодня можно лишь гадать о том, каковы эти аспекты, вряд ли можно сомневаться, что практические следствия этих открытий будут фундаментальными.

Когда-то Ньютон сравнивал себя с мальчиком, нашедшим несколько камешков на берегу океана неизведанного. Конечно, область изведанного неизмеримо выросла с тех пор, но было бы наивным высокомерием считать, что в основном мы уже все знаем и остались неизученными лишь некоторые мелкие детали. Попробуйте представить себе, как много мы не знали бы сегодня, если бы развитие физики элементарных частиц остановилось, скажем, в 1950 г. или даже в 1970 г. Ведь восемь из шестнадцати основных фермионов и бозонов (c -, b -, t -кварки, τ -лептон и его нейтрино, глюоны, промежуточные бозоны) были открыты после 1970 г.

Океан неизведанного простирается перед людьми и сегодня. Физиков ожидают открытия новых частиц, новых сил, новых фундаментальных принципов.

20 ЛЕТ СПУСТЯ

Предыдущие части были написаны 20 лет тому назад на волне энтузиазма, вызванного открытием W - и Z -бозонов, открытием, немедленно увенчанным Нобелевской премией. Дальнейшие надежды физиков были связаны с открытием так называемого бозона Хиггса или попросту хиггса. На это были направлены проекты четырех коллайдеров: 1) ускорительно-накопительного комплекса — УНК — в Протвино с энергиями сталкивающихся протонов 3 ТэВ; 2) сверхпроводящего суперколлайдера SSC под Далласом с энергией сталкивающихся протонов 20 ТэВ; 3) большого электрон-позитронного коллайдера LEP в ЦЕРНе с энергией пучков до 114 ГэВ; 4) большого адронного коллайдера LHC в ЦЕРНе с энергией протонных пучков 7 ТэВ.

К сожалению, в 1990-х годах строительства УНК и SSC были прерваны из-за прекращения финансирования. Их пустые тоннели остались памятниками эпохи. LEP был сооружен, но его максимальная энергия оказалась недостаточной для решения вопроса о существовании хиггсов. Работа LEP при энергии,

соответствующей массе Z -бозона ($E_+ = E_- \approx 46$ ГэВ), позволила набрать более 20 млн *) случаев рождения и распада Z -бозонов и количественно проверить электрослабую теорию. Наиболее успешным было измерение ширины невидимых распадов Z -бозонов, равной разности полной ширины и ширины распада в сумму всех видимых каналов. Суммарная ширина невидимых каналов совпала с теоретически предвычисленной шириной трех нейтринных каналов

$$\begin{aligned} e^+e^- \rightarrow Z &\rightarrow \nu_e\tilde{\nu}_e, \\ &\rightarrow \nu_\mu\tilde{\nu}_\mu, \\ &\rightarrow \nu_\tau\tilde{\nu}_\tau. \end{aligned}$$

Таким образом, было экспериментально доказано, что в природе существуют три и только три нейтрино с массой, меньшей $m_Z/2$, участвующих в стандартных слабых взаимодействиях.

Работа LEP при более высоких энергиях исключила существование хиггсов с $m < 114$ ГэВ, но оставила сомнения относительно $m = 114$ ГэВ, где наблюдались несколько событий, похожих на рождение хиггса. К сожалению, при строительстве LEP был отвергнут вариант, при котором две дюжины дополнительных сверхпроводящих резонаторов могли бы поднять максимальную энергию электронов и позитронов до 125 ГэВ. Теперь же открытие хиггса по наследству перешло к LHC, который сооружается в том же самом тоннеле окружностью 27 км, в котором до этого работал LEP. (Сам LEP и 4 детектора, работавших на нем, — ALEPH, DELPHI, L3, OPAL — демонтированы). LHC должен вступить в строй в 2007 году. В создании как коллайдера LHC, так и детекторов (ATLAS, CMS, LHCb, ALICE), которые будут работать на нем, активно участвуют физики и инженеры из институтов России.

Крупнейшим достижением конца 20-го века было открытие в 1994 г. на Тэватроне — протон-антипротонном коллайдере в Фермиевской национальной лаборатории, вблизи Чикаго — шестого кварка, t -кварка. Мало кто из физиков сомневался в существовании t -кварка, настолько привлекательным была т. н. стандартная модель с тремя поколениями лептонов и кварков. Но все предыдущие попытки родить и наблюдать распады этой частицы оканчивались неудачей. Как выяснилось в 1990-х го-

*) Это число производит особое впечатление, если вспомнить, что в первых наблюдениях этих частиц в 1983 г. их можно было пересчитать на пальцах.

дах, t -кварк оказался очень тяжелым. По последним измерениям двух открывших его в 1994 г. коллабораций CDF и D0 $m_t = 178 \pm 5$ ГэВ. Это в два раза больше, чем масса Z -бозона.

Такая большая масса не была неожиданностью для физиков-теоретиков, анализировавших данные четырех детекторов LEP по свойствам Z -бозона уже в 1993 г. Они предсказали, что $m_t \approx 160 \pm 20$ ГэВ. Это предсказание было сделано путем расчета так называемых электрослабых радиационных поправок, включающих массу t -кварка в качестве неизвестного (до 1994 г.) параметра. Дело в том, что хотя W - и Z -бозоны слишком легки, чтобы распадаться по каналам

$$W^+ \rightarrow t\bar{b}, \quad W^- \rightarrow \bar{t}b, \quad Z^0 \rightarrow t\bar{t},$$

процессы с виртуальными t -кварками, такие как

$$W^+ \rightarrow t\bar{b} \rightarrow W^+, \quad W^- \rightarrow \bar{t}b \rightarrow W^-, \quad Z^0 \rightarrow t\bar{t} \rightarrow Z^0$$

дают поправки на уровне долей процента в массы и ширины распадов W - и Z -бозонов. Поэтому прецизионные измерения свойств W - и Z -бозонов позволили предсказать массу t -кварка до его открытия.

В отличие от более легких кварков, t -кварк распадается с испусканием реального W -бозона, в основном

$$t \rightarrow b + W^+, \quad \bar{t} \rightarrow \bar{b} + W^-.$$

В результате его ширина должна быть порядка ГэВ, а время жизни так мало, что он не успевает образовать адрон с кварками, сопровождающими его рождение.

Существенный прогресс был достигнут в изучении мезонов, содержащих b -кварки:

$$B^+ = \bar{b}u, \quad B^0 = \bar{b}d, \quad B_s^0 = \bar{b}s, \quad B_c^+ = \bar{b}c,$$

и соответствующих античастиц

$$B^- = b\bar{u}, \quad \bar{B}^0 = b\bar{d}, \quad \bar{B}_s^0 = b\bar{s}, \quad B_c^- = b\bar{c}.$$

Их массы в МэВ:

$$5279, \quad 5279, \quad 5368, \quad 6286.$$

Наряду с этими B -мезонами были открыты многочисленные состояния боттомония — системы, состоящей из кварка и антикварка: $b + \bar{b}$. Шесть S -волновых триплетных состояний этой системы (с орбитальным моментом $L = 0$ и спином, равным единице) называют ипсилон-мезонами и обозначают $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$,

$\Upsilon(3S)$, $\Upsilon(4S)$, $\Upsilon(10860)$, $\Upsilon(11020)$, где 1, 2, 3, 4 — значения главного квантового числа, а пятизначные числа указывают массы соответствующих мезонов в МэВ. (Масса $\Upsilon(1S)$ равна 9460 МэВ, $\Upsilon(2S)$ — 10023 МэВ, $\Upsilon(3S)$ — 10355 МэВ, а $\Upsilon(4S)$ — 10580 МэВ. Обычно в названиях у первых четырех мезонов не указывают их массы, а у пятого и шестого не указывают их квантовые числа.)

Все Υ -мезоны рождаются в e^+e^- -столкновениях (через виртуальный фотон). Ширины распадов первых трех из них малы: порядка нескольких десятков кэВ. Ширины трех последующих составляют десятки МэВ, поскольку их массы превышают порог распада на пару $B\bar{B}$.

Это обстоятельство используется для прецизионного исследования свойств B - и \bar{B} -мезонов на так называемых B -фабриках: Belle (КЕКВ, Япония) и BaBar (PEP II, SLAC, США). На каждом из этих коллайдеров рождается $\Upsilon(4S)$ с массой 10580 МэВ. Для лучшего наблюдения B -мезонов коллайдеры сделаны асимметричными (КЕКВ — $e^- \times e^+$: 8 ГэВ \times 3,5 ГэВ; PEP II — $e^- : 7 \div 12$ ГэВ, $e^+ : 4 \div 2,5$ ГэВ).

S -волновые синглетные состояния боттомония (их спин равен нулю) обозначают $\eta_b(1S)$, $\eta_b(2S)$, $\eta_b(3S)$. До сих пор видели лишь одно событие, которое можно интерпретировать как $\eta_b(1S)$. P -волновые синглетные состояния (их спин равен единице) $h_b(1P)$ и $h_b(2P)$ на опыте пока не обнаружены.

P -волновые триплетные состояния боттомония могут иметь спин, равный 0, 1, 2. Наблюдали шесть таких мезонов: $\chi_{b0}(1P)$, $\chi_{b1}(1P)$, $\chi_{b2}(1P)$ и $\chi_{b0}(2P)$, $\chi_{b1}(2P)$, $\chi_{b2}(2P)$. Первые три были обнаружены как продукты радиационных распадов $\Upsilon(2S)$, а последние три — как продукты радиационных распадов $\Upsilon(3S)$. Значения спинов всех шести χ_b мезонов нуждаются в экспериментальных подтверждениях.

Если изучение уровней боттомония интересно для проверки теории сильного взаимодействия — квантовой хромодинамики, то изучение распадов B -мезонов представляет интерес с точки зрения слабого взаимодействия и, прежде всего, для изучения механизма нарушения CP -инвариантности.

До открытия B -мезонов единственным источником эффектов нарушения CP -инвариантности были распады нейтральных K -мезонов, в которых эти эффекты очень малы — на уровне 0,1%.

В распадах B -мезонов эффекты нарушения CP оказались на порядок и даже на два порядка больше.

Зарядовая асимметрия наблюдалась в распадах

$$\begin{aligned} B^0 &\rightarrow J/\psi K_S \quad \text{и} \quad \tilde{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S, \\ B^0 &\rightarrow \pi^+ \pi^- \quad \text{и} \quad \tilde{B}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, \\ B^0 &\rightarrow K^+ \pi^- \quad \text{и} \quad \tilde{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+. \end{aligned}$$

Особенно интересна последняя асимметрия (ее величина в BaBar составляет $-0,133 \pm 0,030$, а в Belle $-0,088 \pm 0,035$), поскольку в нее не дают вклада $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ осцилляции и она целиком обусловлена т.н. прямым нарушением CP в слабом взаимодействии. В распадах K_L -мезонов прямое нарушение CP характеризуется параметром ε' , величина которого примерно на три порядка меньше, чем параметр ε , характеризующий нарушение CP в осцилляциях $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$. Учитывая, что $|\varepsilon| = 2,3 \times 10^{-3}$, мы видим, что эффекты прямого нарушения CP в распадах K_L^0 составляют примерно 10^{-6} . Это приблизительно на пять порядков меньше, чем недавно открытые асимметрии в распадах B^0 -мезонов.

Несмотря на большую величину эффектов нарушения CP -симметрии в распадах B -мезонов, они не противоречат Стандартной модели, в которой нарушение CP описывается матрицей Каббибо–Кабаяши–Маскавы. Чтобы попытаться обнаружить физические эффекты, выходящие за пределы Стандартной модели (т.н. «новую физику»), необходимо изучить не несколько сот миллионов $\Upsilon(4S)$ распадов, как это имеет место в современных опытах BaBar и Belle, а, как минимум, на порядок больше.

Другим перспективным направлением, где можно ожидать выхода за пределы Стандартной модели, является исследование осцилляций нейтрино. За последние годы большой прогресс достигнут в экспериментах с нейтрино, рождающимися на Солнце, в земной атмосфере, в ядерных реакторах и на ускорителях.

Особенно важные результаты были получены на подземных водных детекторах Камиоканде (K, 1 кт H_2O), Суперкамиоканде (SK, 50 кт H_2O), расположенных в шахте Камиока в Японии, и детекторе, наполненном тяжелой водой (SNO, 1 кт D_2O) в нейтринной обсерватории в Садбери (Канада). В этих детекторах чувствительные фотоумножители регистрируют черенковское из-

лучение, испущенное заряженными частицами, которые рождаются при взаимодействии нейтрино с водой внутри детектора или с грунтом вне его.

Начнем с атмосферных нейтрино. Они рождаются, в основном, при распадах π^+ -мезонов на $\mu^+\nu_\mu$ (и аналогично, $\pi^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu$). (Напомним, что π^\pm -мезоны рождаются в атмосфере при столкновениях протонов космических лучей с ядрами атомов воздуха.) Как показали данные, полученные на детекторе Суперкамиоканде, мюонные нейтрино, прилетающие сверху, не успевают за время пролета превратиться в нейтрино другого сорта: ν_e или ν_τ . Поэтому их число такое, какое должно быть, если бы нейтринных осцилляций не было. А вот число ν_μ прилетевших снизу, через толщу земного шара, существенно меньше и согласуются с тем, что ν_μ представляет собой суперпозицию нейтрино с массами m_2 и m_3 :

$$\nu_\mu = -\sin\theta_{23}\nu_2 + \cos\theta_{23}\nu_3,$$

где $\sin^2\theta_{23} \approx \cos^2\theta_{23} \approx 0,5$, т. е. $\theta_{23} \approx 45^\circ$.

При этом ортогональная суперпозиция описывает ν_τ :

$$\nu_\tau = \cos\theta_{23}\nu_2 + \sin\theta_{23}\nu_3.$$

Существенно, что ν_μ в ν_e не переходит, а ν_τ имеют недостаточную энергию, чтобы рождать в детекторе τ -лептоны. Так что единственное наблюдаемое явление в SK — это дефицит мюонов, летящих из нижней полусферы.

Вероятность превращения $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ на длине L дается формулой

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) &= \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{(m_2^2 - m_3^2)L}{4E} \approx \\ &\approx \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 (1,27\Delta m_{23}^2 [\text{эВ}^2] L [\text{км}]/E [\text{ГэВ}]). \end{aligned}$$

Зная, что энергия E атмосферных нейтрино несколько ГэВ, а радиус Земли 6000 км, физики, работающие на Суперкамиоканде, заключили, что с 20%-й точностью

$$|\Delta m_{23}^2| \approx 25 \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^2.$$

Этот вывод был подтвержден недавно в другом эксперименте, в котором в детектор Суперкамиоканде посылался пучок мюонных нейтрино со средней энергией $\bar{E} = 1,3$ ГэВ, созданных на протонном ускорителе с энергией протонов 12 ГэВ в лаборатории

КЕК, находящейся на расстоянии 250 км от шахты Камиока. Этот эксперимент получил в физической литературе жаргонное сокращение К2К, где цифра 2 заменяет предлог to: от КЕК к Камиоке. В ноябре 2004 эксперимент К2К давал $\Delta m_{23}^2 = (28_{-7}^{+4}) \times 10^{-4} \text{ эВ}^2$. Таким образом, природные и «рукотворные» нейтрино, как и следовало ожидать, осциллируют одинаково.

Наблюдение солнечных нейтрино в детекторах Камиоканде и Суперкамиоканде подтвердило сведения, полученные ранее в экспериментах в шахте Хоумстейк (США) и в подземных лабораториях на Баксане (Россия) и Гран Сассо (Италия), где нейтрино регистрировались химическим методом (по реакции $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e + {}^{37}\text{Ar}$ в первом из них и по реакции $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e + {}^{71}\text{Ge}$ в двух других). Во всех этих опытах наблюдался дефицит солнечных нейтрино: их было на 25–50% меньше, чем предсказывали теоретики без учета нейтринных осцилляций. Однако оставались не исключенными различные малоубедительные гипотезы, например, что по дороге от Солнца часть нейтрино распадается. Окончательное доказательство того, что дефицит обусловлен именно нейтринными осцилляциями, дал в 2002 году детектор с тяжелой водой в Садбери. На дейтронах D_2O шли реакции, обусловленные как заряженными токами $\nu_e \text{D} \rightarrow ppe^-$, так и нейтральными $\nu_l \text{D} \rightarrow pn\nu_l$, где ν_l означает ν_e , ν_μ , ν_τ . При этом для всех трех сортов нейтрино сечения, обусловленные нейтральными токами, одинаковы. Поэтому нейтринные токи нечувствительны к тому, осциллировали ли нейтрино по пути от Солнца до Земли. И действительно, число событий нейтральных токов оказалось равно теоретически предсказанному. Следовательно, единственное изменение в пучке нейтрино связано только с переходами между ν_e , ν_μ и ν_τ . Исходные ν_e представляют собой суперпозицию ν_1 и ν_2 с массами m_1 и m_2 и углом смешивания θ_{12} . Опыт дает $|m_1^2 - m_2^2| = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^2$, $\sin^2 2\theta_{12} = 0,83$, $\theta_{12} \approx 37^\circ$ с 20%-й точностью.

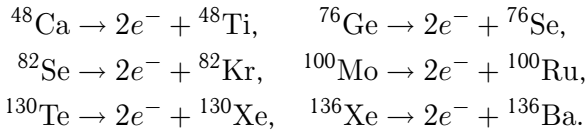
Данные по осцилляциям солнечных ν_e недавно получили подтверждение в реакторном эксперименте KamLAND. В этом эксперименте $\bar{\nu}_e$ от всех японских промышленных реакторов детектировались специальным детектором из 1 кт жидкого сцинтиллятора, расположенным все в той же шахте Камиока. 80% всех реакторов находились на расстояниях L от 140 до 210 км от детектора. Измерялась энергия E , выделяемая антинейтрино

в детекторе, и было получено распределение числа событий в зависимости от L/E , что позволило измерить $|\Delta m_{12}^2|$.

До сих пор не измерены знак Δm_{23}^2 и величина θ_{13} , для которой установлен лишь верхний предел порядка 5° .

В литературе можно часто встретить утверждение, что нейтринные массы и осцилляции представляют собой физику за пределами Стандартной модели. Пока не вполне ясно, насколько это утверждение безусловно. Конечно, массы нейтрино на уровне десятых и даже сотых долей эВ гораздо меньше, чем масса электрона. Но ведь и отношение $m_e/m_t \sim 10^{-6}$. Так что порядок-другой в иерархии масс еще не доказывает, что мы имеем дело с «новой физикой», а не с очередным непониманием «старой физики». Обычно антинейтрино с левой спиральностью не включаются в рассмотрение при обсуждении схем великого объединения. Но добавление этой частицы выглядело бы вполне естественно в этих схемах. В нейтринных реакциях они не участвуют, являясь изотопическими синглетами, а дираковские массы давали бы стандартным образом.

Действительно серьезным сигналом новой физики явилось бы обнаружение безнейтринного двойного β -распада, например,



Эти распады были бы возможны, если бы нейтрино были истинно нейтральными частицами, тождественными со своими античастицами. Такие нейтрино называют майорановыми. Амплитуда безнейтринного 2β -распада может быть записана в виде

$$A(\beta\beta)_{0\nu} \sim \langle m \rangle M.$$

Здесь M — ядерный матричный элемент, а

$$\langle m \rangle = m_1 U_{e1}^2 + m_2 U_{e2}^2 e^{i\alpha_{21}} + m_3 U_{e3}^2 e^{i\alpha_{31}},$$

где U_{ei} характеризует долю нейтрино с массой m_i в электронном нейтрино, а майорановские фазы α_{21} и α_{31} отличны от нуля (или π), если нарушается CP -инвариантность. В отличие от майорановских фаз, которые могут проявиться только в двойном β -распаде, дираковскую фазу в матрице смешивания нейтрино, аналогичную фазе в матрице смешивания кварков, следует искать в осцилляциях нейтрино. Из-за неопределенности величини

ны M из имеющихся данных по отсутствию 2β -распада ^{76}Ge следует, что $|\langle m \rangle| < (0,35 \div 1,05)$ эВ.

Особенно выдающиеся открытия были совершены в последние годы на стыке физики частиц, астрофизики и космологии, в области, получившей название «astroparticle physics». Пожалуй, наиболее неожиданным было открытие так называемой «темной энергии», плотность которой составляет $3/4$ полной плотности энергии во вселенной. Пока единственным необычным проявлением этой субстанции является то, что, в отличие от гравитационного притяжения обычной материи, она не замедляет космологический разлет далеких галактик, а ускоряет его. Это проявляется в спектрах далеких сверхновых, которые служат для астрономов «стандартными свечками». Это открытие пока «слишком молодо», чтобы считать его окончательным.

В отличие от «темной энергии», «темная материя» известна с тридцатых годов прошлого века, но из каких частиц состоит эта темная материя, пока неясно. Она группируется внутри и вокруг галактик, что приводит к слишком быстрому вращению звезд вокруг центра галактик. Аналогичное слишком быстрое вращение наблюдается и у галактик в скоплениях галактик. Видимая масса звезд и межгалактического газа примерно в пять раз меньше, чем масса темного вещества, вызывающего аномально быстрое вращение звезд в галактиках и галактик в скоплениях. Так что обычное вещество составляет в среднем не более $1/5$ плотности вещества во вселенной или с учетом темной энергии не более 5% средней плотности энергии вселенной. Попытки обнаружить частицы невидимого вещества в подземных низкофоновых лабораториях в околоземном пространстве пока успеха не принесли.

Крупнейшим успехом последних лет стало прецизионное измерение анизотропии реликтового микроволнового излучения, испущенного в то время, когда возраст вселенной был всего 300 000 лет. (Напомним, что сейчас ее возраст около 12 млрд лет.) Реликтовое излучение испускалось при образовании атомов водорода из первичной электронно-протонной плазмы, когда эта плазма настолько остыла, что стало возможным существование нейтральных атомов. При последующем остывании вселенной оптические фотоны превратились в микроволновое излучение. Его анизотропия воспроизводит карту неоднородностей температуры и плотности плазмы в эпоху испускания фотонов. Кажется невероятным, но согласно теории инфляционной вселенной, эти

неоднородности, в свою очередь, воспроизводят структуру неоднородностей в момент окончания инфляционного расширения вселенной. Таким образом, прецизионное измерение анизотропии реликтового излучения позволяет «увидеть» вселенную в момент ее рождения. Наибольшей точности до сих пор достиг специальный спутниковый эксперимент WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe).

Исследование неоднородностей вселенной на более поздних этапах ее эволюции позволяет получить сведения о массах нейтрино. Вообще же астрофизика и космология являются неисчерпаемым источником сведений о свойствах как известных, так и пока еще не открытых частиц. С другой стороны, понять, как возникла, развивалась и развивается вселенная, можно только на основе физики частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронштейн М.П.* Атомы и электроны. — М.: Наука, 1980 (Библиотечка «Квант», вып. 1).
- Фарадей М.* История свечи. — М.: Наука, 1980 (Библиотечка «Квант», вып. 2).
- Боровой А.Л.* Как регистрируют частицы. — М.: Наука, 1981 (Библиотечка «Квант», вып. 15).
- Дубровский В.Н., Смородинский Я.А., Сурков Е.Л.* Релятивистский мир. — М.: Наука, 1984 (Библиотечка «Квант», вып. 34).
- Фейнман Р.* Характер физических законов. — М.: Мир, 1968.
- Вайнберг С.* Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. — М.: Энергоиздат, 1981.
- Фритч Х.* Кварки. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
- Вейль Г.* Симметрия. — М.: Наука, 1968.
- Фундаментальная структура материи* / Авторы: Д. Уилкинсон, Р. Пайерлс, К. Льюэллин-Смит, Д. Перкинс, Дж. Эллис, Дж. Адаме, М. Гелл-Манн / Пер. с англ. — М.: Мир, 1984.
- Намбу Ё.* Кварки / Пер. с яп.: под ред. Р.М. Мир-Касимова. — М.: Мир, 1984.
- Окунь Л.Б.* Физика элементарных частиц. — М.: Наука, 1984.
- Современная теория элементарных частиц* / Отв. ред. И.Ю. Кобзарев. — М.: Наука, 1984.
- Гольдин Л.Л.* Физика ускорителей. — М.: Наука, 1983.
- Шехтер В.М., Ансельм А.А.* Атом и квантовая механика. Подписная научно-популярная серия «Физика», 5/1984. — М.: Знание, 1984.
- Смондырев М.А.* Квантовая электродинамика и опыт. Подписная научно-популярная серия «Физика», 4/1984. — М.: Знание, 1984.
- Фролов В.П.* Введение в физику черных дыр. Подписная научно-популярная серия «Физика», 1/1983. — М.: «Знание», 1983.
- Мигдал А.Б.* Поиски истины. — М.: Молодая гвардия, 1983.
- Мигдал А.Б.* От догадки до истины. — М.: Просвещение, 2008.
- Зельдович Я.Б., Яглом И.М.* Высшая математика для начинающих физиков и инженеров. — М.: Наука, 1982.
- Померанчук И.Я.* Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1972. Т. I. Физика низких температур. Нейтронная физика. Т. II. Физика элементарных частиц. Электромагнитные и слабые взаимодействия. Т. III. Физика элементарных частиц. Сильные взаимодействия.
- Кобзарев И.Ю., Манин Ю.И.* Элементарные частицы. Диалоги физика и математика. — М.: Фазис, 1997.
- Любимов А., Киш Д.* Введение в экспериментальную физику частиц. — М.: Физматлит, 2001.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ *)

- Адронные струи 45, 51, 86, 96
Адронный калориметр 88
Адроны 37, 40–47, 50
«Алгебра античастиц» 56, 57, 66
Амплитуда процесса 65
Анизотропия микроволнового релик-
тового излучения 120
Аннигиляция 37–40, 45, 63
Античастицы 37–52, 98
Аромат 48, 55, 72, 78
Асимптотическая свобода 99
Атом 9, 23, 26–29
- Баксан** 118
Барионы 38, 41, 43
«Бегущие константы» 99
Берестецкий В. Б. 31
Бозе Ш. 24
Бозоны **24**, 41, 62
— промежуточные векторные 55
— скалярные (хиггсовы) 93, 94
— фундаментальные векторные 37, 47
Большой взрыв 107–109
Боровский радиус 26
Боттомоний 114
Будкер Г. И. 92
- Вайнберг С.** 81
Вакуум 112
Вакуумные осцилляции 101, 103
Ван дер Меер С. 92
Вектор 13
— трехмерный 18
— — аксиальный 73, 74, 76
— — полярный 73
- Вектор четырехмерный 18, 76
Векторное произведение **13**, 14
Великое Объединение 98–104
Вероятности слабых реакций и распа-
дов 61
Вероятность процесса 25, 65
Взаимодействие гравитационное 21,
22, 104–106
— сильное 29, 40–52, 93–97
— слабое 29–33, 71–93
— — заряженных токов 55–61, 66
— — нейтральных токов 78–80
— электромагнитное 30, 67
ВЛЭПП 94
Водород 9, 10, 57, 107
Возраст Вселенной 107
Волновая функция 25
Время 16, 18, 52
— жизни τ -лептона 53, 61
— — b , c -кварков 61
— — — мюона 53, 61
— — нейтрона 61
— — протона 101
Встречные пучки 36, 80
- Галилея** принцип 15
Гелий 10, 108
Гипероны 41–43
Глубоко-неупругие процессы 45
Глэшоу Ш. 80
Глюон 41, 47–52, 68, 96
Глюонные струи 96
Горячая Вселенная 107–109
Гравитон 105
Гран Сассо 118

*) Для некоторых терминов полужирным шрифтом указаны страницы со-
держашие наиболее подробное обсуждение данного термина

Двойной бета-распад 119

Действие 23, 24

Дейтерий 10, 32

Дейтрон 10, 32, 57

Дефект массы 23

Дискретные симметрии 72

— уровни атома 25, 27, 28

— четырехмерные решетки 52

Длина волны 25

Единица действия 23

— массы 21

— скорости 21

— углового момента 24

— энергии 21, 22

Заряд античастицы 38, 56

— барионный 38

— лептонный 38

— сильный 48, 49, 98

— слабый 81, 98

— электрический 9, 44, 64, 98

Зарядовое сопряжение 38, 72

Зеркальное отражение 72

Излучение инфракрасное 11

— реликтовое 107

— рентгеновское 11

— синхротронное 35

— ультрафиолетовое 11

Импульс 13, 16, 19, 25

— системы 18

— четырехмерный 18

Интервал 18

Инфляция 120

Ионизация атома 27

Камиока 116

Камиоканде 116

Квантовая механика 23, 25

— теория поля 62, 78

— хромодинамика 48, 50

— электродинамика 48, 50, 61

Кварки 40–42, 53–55

Кварковая модель 41

Кварковые струи 95, 96

Кеплера второй закон 15

Клайн Д. 85

Классическая механика

— — нерелятивистская 12–15

— — релятивистская 15–20

Комптоновская длина волны 26

Константа Больцмана 107

— великого объединения 101

— взаимодействия 64

— Ньютона 22, 104

— Ферми 60, 64

Конфайнмент 45, 46, 50, 99

Корпускулярно-волновой дуализм 25

Космические лучи 34

Лептоны 38, 52–61

Лоренцев инвариант 18

Лоренцевы преобразования 18, 76

ЛЭП 93

Магнитный момент 64

— монополь 103

Майорановские нейтрино 119

МакИнтайр П. 85

Масса 12, 16, 19, 38

— τ -лептона 52

— τ -нейтрино 53

— W^- , Z -бозонов 82

— «движения» 19, 20

— «покоя» 19, 20

— античастицы 38

— атома 9

— гравитационная 19

— инертная 19

— кварков 40

— мезонов 41–43

— мюона 52

— мюонного нейтрино 53

— нейтрона 10, 41

— Планка 105, 106

— протона 9, 10

— системы 18

— фотона 12, 16

— электрона 9

— электронного нейтрино 53

«Массивный фотон» 64, 66, 81

Мезоны 41–44, 114

Менделеева таблица 24

Мюон 52, 53, 66

Нарушение C -симметрии 72

— CP -симметрии 78

— P -симметрии 72, 74, 77

— T -симметрии 78

Невидимое вещество 107

Нейтральные слабые токи 78–85

Нейтринные осцилляции 103, 116

Нейтрино 29, 38, 52, 53, 101, 108

— атмосферные 117

— реакторные 118

— солнечные 118

— ускорительные 118

Нейтрон 9, 10, 30–32, 38, 41

Несохранение четности 71–78

Нуклон 10, 32, 34, 41, 43

Обращение времени 56, 57

Операторы рождения и уничтожения
частиц 68

Орты 14, 70

Основное состояние 26, 28

Очарование скрытое 43, 44

— явное 44

Пары кварковые 58, 59

— лептонные 58, 59

— слабые 59

— электронно-позитронные 66

Пион 41, 52

Позитрон 31, 37–40, 66–68

Поколения кварков и лептонов 37,
53–55

Поле глюонное 47–52

— магнитное 21, 34

— силовое 21, 47

— электрическое 35

— электромагнитное 28, 47, 61

Поляризация 72

— вакуума 98

— диэлектрика 98

— частиц 72–76, 83

Померанчук И. Я. 5, 7, 31, 75

Постоянная Планка 24

— тонкой структуры 26, 64, 81

— Хаббла 106

Потенциал Юкавы 64

Преон 94

Проекция спина 24

— углового момента 24

Пропагатор 65, 81

Пространство 16, 72

— евклидово 18

— псевдоевклидово 18

Протон 9, 10, 23, 41, 96–98, 108

Псевдоскаляр 74

Радиус атома 9, 26

— нуклонов 11

— электрона 11

Разложение функции в ряд 17

Распад W - и Z -бозонов 87

— адронов и лептонов 55–61

— радиоактивный 5, 29–33

Рассеяние нейтрино 59, 84

— электрона на протоне 61, 62

Резерфорд Э. 45

Рождение W - и Z -бозонов 85–87

— электронно-позитронной пары 37

Руббин К. 85, 92

Салам А. 80

Сечение 25

Силы 21

Симметрия CP -, CPT - 77, 78

— временная (T) 72

— зарядовая (C) 72

— зеркальная (P) 72

— цветовая 49, 84, 99

— электрослабая 84, 99

Система Земля-спутник 20–23

— координат 13, 16, 18, 73

— — декартова 14

— — инерциальная 15, 17

— протон-электрон 21–23

— свободных частиц 18

— солнечная 10, 11

— центра масс 36, 62

Скалярное произведение 14

Скорость Земли 13, 17

— света 11, 12, 16

Слабый угол 81

СЛК 93

- Солнце 28, 31
Соотношение неопределенности 25, 64
Сохранение барионного заряда 39, 56
— импульса 12, 57
— лептонного заряда 39
— углового момента 12–15
— электрического заряда 36
— энергии 12, 33, 53, 57
— энергии-импульса 61
Спин 15, 24, 73
— барионов 41
— гиперонов 41
— глюонов 47
— кварков 40, 42, 45
— лептонов 52
— мезонов 41, 75
— нуклонов 24, 43
— фотона 24
— электрона 24
ССК-сверхпроводящий суперколлайдер 94
Стабильность протона 97
Супергравитация 106
Суперкамиоканде 116
Суперобъединение 104
Суперпозиция 42
Суперсимметрия 95, 106

Темная материя 120
— энергия 120
Теория относительности 15, 51
— электрослабая 80–85
Термоядерные реакции 32, 39
Ток 66–71, 76–80
Тритий 10
Тритон 10, 110
Тэватрон 93

Угловой момент 13, 24, 25, 73
— — орбитальный 13, 15, 42
— — полный 12
— — собственный 15, 73
УНК 94
Уравнения механики 15–17
Ускорители 34–37, 93–95
— со встречными пучками (коллайдеры) 37, 44, 85, 93–95

Установка ЛЗ 93
Установки UA1, UA2 85–91

Фейнмановские диаграммы 62–65
Ферми Э. 24
Фермионы 24, 41, 55, 62
— фундаментальные 53–55, 78
ФНАЛ 85
Фотон 11, 20, 61–66, 84
Фундаментальные силы 30, 33

Хиггс П. 93
Хоумстейк 118

Цвет 48–51
ЦЕРН 85

Чармоний 44, 55
Частицы векторные 47
— виртуальные 61–66, 81, 82
— истинно нейтральные 38, 52
— очарованные 43, 44, 54
— поляризованные 72–76
— скалярные 93–95
— странные 42, 54, 59
— тензорные 105
— элементарные 9, 33, 52, 56
Четность 47, 74, 79

Эйнштейн А. 15
Эксперименты UA1–UA6 85–91
— нейтринные 79
Электрический заряд 9, 44, 64
— — кварков 40, 44, 45
Электрон 9, 10, 21–33, 37–39
Электрон-вольт 21, 22
Энергетические уровни 26, 44
Энергия 12, 16, 20, 33
— кинетическая 13, 16, 20–27
— покоя 16, 20, 21, 27
— полная 16
— потенциальная 21–23, 26
— связи 22, 26–29, 32
— — электрона в атоме 26
— фотона 16, 28

Ю кава Х. 64	KEKB 115
Я дерные γ -кванты 12, 29	LEP 112
— осколки 29	LHC 112
— реакции 27–29, 32	
Ядро атома 9, 10, 27, 32, 34	PEP II 115
BaBar 115	SLAC 115
Belle 115	SNO 116
	SSC 112
KamLAND 118	
KEK 118	WMAP 121

Учебное издание

ОКУНЬ Лев Борисович

**ЭЛЕМЕНТАРНОЕ ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ**

Редактор *Е.С. Артоболевская*
Оригинал-макет: *Д.В. Горбачев*
Оформление переплета: *Н.В. Гришина*

Подписано в печать . Формат 60×90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 8. Уч.-изд. л. 8. Тираж экз.
Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fm1sale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>