

# 43

## Элементарные частицы

В этой заключительной главе мы расскажем об увлекательной области современной физики – физике *элементарных частиц*, в которой находят свое отражение современные представления о строении вещества.

Уже после второй мировой войны было обнаружено, что если в ядерной реакции налетающая частица обладает достаточной энергией, то при этом могут рождаться новые типы частиц. Для получения частиц с высокой энергией были построены различные типы ускорителей частиц (см., например, разд. 28.8). Как правило, они используются для ускорения протонов или электронов, но некоторые установки позволяют ускорять и тяжелые ионы. Ускорители частиц высоких энергий используются для более глубокого проникновения в детали строения атомных ядер, для определения и исследования свойств новых частиц, а также для получения новой информации о фундаментальных взаимодействиях и частицах вещества.

### 43.1. Частицы высоких энергий

Ускоренные до высоких энергий частицы служат инструментом изучения внутренней структуры ядер, с которыми они сталкиваются. Чем больше энергия «снарядов», тем больше деталей они позволяют обнаружить. Длина волны налетающих частиц, согласно формуле де Бройля, равна

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (43.1)$$

откуда видно, что, чем больше импульс налетающей частицы, тем меньше длина волны и, следовательно, тем больше деталей удастся различить. Как отмечалось в гл. 37, предел разрешающей способности определяется длиной волны. Именно поэтому в последние годы вступают в строй ускорители все более высоких энергий.

**Пример 43.1.** Для исследования распределения электрического заряда в ядре используются электроны очень высоких энергий. (Электроны обладают тем преимуществом перед протонами, что участ-

вуют только в электромагнитных взаимодействиях и не участвуют в сильном взаимодействии.) Эксперименты, проведенные на Станфордском линейном ускорителе с помощью электронов с энергией 1,3 ГэВ,

позволили получить для ядра висмута распределение заряда, изображенное на рис. 43.1. Какая разрешающая способность была достигнута в этом эксперименте, т. е. какими были размеры самых мелких различимых деталей?

**Решение.** Энергия 1,3 ГэВ = 1300 МэВ примерно в 2500 раз больше выраженной в единицах энергии массы покоя электрона. Ясно, что в этом случае мы имеем дело с релятивистскими скоростями. Нетрудно показать, что скорость электрона



**Рис. 43.1.** Распределение электрического заряда в ядре висмута (по данным зондирования с помощью электронов с энергией 1,3 ГэВ).

почти равна  $c = 3,0 \cdot 10^8$  м/с. [Действительно, по формуле (39.10) кинетическая энергия электрона равна  $mc^2 - m_0c^2 \approx mc^2$ , а по формуле (39.13)  $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4 \approx p^2c^2$ , так как величина  $m_0c^2$  мала по сравнению с  $pc$ . Следовательно,  $p^2c^2 = m^2v^2c^2 \approx m^2c^4$ , откуда  $v \approx c$ .] Учитывая это, получаем

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{h}{mc} = \frac{hc}{mc^2},$$

где  $mc^2 = 1,3$  ГэВ. Таким образом,

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{(6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с})(3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с})}{(1,3 \cdot 10^9 \text{ эВ})(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ})} = \\ &= 0,96 \cdot 10^{-15} \text{ м}, \end{aligned}$$

или 0,96 фм (1 фм =  $10^{-15}$  м = 1 фемтометр, или 1 ферми в честь Энрико Ферми). Это несколько меньше размеров ядер. Обратите внимание на то, что на рис. 43.1 распределение заряда почти постоянно внутри ядра, однако его граница оказывается размытой. Эксперименты по рассеянию электронов с еще большими энергиями на протонах и нейтронах обнаружили у них наличие внутренней структуры, которая свидетельствует о том, что нуклоны состоят из еще более мелких частиц.

Мы увидим, что ускоренные до высоких энергий частицы используются не только для исследования структуры ядра, но и для получения новых типов частиц.

## 43.2. Зарождение физики элементарных частиц — частица Юкавы

В середине 30-х годов нашего века было установлено, что все атомы построены из нейтронов, протонов и электронов. Основными «кирпичиками мироздания» оказались не атомы, а протоны, нейтроны и электроны. Помимо этих трех *элементарных частиц*, как их можно назвать, было известно и несколько других: позитрон (частица с зарядом, противоположным по знаку заряду электрона), нейтрино и  $\gamma$ -квант (фотон), т. е. всего шесть элементарных частиц.

Оглядываясь назад, следует отметить, что в 1935 г. все выглядело очень просто. Но в последующие десятилетия были открыты сотни других субъядерных частиц. Изучением их свойств и взаимодействий, а также выяснением того, какие из них следует считать фундаментальными, или «элементарными», и стала заниматься область

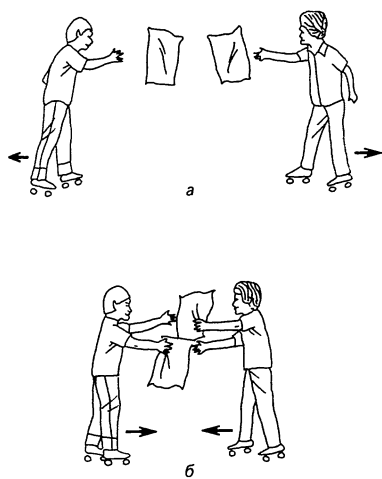


Рис. 43.2. Силы, эквивалентные обмену частицами. *а*—сила отталкивания (дети бросают друг в друга подушки); *б*—сила притяжения (дети вырывают друг у друга подушки).

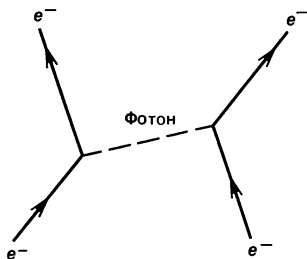


Рис. 43.3. Диаграмма Фейнмана, показывающая, как фотон действует в качестве переносчика электромагнитного взаимодействия между двумя электронами.

физики, получившая название **физики элементарных частиц**.

Начало физике элементарных частиц в том виде, в каком она существует сегодня, было положено в 1935 г., когда японский физик Хидеки Юкава (1907–1981) предсказал существование новой частицы, которая могла быть своего рода переносчиком сильного взаимодействия. Чтобы понять идею Юкавы, обратимся сначала к электромагнитному взаимодействию. Еще при первом знакомстве с электричеством мы обратили внимание на то, что электрическая сила действует на расстоянии. Чтобы лучше представить себе, каким образом сила может действовать на расстоянии, Фарадей, как известно, ввел понятие *поля*. Можно сказать, что сила, с которой одна заряженная частица действует на другую, обусловлена электрическим полем, создаваемым первой частицей. Аналогичным образом магнитное поле является переносчиком магнитных сил. Затем в гл. 33 было показано, что электромагнитные поля могут распространяться в виде волн в пространстве. Наконец, в гл. 40 мы увидели, что электромагнитное излучение (свет) можно рассматривать либо как волну, либо как поток частиц, называемых фотонами. Вследствие этого корпускулярно-волнового дуализма можно считать, что электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами обусловлено 1) электромагнитным полем одной частицы, действующей на другую частицу, или 2) обменом фотонами, или  $\gamma$ -квантами, между частицами. Для нас представляет интерес второй подход. На рис. 43.2 изображен наглядный пример того, как в результате обмена частицами может возникнуть взаимодействие. На рис. 43.2, *а* дети бросают друг в друга подушки. Поймав брошенную ему подушку, мальчик откатывается назад. Это иллюстрация силы отталкивания. Если же дети пытаются вырвать подушки друг у друга, то каждый из них тянет своего партнера к себе. Это иллюстрация силы притяжения. При электромагнитном взаимодействии двух заряженных частиц между ними происходит обмен фотонами, которым и обусловлено взаимодействие. На рис. 43.3 изображена простая диаграмма, описывающая этот процесс. Такие диаграммы называются *диаграммами Фейнмана*, а основанная на них теория — *квантовой электродинамикой (КЭД)*. На рис. 43.3 показан простейший случай: обмен одним фотоном. Одна из заряженных частиц испускает фотон и испытывает вследствие этого некоторую отдачу, а вторая частица поглощает фотон. При таком столкновении, или *взаимодействии*, происходит передача энергии и импульса от одной частицы к другой, и их «переносчиком» служит фотон. Так как фотон поглощается второй частицей через очень короткий промежуток времени после испускания первой частицей, он ничем не обнаруживает себя, и поэтому его называют *виртуальным* в отличие от реаль-

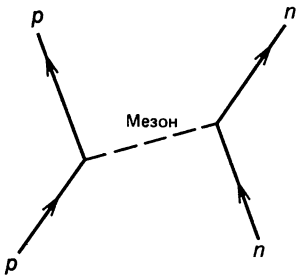


Рис. 43.4. Обмен мезоном при сильном ядерном взаимодействии протона и нейтрона.

ных свободных фотонов, которые могут быть зарегистрированы приборами.

Но вернемся к предсказанию Юкавы. Исходя из аналогии с обменом фотонов, которым обусловлено электромагнитное взаимодействие, Юкава высказал предположение о существовании частицы, служащей переносчиком сильного взаимодействия, т. е. силы, которая удерживает нуклоны внутри ядра. Подобно тому как фотон служит квантом электромагнитного поля (взаимодействия), частицу Юкавы можно рассматривать как квант поля сильного (ядерного) взаимодействия.

Юкава предсказал, что эта новая частица должна иметь массу, промежуточную между массами электрона и протона. Поэтому она получила название *мезон*, что означает «промежуточный». На рис. 43.4 изображена диаграмма Фейнмана для случая обмена мезоном. Грубую оценку массы мезона можно получить следующим образом. Предположим, что протон в левой части диаграммы Фейнмана на рис. 43.4 покоится. Чтобы испустить мезон, протону необходима энергия (эквивалентная массе мезона), которую неоткуда взять; процесс испускания мезона противоречит закону сохранения энергии. Однако принцип неопределенности допускает нарушение закона сохранения энергии на величину  $\Delta E$ , если оно длится по времени  $\Delta t$ , где  $(\Delta E)(\Delta t) \approx h/2\pi$ . Положим величину  $\Delta E$  равной энергии, отвечающей массе мезона  $m$ :  $\Delta E = mc^2$ . Тогда закон сохранения энергии будет нарушаться столь долго, сколько существует мезон, а это время  $\Delta t$ , необходимое мезону для перехода от одного нуклона к другому. Если предположить, что мезон движется с релятивистской скоростью, близкой к скорости света  $c$ , то  $\Delta t$  будет порядка  $d/c$ , где  $d$  — максимальное расстояние, на котором взаимодействуют нуклоны. Следовательно,

$$\Delta E \Delta t \approx \frac{h}{2\pi},$$

$$mc^2 \left( \frac{d}{c} \right) \approx \frac{h}{2\pi},$$

или

$$mc^2 \approx \frac{hc}{2\pi d}. \quad (43.2)$$

Радиус действия ядерных сил (сильного взаимодействия) составляет примерно  $1,5 \cdot 10^{-15}$  м (это — наибольшее расстояние, на котором ощущается сильное взаимодействие), поэтому

$$\begin{aligned} mc^2 &\approx \frac{(6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с})(3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с})}{(6,28)(1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м})} \approx \\ &\approx 2,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 130 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Таким образом, масса предсказанного Юкавой мезона составляет по весьма грубой оценке  $130 \text{ МэВ}/c^2$ , или примерно в 250 раз больше массы электрона ( $0,51 \text{ МэВ}/c^2$ ). [Заметим, кстати, что, поскольку электромагнитное взаимодействие проявляется на любом расстоянии ( $d = \infty$ ), из формулы (43.2) следует, что частица, обменом которой обусловлено электромагнитное взаимодействие (т. е. фотон), имеет нулевую массу покоя.]

Фотоны не только осуществляют электромагнитное взаимодействие, но и наблюдаются в качестве свободных частиц. Поэтому можно было ожидать, что и мезоны удастся наблюдать непосредственно. Мезон искали в космическом излучении, приходящем на Землю от Солнца и других источников во Вселенной. В 1937 г. была открыта новая частица с массой  $106 \text{ МэВ}$  (в 207 раз больше массы электрона). Эта масса мало отличалась от предсказанного значения. Но оказалось, что новая частица, получившая название *мю-мезон* (или *мюон*), не обнаруживает сильного взаимодействия с веществом, а частица, не участвующая в сильном (ядерном) взаимодействии, едва ли может служить переносчиком такого взаимодействия. Таким образом, мюон, который может иметь как положительный, так и отрицательный заряд, в действительности представляет собой просто очень тяжелый электрон, а не частицу Юкавы.

Предсказанная Юкавой частица была в конце концов открыта в 1947 г. Она получила название *пи-мезон* (или *пион*). У этой частицы имеются три зарядовых состояния:  $+$ ,  $-$  или  $0$ ;  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезоны имеют массу  $139,6 \text{ МэВ}/c^2$ , а  $\pi^0$ -мезон — массу  $135,0 \text{ МэВ}/c^2$ . Все три пиона сильно взаимодействуют с веществом. Вскоре после открытия пионов в космических лучах они были получены в лаборатории на ускорителе. Наблюдались реакции



Ускоренный протон должен обладать энергией, достаточной для создания дополнительной массы пиона. В последующие годы был открыт ряд других мезонов, которые также считались переносчиками сильного взаимодействия. (В современной теории — квантовой хромодинамике, основанной на кварковой структуре, мезоны уступили свою роль переносчиков сильного взаимодействия глюонам; разд. 43.9.)

До сих пор мы рассматривали частицы, которые обеспечивали электромагнитное и сильное взаимодействия. Но в природе известно четыре фундаментальных взаимодействия, или четыре типа сил. Как же обстоит дело с двумя другими взаимодействиями: слабым и гравитационным? Интуитивно мы убеждены, что и эти взаимодействия переносятся частицами. Частицы, ответственные

Таблица 43.1. Четыре фундаментальных взаимодействия

Взаимодействие	Относительная интенсивность (приближенно)	Квант поля
Сильное	1	Мезоны/глюоны <sup>1)</sup>
Электромагнитное	$10^{-2}$	Фотон
Слабое	$10^{-13}$	$W^+$ и $Z^0$
Гравитационное	$10^{-40}$	Гравитон(?)

<sup>1)</sup> См. разд. 43.9.

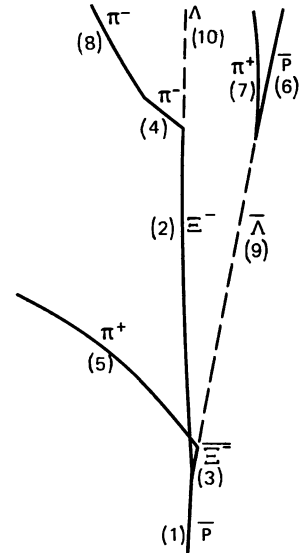
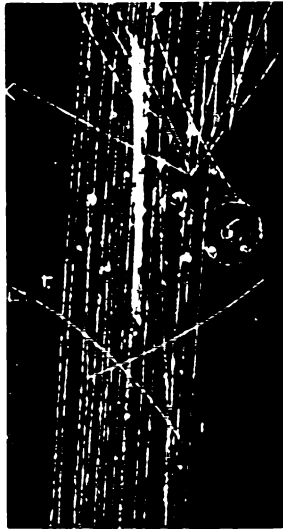
за слабое взаимодействие, получили названия  $W^+$ -,  $W^-$  и  $Z^0$ -частиц. После интенсивных поисков, в начале 1983 г., о долгожданном открытии  $W$ -частицы объявил Карло Руббиа. Он является одним из инициаторов строительства протон-антипротонного коллайдера на ускорителе сверхвысоких энергий – суперсинхротроне в ЦЕРНе<sup>1)</sup> (Женева), где и были получены результаты, а также руководит большой группой исследователей (более 100), осуществивших проект. Квант гравитационного поля, получивший название *гравитон*, пока экспериментально не обнаружен. Для сравнения в табл. 43.1 перечислены все четыре фундаментальных взаимодействия в порядке ослабления их интенсивности. Обратите внимание на то, что, хотя в повседневной жизни гравитация вполне ощутима (из-за огромной массы Земли), в масштабах ядра гравитационное взаимодействие оказывается самым слабым, и его влиянием в этом случае почти всегда можно пренебречь.

### 43.3. Частицы и античастицы

Позитрон, как мы уже знаем, по существу, представляет собой положительно заряженный электрон. Иначе говоря, многие свойства позитрона, например масса, такие же, как у электрона, а знак электрического заряда противоположен заряду электрона. Позитрон называют **античастицей** электрона. После открытия позитрона в 1932 г. существование античастиц было предсказано и у других частиц. В 1955 г. была обнаружена античастица протона – *антипротон*  $\bar{p}$  (рис. 43.5). (Черточка над  $p$  обозначает античастицу.) Для рождения такой массивной частицы (масса антипротона равна массе протона) необходимо большое количество энергии. Открытие антипротона (принадлежащее Э. Сегре и О. Чемберлену) произошло после завершения строительства большого ускорителя (бэватрона) в Калифорнийском университете в Беркли.

<sup>1)</sup> ЦЕРН – сокращенное название Европейского центра ядерных исследований.

Рис. 43.5. На снимке, полученном с помощью пузырьковой камеры на жидком водороде, столкновение антипротона  $\bar{p}$  с протоном приводит к образованию пары гиперонов ( $\bar{p} + p \rightarrow \Xi + \Xi^-$ ) с последующим распадом на другие частицы. На схеме каждый трек отождествлен с соответствующей частицей. Треки нейтральных частиц показаны штриховыми линиями, так как при пролете нейтральных частиц пузырьки не образуются. (Воспроизводится с разрешения Брукхейвенской национальной лаборатории, США.)



Вскоре затем был открыт антинейтрон  $\bar{n}$ . Большинство других частиц также имеют античастицы. Но у фотона,  $\pi^0$ -мезона и еще нескольких частиц не существует отличных от них античастиц. Можно сказать, что они тождественны своим античастицам.

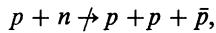
Античастицы рождаются в ядерных реакциях при достаточно больших энергиях, но в веществе они живут очень недолго. Например, при столкновении позитрона и электрона они аннигилируют друг с другом. Их масса (в пересчете на энергию) и кинетическая энергия превращаются в энергию  $\gamma$ -квантов или других частиц. Аннигиляция происходит у всех пар частица – античастица.

## 43.4. Взаимодействия частиц и законы сохранения

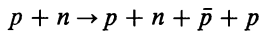
Одним из важных применений ускорителей частиц высоких энергий является исследование взаимодействий элементарных частиц. Неоценимую помощь в классификации субъядерных частиц оказывают законы сохранения. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и электрического заряда строго выполняются при всех взаимодействиях частиц. (Хотя принцип неопределенности допускает, например, несохранение энергии на величину  $\Delta E$  в течение промежутка времени  $\Delta t \approx h/2\pi\Delta E$ , однако такие промежутки времени лежат далеко за пределами возможности экспериментального наблюдения, и нарушение закона сохранения энергии никогда не обнаруживалось.)

Исследование взаимодействий частиц позволило установить ряд новых законов сохранения; некоторые из них

мы сейчас обсудим. Новые законы сохранения (как и прежние) играют важную роль: они помогают объяснить, почему одни реакции происходят, а другие нет. Например, никогда не наблюдалась реакция

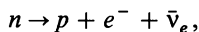


хотя заряд, энергия и другие величины в ней сохраняются ( $\bar{p}$  обозначает антипротон; перечеркнутая стрелка означает, что реакции не происходит). Физики для объяснения высказали гипотезу о существовании нового закона сохранения — закона сохранения «**барионного заряда**» (барионный заряд означает то же самое, что и число нуклонов, которое сохраняется, как мы видели, в ядерных реакциях). В связи с новым законом было сделано предположение о том, что барионный заряд всех нуклонов равен  $+1$  ( $B = +1$ ), а антинуклонов (антипротонов, антинейтронов) равен  $-1$  ( $B = -1$ ). В записанной выше реакции барионный заряд не сохраняется, так как в левой части  $B = (+1) + (+1) = +2$ , а в правой  $B = (+1) + (+1) + (-1) = +1$ . В то же время в реакции



барионный заряд *сохраняется*, и эта реакция действительно происходит, если налетающий протон обладает достаточно большой энергией: в левой части  $B = +1 + +1 = +2$ , в правой  $B = +1 + +1 - 1 + +1 = +2$ , т. е. барионный заряд до и после реакции равен  $+2$ . Эта и другие реакции продемонстрировали сохранение барионного заряда в качестве одного из основных законов физики.

Не менее полезные законы сохранения «зарядов» связаны со слабыми взаимодействиями, главным образом с распадами. При обычном  $\beta$ -распаде наряду с электроном или позитроном испускается нейтрино или антинейтрино. В распаде аналогичного типа вместо электрона испускается мюон. Оказалось, что нейтрино, возникающее при распаде с испусканием электрона ( $\nu_e$ ), отличается от нейтрино, сопровождающего распад с испусканием мюона ( $\nu_\mu$ ). У каждого из двух типов нейтрино существует античастица:  $\bar{\nu}_e$  и  $\bar{\nu}_\mu$ . Например, при обычном  $\beta$ -распаде



но никогда не бывает распада  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_\mu$  или  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e + \nu_e$ . Чтобы объяснить, почему две последние реакции не происходят, было введено понятие «электронный лептонный заряд»  $L_e$ . Если у электрона  $e^-$  и электронного нейтрино  $\nu_e$  электронный лептонный заряд  $L_e = +1$ , у позитрона  $e^+$  и электронного антинейтрино  $\bar{\nu}_e$   $L_e = -1$ , а у остальных частиц  $L_e = 0$ , то во всех наблюдаемых распадах  $L_e$  сохраняется. Например, в распаде  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  до распада  $L_e = 0$ , а после распада  $L_e = 0 + (+1) + (-1) = 0$ . Распады, в которых лептонный заряд не сохранялся бы, а все остальные законы сохране-



ния были бы выполнены, не наблюдались. Поэтому считается, что  $L_e$  сохраняется во всех взаимодействиях.

В распадах с участием мюонов, например

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

сохраняется еще одно квантовое число — «мюонный лептонный заряд»  $L_\mu$ . У мюона  $\mu^-$  и мюонного нейтрино  $\nu_\mu$  мюонный лептонный заряд  $L_\mu = +1$ , у  $\mu^+$  и  $\bar{\nu}_\mu$  лептонный заряд  $L_\mu = -1$ , и у остальных частиц  $L_\mu = 0$ . Считается, что  $L_\mu$  также сохраняется во всех взаимодействиях или распадах. Аналогичное справедливо и в отношении третьего лептонного заряда  $L_\tau$ , связанного со сравнительно недавно открытым  $\tau$ -лептоном и его нейтрино  $\nu_\tau$ .

Следует иметь в виду, что античастицы отличаются от частиц противоположным знаком не только электрического, но и других зарядов:  $B$ ,  $L_e$ ,  $L_\mu$  и  $L_\tau$ .

**Пример 43.2.** Какие схемы мюонного распада возможны:

- а)  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ ;    б)  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ ;  
 в)  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e$ ?

**Решение.** У  $\mu^-$ -мюона  $L_\mu = +1$ ,  $L_e = 0$ . Это начальное состояние (до распада). Следовательно, в конечном состоянии (после распада) лептонные заряды должны иметь те же значения:  $L_\mu = +1$ ,  $L_e = 0$ . В результате распада «а» в конечном со-

стоянии  $L_\mu = 0 + 0 = 0$ ,  $L_e = +1 - 1 = 0$ ; следовательно, мюонный лептонный заряд не сохраняется; такой распад действительно не наблюдался. В результате распада «б» в конечном состоянии  $L_\mu = 0 + 0 + 1 = +1$ ,  $L_e = +1 - 1 + 0 = 0$ , т. е. оба лептонных заряда сохраняются. И это — один из наиболее распространенных распадов  $\mu^-$ -мюона. Распад «в» не происходит из-за несохранения электронного лептонного заряда  $L_e$  (в конечном состоянии  $L_e = +2$ ).

Последние теоретические работы показывают, что законы сохранения барионного и лептонных зарядов могут выполняться не точно, а лишь приближенно, о чем мы расскажем в разд. 43.10.

## 43.5. Классификация частиц

За десятилетия после открытия в конце 40-х годов  $\pi$ -мезона было обнаружено много других субъядерных частиц. Ныне их насчитывается не одна сотня. Была проделана огромная теоретическая и экспериментальная работа, чтобы понять причину происхождения такого количества частиц. Один из путей состоит в классификации частиц, т. е. в распределении их по категориям в соответствии с их свойствами. Один из способов классификации основан на взаимодействиях частиц, поскольку не все частицы участвуют в четырех фундаментальных взаимодействиях. В табл. 43.2 представлены многочисленные стабильные (или «долгоживущие») частицы, классифицированные по взаимодействиям и другим свойствам. *Фотон* участвует

Таблица 43.2. Элементарные частицы (стабильные, или «долгоживущие»)¹)

Тип частицы	Название частицы	Обозначение	Анти-частица	Масса покоя, $B$ МэВ/ $c^2$	$I_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	$S$	Время жизни, с	Основные типы распада	
Фотон	Фотон	$\gamma$	$\gamma$	0	0	0	0	0	Стабилен		
Лептоны	Электрон	$e^-$	$e^+$	0,511	0	+1	0	0	Стабилен		
	Электронное нейтрино	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0(?)	0	+1	0	0	Стабилен		
	Мюон	$\mu^-$	$\mu^+$	105,7	0	0	+1	0	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$	
	Мюонное нейтрино	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0(?)	0	0	+1	0	Стабиленно		
	$\tau$ -лептон	$\tau^-$	$\tau^+$	1784,0	0	0	0	-1	$< 4 \times 10^{-13}$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ , $e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ , $\nu_\tau$ , адроны	
	$\tau$ -нейтрино	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	0(?)	0	0	0	-1	Стабиленно		
Адроны	Мезоны	Пион	$\pi^+$ $\pi^0$	$\pi^-$ $\pi^0$	139,6 135,0	0 0	0 0	0 0	0 0	$2,60 \cdot 10^{-8}$ $0,83 \times 10^{-16}$	$\mu^+ \nu_\mu$ $2\gamma$
		Каон	$K^+$	$K^-$	493,7	0	0	0	0	+1	$1,24 \cdot 10^{-8}$
	$K_S^0$		$\bar{K}_S^0$	497,7	0	0	0	0	+1	$0,89 \times 10^{-10}$	$\pi^+ \pi^-$ , $2\pi^0$
		$K_L^0$	$\bar{K}_L^0$	497,7	0	0	0	0	+1	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ e^\pm \bar{\nu}_e$ , $\pi^\pm \mu^\pm \bar{\nu}_\mu$ , $3\pi^0$
Барионы	$\eta$ -мезон	$\eta^0$	$\eta^0$	548,8	0	0	0	0	0	$< 10^{-18}$	$2\gamma, 3\pi$
	Протон	$p$	$\bar{p}$	938,3	+1	0	0	0	0	Стабилен²)	
	Нейтрон	$n$	$\bar{n}$	939,6	+1	0	0	0	0	920	$p e^- \bar{\nu}_e$
	Лямбда	$\Lambda^0$	$\bar{\Lambda}^0$	1115,6	+1	0	0	0	-1	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$p \pi^-, n \pi^0$
	Сигма	$\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^-$	1189,4	+1	0	0	0	-1	$0,80 \times 10^{-10}$	$p \pi^0, n \pi^+$
		$\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^0$	1192,5	+1	0	0	0	-1	$6 \cdot 10^{-20}$	$\Lambda^0 \gamma$
		$\Sigma^-$	$\bar{\Sigma}^+$	1197,3	+1	0	0	0	-1	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$n \pi^-$
	Кси	$\Xi^0$	$\bar{\Xi}^0$	1315	+1	0	0	0	-2	$2,9 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \pi^0$
$\Xi^-$		$\bar{\Xi}^+$	1321	+1	0	0	0	-2	$1,64 \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 \pi^-$	
Омега	$\Omega^-$	$\bar{\Omega}^+$	1672	+1	0	0	0	-3	$0,82 \times 10^{-10}$	$\Xi^0 \pi^0$ , $\Lambda^0 K^-$	

¹) См. также табл. 43.4.

²)  $> 6 \cdot 10^{32}$  лет.

только в электромагнитном взаимодействии и сам по себе образует отдельный класс. **Лептоны**—это частицы, не участвующие в сильном взаимодействии, но участвующие в слабом взаимодействии (и еще более слабом гравитационном взаимодействии); заряженные лептоны помимо этого участвуют в электромагнитном взаимодействии. В число четырех хорошо изученных лептонов входят электрон, мюон и два типа нейтрино—электронное нейтрино  $\nu_e$  и мюонное нейтрино  $\nu_\mu$ . У каждого из четырех лептонов существует античастица (табл. 43.2). После открытия еще одного лептона— $\tau$ -лептона—и его нейтрино  $\nu_\tau$ , число лептонов увеличилось до шести.

Третий класс частиц образуют **адроны**. Так называют частицы, которые участвуют в сильном ядерном взаимодействии (само название «адроны» означает **сильно взаимодействующие частицы**). Адроны взаимодействуют также благодаря другим типам сил, но на малых расстояниях преобладает сильное взаимодействие. К адронам относятся нуклоны, пионы и много других частиц. Адроны подразделяются на две подгруппы<sup>1)</sup>: **барионы** (частицы с барионным зарядом  $+1$  или  $-1$ , если речь идет об античастицах) и **мезоны** (частицы с барионным зарядом  $0$ ).

Обратите внимание на то, что барионы  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$  и  $\Omega$  распадаются на барионы с меньшей массой и в конечном счете на протоны и нейтроны. Во всех таких распадах барионный заряд сохраняется. Так как более легкого бариона, чем протон ( $B = +1$ ), не существует, протон не может распадаться (если барионный заряд строго сохраняется) и поэтому стабилен (разд. 43.10).

## 43.6. Стабильность частиц и резонансы

В табл. 43.2 перечислены либо стабильные, либо долгоживущие частицы (с временем жизни  $\gtrsim 10^{-19}$  с). Время жизни нестабильных частиц зависит от природы взаимодействия, вызывающего ее распад. Мы говорили, что электромагнитное взаимодействие слабее сильного. Под этим имелось в виду, что при сильном взаимодействии обмен между частицами происходит быстрее и чаще,

<sup>1)</sup> Первоначально частицы подразделялись в соответствии с их массой на лептоны («легкие» частицы), барионы («тяжелые» частицы) и частицы с промежуточной массой—мезоны («средние» частицы). Новая классификация частиц в соответствии с их взаимодействием почти соответствует старой классификации. Однако мюон теперь называется лептоном (так как он не участвует в сильном взаимодействии, хотя раньше назывался мю-мезоном из-за своей массы). Еще одним исключением являются  $\psi$ -частицы: они очень тяжелые, но имеют нулевой барионный заряд, поэтому их классифицируют как мезоны (разд. 43.8).

чем при электромагнитном взаимодействии. Если распад обусловлен сильным взаимодействием, то время жизни частицы оказывается очень малым. Например, при распаде, обусловленном слабым взаимодействием, время жизни частицы составляет  $10^{-10}$  с или больше. При распаде за счет электромагнитного взаимодействия времена жизни частиц оказываются гораздо короче — обычно от  $10^{-16}$  до  $10^{-19}$  с. Нестабильные частицы, перечисленные в табл. 43.2, распадаются за счет либо слабого, либо электромагнитного взаимодействия: распады с образованием  $\gamma$ -кванта (фотона) происходят за счет электромагнитного взаимодействия, остальные — за счет слабого взаимодействия (обратите внимание на времена жизни).

Оказалось, что большое число частиц распадается за счет сильного взаимодействия. Эти частицы в табл. 43.2 не указаны. Они распадаются на другие сильно взаимодействующие частицы (например,  $\pi$ ,  $p$ ,  $n$ , но не  $\gamma$ ,  $e$  и т. д.) и имеют очень короткие времена жизни — обычно порядка  $10^{-23}$  с. Времена жизни этих частиц настолько малы, что частицы не успевают пройти достаточное расстояние, чтобы их удалось зарегистрировать до того, как они распадутся. Однако удается зарегистрировать продукты их распада и по ним судить об этих короткоживущих частицах. Чтобы представить, как это делается, напомним историю открытия Ферми первой из таких частиц. В эксперименте Ферми пучок  $\pi^+$ -мезонов, энергию которых можно было изменять в определенных пределах, направлялся на водородную (протонную) мишень. Зависимость числа рассеянных  $\pi^+$ -мезонов от их кинетической энергии изображена на рис. 43.6. Большой максимум в окрестности 200 МэВ оказался гораздо выше, чем ожидалось, и выше числа взаимодействий при близких энергиях. Это привело Ферми к заключению, что  $\pi^+$ -мезон и протон, прежде чем разлететься, образуют короткоживущую частицу или по крайней мере успевают совершить несколько колебаний как бы в резонансе. Максимум на рис. 43.6 действительно напоминает резонанс-

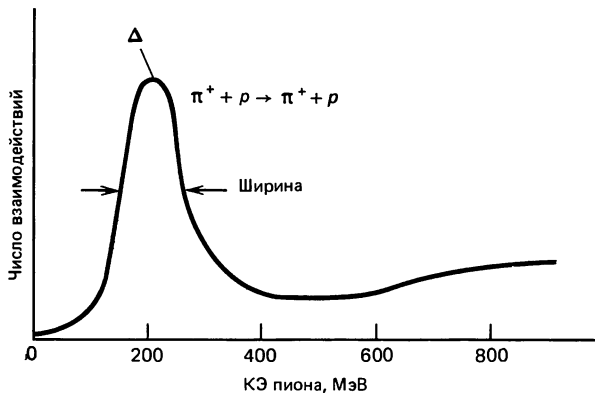


Рис. 43.6. Число пионов  $\pi^+$ , рассеянных на протонной мишени, как функция кинетической энергии (КЭ) налетающих пионов  $\pi^+$

ную кривую (рис. 14.13 и 32.8), и эту новую «частицу» (обозначенную  $\Delta$ ) стали называть **резонансом**. Аналогичным образом были обнаружены сотни других резонансов. Многие резонансы представляют собой возбужденные состояния других частиц, таких как нуклон.

Ширина резонансов (ширина  $\Delta$  на рис. 43.6 составляет примерно 100 МэВ) служит интересной иллюстрацией принципа неопределенности Гейзенберга. Если время жизни частицы составляет лишь  $10^{-23}$  с, то неопределенность в ее массе (т.е. энергии покоя) будет порядка  $\Delta E \approx \hbar/2\pi\Delta t = (6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}) / (6)(10^{-23} \text{ с}) \approx 10^{-11} \text{ Дж} \approx 100 \text{ МэВ}$ , что согласуется с наблюдаемой шириной резонанса. В действительности решают обратную задачу: оценивают времена жизни резонансов ( $\approx 10^{-23}$  с) по их ширине ( $\sim 100 \text{ МэВ}$ ).

## 43.7. Странные частицы

В начале 50-х годов XX в. было обнаружено, что некоторые из незадолго до того открытых частиц, а именно  $K$ ,  $\Lambda$  и  $\Sigma$ , ведут себя странно в двух отношениях. Во-первых, они всегда рождаются парами. Например, реакция  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$

происходит с вероятностью, близкой к единице, а реакция  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$  никогда не наблюдалась. Это казалось тем более странным, что вторая реакция не нарушала ни одного из известных законов сохранения и для ее осуществления было достаточно энергии. Во-вторых, хотя рождение *странных частиц* (как их стали называть) было обусловлено сильным взаимодействием (т.е. происходило с большой вероятностью), их распады не имели характерного для сильного взаимодействия времени жизни, хотя они и распадались только на сильно взаимодействующие частицы (например,  $K \rightarrow 2\pi$ ,  $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$ ). Вместо величин порядка  $10^{-23}$  с, как следовало бы ожидать для частиц, распадающихся за счет сильного взаимодействия, времена жизни странных частиц оказались в пределах от  $10^{-10}$  до  $10^{-8}$  с, что характерно для слабого взаимодействия.

Для объяснения этих фактов были введены новое квантовое число **странность** и новый закон сохранения (странности). Если частицам приписать значение странности  $S$ , указанное в табл. 43.2, то легко объяснить рождение странных частиц парами: странность античастиц противоположна странности частиц и в паре частица–античастица у одного партнера  $S = +1$ , а у другого  $S = -1$  (табл. 43.2). Например, в реакции  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$  в начальном состоянии  $S = 0 + 0 = 0$  и в конечном состоянии  $S = +1 - 1 = 0$ , т.е. странность сохраняется. В реакции же  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$  в начальном состоянии  $S = 0$ ,

в конечном состоянии  $S = +1 + 0 = +1$ , т. е. странность не сохраняется, и эта реакция не происходит.

Для объяснения особенностей распада странных частиц предполагается, что странность сохраняется в сильном взаимодействии и *не сохраняется* в слабом взаимодействии. Следовательно, хотя закон сохранения запрещает распад странных частиц на более легкие нестранные частицы за счет сильного взаимодействия, такие распады могут происходить за счет слабого взаимодействия. Но слабые распады происходят гораздо медленнее, что соответствует большим временам жизни – от  $10^{-10}$  до  $10^{-8}$  с.

Сохранение странности оказалось первым примером «частично сохраняющейся» величины: странность сохраняется в сильном и не сохраняется в слабом взаимодействии.

## 43.8. Кварки и «очарование»

Почти все наблюдаемые частицы принадлежат одному из двух семейств: лептонам или адронам. Основное различие между ними состоит в том, что адроны участвуют в сильном взаимодействии, а лептоны не участвуют. Другое важное различие состояло в том, что в 60-х годах были известны только четыре лептона ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ) и более сотни адронов.

Лептоны считаются истинно элементарными частицами, так как они, насколько известно, не распадаются на составные части, не обнаруживают никакой внутренней структуры и не имеют поддающихся определению размеров. (Попытки определить размеры лептонов показали, что верхний предел составляет около  $10^{-18}$  м.)

С другой стороны, адроны оказались более сложными частицами. Эксперименты показывают, что адроны обладают внутренней структурой. И их обилие наводит на мысль, что адроны совсем не элементарны. Для решения этой проблемы М. Гелл-Манн и Г. Цвейг в 1963 г. независимо высказали идею, согласно которой все известные адроны не элементарны, а построены из трех более фундаментальных точечных объектов, названных **кварками**<sup>1)</sup>. Подобно лептонам, кварки представляют собой истинно элементарные частицы. Три «сорта» кварков были обозначены буквами *u*, *d* и *s* [от английских слов *up* (вверх), *down* (вниз) и *sideways* (в сторону) (*s* чаще сопоставляют слову *strange* – странный)]. Предполагается, что кварки имеют дробный электрический заряд (равный  $1/3$  или  $2/3$  заряда электрона, т. е. меньше заряда, который раньше считался минимальным). Другие свойства кварков

<sup>1)</sup> Гелл-Манн воспользовался фразой: «Три кварка для мастера Марка» – из романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану».

Таблица 43.3. Свойства кварков и антикварков

Название	Обозначение	Спин	Заряд	Барионный заряд	Странность	Очарование	<i>b</i> -свойство	<i>t</i> -свойство
Кварки								
<i>u</i> -кварк	<i>u</i>	$1/2$	$+2/3e$	$1/3$	0	0	0	0
<i>d</i> -кварк	<i>d</i>	$1/2$	$-1/3e$	$1/3$	0	0	0	0
Странный кварк	<i>s</i>	$1/2$	$-1/3e$	$1/3$	-1	0	0	0
Очарованный кварк	<i>c</i>	$1/2$	$+2/3e$	$1/3$	0	+1	0	0
<i>b</i> -кварк	<i>b</i>	$1/2$	$-1/3e$	$1/3$	0	0	+1	0
<i>t</i> -кварк (?)	<i>t</i>	$1/2$	$+2/3e$	$1/3$	0	0	0	+1
Антикварки								
<i>u</i> -антикварк	$\bar{u}$	$1/2$	$-2/3e$	$-1/3$	0	0	0	0
<i>d</i> -антикварк	$\bar{d}$	$1/2$	$+1/3e$	$-1/3$	0	0	0	0
Странный антикварк	$\bar{s}$	$1/2$	$+1/3e$	$-1/3$	+1	0	0	0
Очарованный антикварк	$\bar{c}$	$1/2$	$-2/3e$	$-1/3$	0	-1	0	0
<i>b</i> -антикварк	$\bar{b}$	$1/2$	$+1/3e$	$-1/3$	0	0	-1	0
<i>t</i> -антикварк	$\bar{t}$	$1/2$	$-2/3e$	$-1/3$	0	0	0	-1

приведены в табл. 43.3. Все известные в то время адроны теоретически можно было построить из кварков трех типов: *u*, *d* и *s*. Мезоны состоят из пар кварк-антикварк. Например,  $\pi^+$ -мезон представляет собой пару  $u\bar{d}$  (у нее, как и должно быть у  $\pi^+$ -мезона,  $Q = 2/3e + 1/3e = +1e$ ,  $B = 1/3 - 1/3 = 0$ ,  $S = 0 + 0 + 0$ ). С другой стороны,  $K^+ = u\bar{s}$  с  $Q = +1$ ,  $B = 0$ ,  $S = +1$ . Барионы состоят из трех кварков. Например, нейтрон  $n = ddu$ , а антипротон  $\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$ .

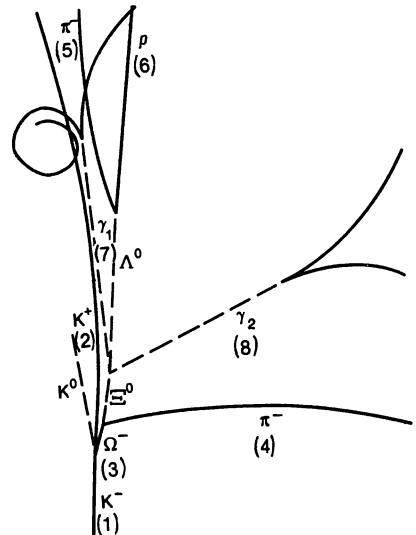
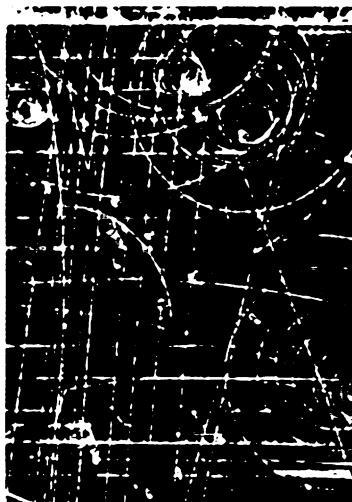
Вскоре после появления гипотезы кварков физики занялись поиском этих частиц с дробным зарядом. Хотя имеются косвенные экспериментальные доказательства их существования, непосредственно обнаружить кварки не удалось. Было высказано предположение, что кварки связаны очень сильно и не существуют в свободном состоянии (заклучены в адронах).

В 1964 г. ряд физиков высказал предположение о существовании четвертого кварка. Они основывались на глубокой симметрии природы, включая связь кварков и лептонов. Если существуют (как считали в 60-х годах) четыре лептона, то и кварков должно быть четыре. Четвертый кварк получил название *очарованный*. Его электрический заряд должен быть равен  $+2/3e$ . Кроме того,

четвертый кварк должен обладать еще одним свойством, отличающим его от трех остальных кварков. Это новое свойство, или квантовое число, было названо **очарованием** (или **чармом**) (табл. 43.3). Предполагалось, что очарование  $C$  ведет себя подобно странности: сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействиях и не сохраняется в слабом взаимодействии. У нового очарованного кварка  $C = +1$ , у его антикварка  $C = -1$ .

Между тем с точки зрения эксперимента необходимости в очарованном кварке не возникало. До 1974 г. все известные адроны удавалось объяснить комбинациями трех первоначально введенных кварков. Были известны адроны, соответствующие всем возможным комбинациям трех кварков и парам кварк-антикварк. Теория предсказала существование бариона  $\Omega^-$  ( $\Omega^- = sss$ ), который вскоре и был открыт (рис. 43.7). Но в 1974 г. две группы экспериментаторов независимо обнаружили новый тяжелый мезон. Этот новый мезон, называемый  $J/\psi$ -мезоном (часто просто  $\psi$ -мезоном), не укладывался в старую трехкварковую схему. Его масса  $3100 \text{ МэВ}/c^2$  значительно превышала массы всех известных мезонов; он не мог представлять собой возбужденное состояние более легкого мезона (на который он распался бы), так как в этом случае его время жизни было бы равно примерно  $10^{-23}$  с. Экспериментально измеренное время жизни  $J/\psi$ -мезона оказалось примерно в 1000 раз больше, т. е. около  $10^{-20}$  с. Вскоре стало ясно, что существование  $J/\psi$ -мезона можно объяснить с помощью очарованного кварка:  $J/\psi$  оказался комбинацией очарованного кварка и его антикварка  $c\bar{c}$ . Очарование  $J/\psi$ -мезона равно нулю ( $C = +1 - 1 = 0$ ), поэтому он может распадаться за счет сильного взаимодействия на адроны (например, на не-

Рис. 43.7. На снимке, полученном с помощью пузырьковой камеры на жидком водороде, показано образование отрицательно заряженного  $\Omega^-$ -бариона в результате взаимодействия  $K^-$ -мезона с протоном (ядром водорода) в пузырьковой камере. Справа — схема. (Воспроизводится с разрешения Брукхейвенской национальной лаборатории, США.)





сколько пионов,  $p\bar{p}$ ,  $\Lambda\bar{\Lambda}$  и т. д.). Такие распады действительно наблюдались. Время жизни  $J/\psi$ -мезона в 1000 раз больше, чем у других частиц, распадающихся за счет сильного взаимодействия. Теория объясняет это тем, что каждый из очарованных кварков  $c$  и  $\bar{c}$ , входящих в его состав, должен превратиться в кварки без очарования, из которых построены адроны, возникающие при распаде. Это превращение сильно уменьшает скорость распада, как утверждает модель с очарованным кварком.

Вскоре после открытия  $J/\psi$ -мезона был обнаружен аналогичный мезон, получивший название  $\psi'$ -мезон, с массой примерно  $3685 \text{ МэВ}/c^2$ . Были также открыты и другие мезоны семейства  $\psi$ , которые, как предполагается, все представляют собой связанные состояния  $c\bar{c}$ .

Хотя  $J/\psi$ -мезон и частицы из этого семейства сами не обладают явным очарованием, однако нет причин, по которым при распаде одной из  $c\bar{c}$ -комбинаций с большой массой не могли бы рождаться очарованные ( $c$   $c \neq 0$ ) мезоны. Иначе говоря, в результате распада кварка  $c$  и  $\bar{c}$  могут оказаться в различных частицах, сообщив им свое очарование  $+1$  или  $-1$ . В таких распадах должны возникать и другие кварки. Например, распад

$$\psi \rightarrow D^+ + D^-$$

можно записать в виде

$$\psi = c\bar{c} \rightarrow c\bar{c}d\bar{d} \rightarrow c\bar{d} + \bar{c}d.$$

На образование кварков  $d\bar{d}$  расходуется энергия; так как у кварка  $d$  и антикварка  $\bar{d}$  противоположные квантовые числа и электрические заряды, законы сохранения при этом не нарушаются: для образования этой пары кварк-антикварк необходима только энергия. Комбинация  $c\bar{d}$  с  $Q = +1$ ,  $B = 0$ ,  $S = 0$ ,  $C = +1$  получила название  $D^+$ -мезон, а комбинацию  $\bar{c}d$  считают его античастицей  $D^-$ -мезоном. Поиск этого мезона и его нейтрального аналога  $D^0$ -мезона увенчался успехом в 1977 г. Масса  $D^+$ -мезона оказалась равной  $1870 \text{ МэВ}/c^2$ . Последующие эксперименты показали, что существуют и очарованные барионы. Некоторые из новых частиц приведены в табл. 43.4.

Еще одним важным событием стало экспериментальное обнаружение  $\tau$ -лептона с массой  $1784 \text{ МэВ}/c^2$ . Этому лептону, так же как электрону и мюону, соответствует свое нейтрино. Таким образом, семейство лептонов в том виде, как оно сейчас известно, насчитывает шесть членов. Это нарушило бы симметрию между лептонами и кварками, которые рассматриваются как «кирпичи мироздания», если бы не два новых кварка. Физики-теоретики постулировали существование пятого и шестого кварков. Их назвали  $t$ - и  $b$ -кварками [от англ. top (верх) и bottom (низ)] за сходство с  $u$ - и  $d$ -кварками. [Некоторые предпочитают называть  $t$ -кварки *истинными* (от англ. truth), а  $b$ -кварки *красивыми* (от англ. beauty).] Соответственно новые свойства (квантовые числа), отличающие новые

Таблица 43.4. Некоторые андроны, связанные с очарованием и  $b$ -свойством ( $I_3 = I_4 = I_5 = 0$ )

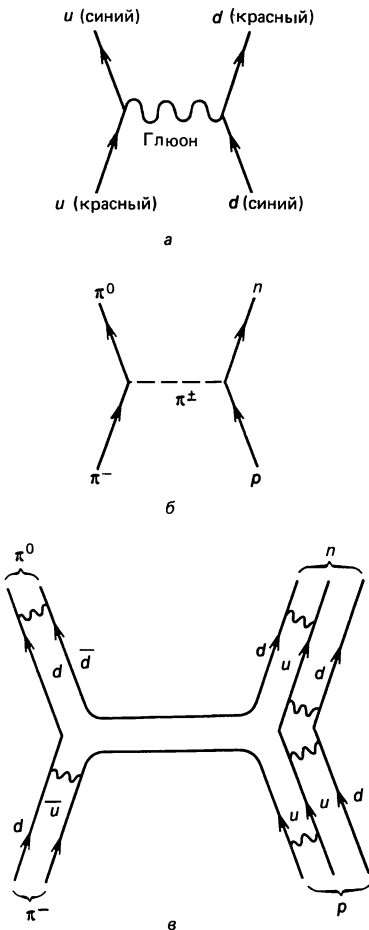
Тип андрона	Частица	Античастица	Масса покоя, МэВ/ $c^2$	Барионный заряд	Странность	Очарование	Время жизни, с	Основные типы распада
Мезоны	$D^+$	$D^-$	1869	0	0	+1	$9 \cdot 10^{-13}$	К + другие частицы, $e$ + другие частицы
	$D^0$	$\bar{D}^0$	1865	0	0	+1	$5 \cdot 10^{-13}$	К + другие частицы
	$F^+(D_s^+)$	$F^-(D_s^-)$	1969	0	+1	+1	$\sim 4 \cdot 10^{-13}$	ф $\pi$ , ф3 $\pi$
	$\psi(3685)$	$\equiv \psi$	3686	0	0	0	$\sim 3 \cdot 10^{-20}$	Адроны
	$J/\psi(3100)$	$\equiv J/\psi$	3097	0	0	0	$\sim 1 \cdot 10^{-20}$	Адроны
Барион	$\Upsilon$	$\equiv \Upsilon$	9460	0	0	0	$\sim 1 \cdot 10^{-20}$	$\tau^+ \tau^-$ , $\mu^+ \mu^-$ , $e^+ e^-$
	$\Lambda_c^+$	$\Lambda_c^-$	2280	+1	0	+1	$1 \cdot 10^{-13}$	Адроны

кварки от ранее известных, называются  $t$ - и  $b$ -свойством или истиной и красотой. Список новых частиц приведен в табл. 43.4. Новый  $\Upsilon$ -мезон с массой около 9400 МэВ/ $c^2$  физики считают комбинацией  $b\bar{b}$ -кварков. Имеются также доказательства существования «красивого» мезона (состоящего из одного  $b$ -кварка и кварка другого типа). Что касается  $t$ -кварка, то его существование пока экспериментально надежно не установлено. Предполагается, что частицы, содержащие  $t$ -кварк, имеют очень большую массу и для их рождения необходимы ускорители очень высоких энергий.

### 43.9. «Стандартная модель»: квантовая хромодинамика (КХД) и электрослабая теория

Вскоре после возникновения модели кварков было выдвинуто предположение, что кварки обладают еще одним свойством (или качеством), которое получило название **цвет**. Различия между пятью или шестью кварками  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $t$  (?) стали называть **ароматом**. Согласно существующим представлениям, каждый из ароматов кварка может иметь три цвета, обычно обозначаемых как красный, зеленый и синий. (Следует подчеркнуть, что названия свойств кварков «цвет» и «аромат» не имеют ничего общего с нашими зрительными или обонятельными ощущениями и явились причудой их авторов, как и другие термины в этой новой области, например «очарование».) Цвета антикварков называются соответственно антикрасным, антизеленым и антисиним. Барионы содержат три кварка — по одному каждого цвета; мезоны состоят из пары кварк-антикварк какого-либо цвета и соответ-

Рис. 43.8. *a* – переносчиком взаимодействия между двумя кварками, удерживающего их, например, в виде протона, служит глюон. Обмен глюоном приводит к изменению цвета; *b* – сильное взаимодействие  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  с обменом заряженным  $\pi$ -мезоном (+ или – в зависимости от того, куда он движется – влево или направо); *в* – кварковая модель того же взаимодействия  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ . Промежуточный пион ( $d\bar{u}$  или  $\bar{d}u$ ) можно интерпретировать как аннигиляцию пары  $u\bar{u}$  с образованием пары  $d\bar{d}$ . Волнистая линия между кварками означает обмен глюонами, удерживающими адроны вместе.



вующего антицвета, поэтому и барионы, и мезоны оказываются «белыми» или «бесцветными».

Первоначально цвета кварков были введены для того, чтобы удовлетворить принцип Паули (разд. 41.7) для частиц со спином  $1/2$  (или любым полужелым спином, например,  $3/2$ ,  $5/2$  и т.д.) – таким, как электроны или нуклоны. Так как спин кварков равен  $1/2$ , они должны подчиняться принципу Паули. Но у трех барионов  $uud$ ,  $ddd$ ,  $sss$  все три кварка имели бы одинаковые квантовые числа, и по крайней мере у двух из них спины имели бы одинаковое направление [так как существуют только два возможных направления спина:  $m_s = +1/2$  и  $m_s = -1/2$  («вверх» и «вниз»)]. Это означало бы нарушение принципа Паули. Но если бы кварки обладали дополнительным квантовым числом (цветом), которое у каждого кварка принимало бы свое значение, то кварки могли бы различаться этим квантовым числом и принцип Паули не нарушался бы. Хотя цвет кварка и связанное с ним (тремякратное) увеличение числа кварков первоначально было типичной «идеей на данный случай», это позволило улучшить согласие теории с экспериментом и, в частности, предсказать правильное время жизни  $\pi^0$ -мезона. Кроме того, представление о цвете вскоре стало центральным моментом теории, поскольку именно с цветом стали связывать взаимодействие, удерживающее кварки в адроне. Каждому кварку приписывается *цветовой заряд*, аналогичный электрическому заряду, и сильное взаимодействие между кварками часто называют **цветовым взаимодействием**. Новая теория сильного взаимодействия получила название **квантовой хромодинамики** (от греч. «хромос» – цвет), или КХД. Тем самым создатели ее хотели подчеркнуть, что речь идет о взаимодействии «цветовых зарядов» (а не электрических или каких-либо других). Считается, что сильное взаимодействие адронов<sup>1)</sup> сводится к взаимодействию составляющих их кварков, как иллюстрирует рис. 43.8. Частицы, переносящие взаимодействие (аналогичные фотонам в электромагнитном взаимодействии), называются **глюонами** (от англ. «glue» – клей). Согласно теории, существуют восемь глюонов, все с нулевой массой покоя, шесть из них имеют цветовой заряд<sup>2)</sup>. Таким образом, глюоны пришли на смену мезонам (см. табл. 43.1) в качестве частиц, переносящих сильное (цветовое) взаимодействие.

<sup>1)</sup> Однако сильное взаимодействие между адронами, по-видимому, слабее взаимодействия между кварками внутри адрона.

<sup>2)</sup> Сравните ситуацию в КХД с электромагнитным взаимодействием, переносчик которого – фотон – не имеет электрического заряда. Поскольку глюоны имеют цветовой заряд, они могут взаимодействовать друг с другом и образовывать составные частицы (чего не могут фотоны). Поиск таких «глюоболов» интенсивно занимаются в последнее время. Возможно, их даже уже наблюдали.

Переносчиками слабого взаимодействия, как мы уже говорили, являются  $W^+$ -,  $W^-$ - и  $Z^0$ -частицы. Это взаимодействие обусловлено «слабым зарядом», которым обладает каждая частица. Таким образом, у каждой элементарной частицы есть электрический заряд, слабый заряд, цветовой заряд и гравитационная масса (хотя одна или даже несколько из этих характеристик могут быть равны нулю). Например, цветовой заряд всех лептонов равен нулю, поэтому они не участвуют в сильном взаимодействии.

Резюмируя, можно сказать, что в современных теориях истинно элементарными частицами являются фотон, лептоны, кварки, глюоны и  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -частицы. Фотон и лептоны наблюдаются на опыте, и недавно наконец удалось наблюдать  $W^+$ - и  $W^-$ -частицы. До сих пор наблюдались только комбинации кварков (барионы, мезоны). Весьма вероятно, что кварки не существуют в свободном состоянии. С другой стороны, некоторые физики считают, что лептоны и кварки не являются фундаментальными частицами, а состоят из еще более фундаментальных частиц. Так ли это, покажет будущее.

Один из важных аспектов современной теории состоит в попытке найти основу для объединения различных взаимодействий, существующих в природе. На создание единой теории возлагал надежды Эйнштейн, которому так и не удалось осуществить свои замыслы. В начале 60-х годов Вайнберг, Глэшоу и Салам разработали так называемую калибровочную теорию, объединившую слабое и электромагнитное взаимодействия. В этой **электрослабой теории** слабое и электромагнитное взаимодействия рассматриваются как два различных проявления единого, более фундаментального взаимодействия. Электрослабая теория достигла немалых успехов, к числу которых помимо прочего относится предсказание  $W^+$ -частиц как переносчиков слабого взаимодействия с массой  $82 \pm 2$  ГэВ/ $c^2$ , которое блестяще подтвердилось в 1983 г. экспериментально измеренным значением  $81 \pm 5$  ГэВ/ $c^2$ . Электрослабую теорию и КХД для сильного взаимодействия часто называют «стандартной моделью».

### 43.10. Теории Великого объединения

Успехи единой электрослабой теории стимулировали в последнее время попытки включить ее и КХД для сильного (цветового) взаимодействия в рамки так называемой **теории Великого объединения**. В одном из вариантов теории Великого объединения, включающей электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия, существует только один класс частиц – лептоны и кварки, принадлежащие единому семейству и способные свободно превращаться друг в друга, а три типа сил представляют собой

различные аспекты единого фундаментального взаимодействия. Но такое объединение происходит в масштабах, меньших, чем  $10^{-31}$  м. Если две элементарные частицы (лептоны или кварки) сближаются на расстояние меньше этого *масштаба объединения*, то между ними перестает существовать какое-либо различие и кварк может легко превращаться в лептон или наоборот. Барионный и лептонный заряды при этом не сохраняются. Лептоны и кварки принадлежат единому семейству. Слабое, электромагнитное и сильное (цветовое) взаимодействия сливаются в единое взаимодействие.

Каким образом лептон может превратиться в кварк и наоборот? Теория предсказывает существование частиц, обмен которыми между лептоном и кварком позволяет одной частице превращаться в другую подобно тому, как обмен заряженными пионами между  $\pi^-$ -мезоном и протоном  $p$  на рис. 43.8, б позволяет протону превращаться в нейтрон. Масса новых частиц, осуществляющих обмен, в соответствии с принципом неопределенности, которым мы уже пользовались в этой главе [см. формулу (43.2), где следует положить  $d \approx 10^{-31}$  м], равна примерно  $10^{15}$  ГэВ/ $c^2$ , или  $10^{15}$  масс протона. Столь необычайно большая масса не оставляет особых надежд на наблюдение этих частиц в лаборатории. Именно из-за чудовищной величины этой массы в наблюдаемых реакциях барионный и лептонный заряды сохраняются, так как вероятность рождения столь массивной частицы даже виртуально в процессе обмена при самых высоких достигнутых в лабораторных условиях энергиях крайне мала.

То, что происходит на расстояниях, превышающих масштаб объединения ( $10^{-31}$  м), называют *нарушением симметрии*. В качестве аналогии рассмотрим атом в кристалле. Внутри атома существует значительная симметрия – в самых близких к ядру областях электронное облако сферически-симметрично. Но к периферии атома симметрия нарушается: электронные облака испытывают возмущения главным образом в направлениях между узлами в кристаллической решетке. Точно так же взаимодействие между элементарными частицами на расстоянии  $10^{-31}$  м симметрично и не отличает один тип «заряда» от другого. Но на больших расстояниях симметрия нарушается и возникают три разных взаимодействия. [В «стандартной модели» электрослабого взаимодействия (разд. 43.9) нарушение симметрии между электромагнитным и слабым взаимодействиями происходит на расстоянии около  $10^{-18}$  м.]

Так как объединение наступает только на сверхмалых расстояниях при огромных энергиях, теория Великого объединения плохо поддается экспериментальной проверке. Тем не менее ее экспериментальную проверку нельзя считать полностью невозможной. Одна из проверок может использовать идею, высказанную в конце разд. 43.4,–

о возможности распада протона (например,  $p \rightarrow \pi^0 e^+$ ) с нарушением закона сохранения барионного заряда. Такой распад мог бы произойти при сближении двух кварков на расстоянии меньше  $10^{-31}$  м. Но при нормальной температуре и энергии это крайне маловероятно и соответственно вероятность распада протона очень мала. В простейшем варианте теории Великого объединения оценка времени жизни протона дает значение  $\sim 10^{31}$  лет. Эта величина уже допускает экспериментальную проверку. Пока наблюдать распад протона никому не удалось, и эксперименты 1983 г. установили нижний предел времени жизни протона около  $6,5 \cdot 10^{31}$  лет, что почти на порядок величины выше предсказанного значения. Этот результат вызвал разочарование, но вместе с тем явился и вызовом. На более сложные варианты теории Великого объединения он не повлиял.

Еще одно интересное предсказание теории Великого объединения относится к космологии. Теория утверждает, что в первые  $10^{-40}$  с после Великого Взрыва, в результате которого возникла наша Вселенная, температуры были столь высоки, что частицы обладали энергиями, соответствующими масштабу объединения. Это означает, что барионный заряд не сохранялся. Этим объясняется наблюдаемое в настоящее время преобладание вещества ( $B > 0$ ) над антивеществом ( $B < 0$ ) во Вселенной.

Последний пример интересен тем, что показывает глубокую связь между исследованиями, проводимыми на противоположных концах шкалы размеров: теории, занимающиеся изучением мельчайших объектов (элементарных частиц), вносят существенный вклад в наше понимание Вселенной как целого.

Еще более претенциозными, чем теория Великого объединения, представляются попытки включить в единую схему и гравитационное взаимодействие, объединив тем самым в рамках единой теории все четыре фундаментальных взаимодействия. Мир элементарных частиц открывает перед нами все новые и новые перспективы. Мы с нетерпением ожидаем того, что произойдет в ближайшем будущем.

## Заключение

Для увеличения энергии заряженных частиц, например электронов и протонов, до очень больших значений, используются ускорители. Частицам высоких энергий соответствуют очень малые длины волн, поэтому их можно использовать для получения подробной информации о строении бомбардируемых объектов. При столкновениях с высокой энергией происходит образование новых частиц (соотношение  $E = mc^2$ ).

Подобно тому как электромагнитное взаимодействие происходит благодаря обмену фотонами, сильное взаимодействие переносится *мезонами*, обладающими массой

покоя или, согласно более современным представлениям, безмассовыми *глюонами*.

*Античастица* имеет такую же массу, что и частица, но противоположный по знаку заряд. Противоположными могут быть и некоторые другие характеристики античастицы; например знак *барионного заряда* антипротона противоположен знаку барионного заряда протона. Во всех ядерных реакциях и реакциях с участием частиц выполняются следующие законы сохранения: импульса, массы-энергии, момента импульса, электрического заряда, барионного заряда и трех лептонных зарядов. Некоторые частицы обладают свойством, которое называется *странностью*, сохраняется при сильном и не сохраняется при слабом взаимодействии.

Частицы можно классифицировать как *лептоны* и *адроны*; фотон образует отдельный класс. Лептоны участвуют в слабом и электромагнитном взаимодействиях. Адроны, помимо того, участвуют в сильном взаимодействии. Адроны подразделяются на *мезоны* (с нулевым барионным зарядом) и *барионы* (с ненулевым барионным зарядом).

Все частицы, за исключением фотона, электрона, нейтрино и (насколько пока известно) протона, распадаются с измеримым периодом полураспада от  $10^{-23}$  до  $10^3$  с. Период полураспада зависит от того, каким взаимодействием в основном определяется распад. Период полураспада за счет слабого взаимодействия превышает примерно  $10^{-10}$  с. Периоды полураспада при электромагнитном взаимодействии заключены в пределах от  $10^{-16}$  до  $10^{-19}$  с. Самые короткоживущие частицы – так называемые резонансы – распадаются за счет сильного взаимодействия и существуют лишь примерно  $10^{-23}$  с.

Последние теории элементарных частиц основаны на гипотезе *кварков* как составных частей адронов. Первоначально считалось, что существует три кварка. Затем были получены указания о существовании четвертого – *очарованного* кварка, а еще позже возникла необходимость ввести пятый и шестой кварки. Ожидается, что число кварков совпадает с числом лептонов и что кварки и лептоны являются истинно элементарными частицами. Кварки обладают *цветом*. Согласно *квантовой хромодинамике*, переносчиками сильного цветового взаимодействия между цветовыми зарядами служат *глюоны*. Теория, объединяющая взаимодействия, предполагает, что на очень коротких расстояниях ( $10^{-31}$  м) и при очень высоких энергиях слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия проявляются как единая сила, а фундаментальное различие между кварками и лептонами исчезает.

## Вопросы

1. Приведите пример реакции между двумя нуклонами, сходной с реакцией (43.3), с образованием  $\pi$ -мезона.
2. Нарисуйте диаграмму Фейнмана для реакции  $n + p \rightarrow n + p + \pi^0$ .
3. Нарисуйте диаграмму Фейнмана для аннигиляции  $p\bar{p}$  с образованием двух пионов.
4. Нарисуйте диаграмму Фейнмана для фотоэффекта.
5. Из каких античастиц состоял бы «антиатом»? Что произошло бы при контакте *антивещества*, состоящего из таких антиатомов, с обычным веществом?
6. Почему нейтрон распадается за счет слабого взаимодействия, хотя и сам нейтрон, и один из продуктов его распада (протон) участвуют в сильном взаимодействии?
7. В каких из четырех взаимодействий (сильном, электромагнитном, слабом, гравитационном) участвуют электрон? нейтрино? протон?
8. Проверьте, что в каждом из распадов, перечисленных в табл. 43.2, сохраняются электрический и барионный заряды.
9. Какие из распадов, приведенных в табл. 43.2, происходят за счет электромагнитного взаимодействия?
10. Какие из распадов, приведенных в табл. 43.2, происходят за счет слабого взаимодействия?
11. Какие из приведенных ниже распадов возможны? Для запрещенных распадов укажите, какому закону сохранения они противоречат:
  - а)  $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$ ;
  - б)  $\Omega^- \rightarrow \Sigma^0 + \pi^- + \nu$ ;
  - в)  $\Sigma \rightarrow \Lambda + \gamma + \nu$ .
12. Какие из приведенных ниже реакций возможны и за счет какого взаимодействия они происходят? Для запрещенных реакций объясните, с чем связан запрет:
  - а)  $\pi^- p \rightarrow K^+ \Sigma^-$ ;
  - б)  $\pi^+ p \rightarrow K^+ \Sigma^+$ ;
  - в)  $\pi^- p \rightarrow \Lambda^0 K^0 \pi^0$ ;
  - г)  $\pi^+ p \rightarrow \Sigma^0 \pi^0$ ;
  - д)  $\pi^- p \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$ ;
  - е)  $\pi^- p \rightarrow K^0 p \pi^0$ ;
  - ж)  $K^- p \rightarrow \Lambda^0 \pi^0$ ;
  - з)  $K^+ n \rightarrow \Sigma^+ \pi^0 \gamma$ ;
  - и)  $K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^+$ ;
  - к)  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ .
13. Из каких кварков состоит а) нейтрон; б) антинейтрон; в)  $\Lambda^0$ ; г)  $\Xi^0$ ?

14. Какие частицы отвечают следующим комбинациям кварков: а)  $uud$ ; б)  $\bar{u}\bar{u}\bar{s}$ ; в)  $\bar{u}\bar{s}$ ; г)  $d\bar{u}$ ; д)  $\bar{c}s$ ?
15. Какая комбинация кварков отвечает  $D^0$ -мезону ( $Q = B = S = 0, C = +1$ )?
16.  $F^+$ -мезон имеет квантовые числа  $Q = S = C = +1, B = 0$ . Из каких кварков он состоит?
17. Начертите возможную кварковую диаграмму Фейнмана (рис. 43.8, в) для реакции  $K^- p \rightarrow K^- p$ ?

## Задачи

## Раздел 43.1

1. (I) Вычислите длину волны электронов с энергией 30 ГэВ.
2. (I) Чему равна полная энергия протона с кинетической энергией 25 ГэВ? Чему равна его длина волны?
3. (I) Чему равны длина волны и максимальная разрешающая способность, достижимая в Фермилаб с помощью протонов, ускоренных до энергии 400 ГэВ?

## Раздел 43.2

4. (I) Какова минимальная кинетическая энергия (в отдельности) нейтрона и протона, летящих навстречу друг другу с одинаковыми скоростями, если при их столкновении рождается пара  $K^+ K^-$  (табл. 43.2)?
5. (II) Массу  $\pi^0$ -мезона можно измерить с помощью реакции  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  при очень малой кинетической энергии налетающей частицы (которая предполагается равной нулю). Нейтрон вылетает с кинетической энергией 0,60 МэВ. Определите массу  $\pi^0$ -мезона с помощью законов сохранения энергии и импульса.
6. (III) Может ли при столкновении протона с энергией 100 МэВ с покоящимся протоном произойти рождение  $\pi^+$ -мезона? Какую минимальную кинетическую энергию должен иметь протон?

## Раздел 43.3

7. (I) а) Какая энергия выделяется при аннигиляции электрона и позитрона? б) Какая энергия выделяется при аннигиляции протона и антипротона?
8. (I) Какая энергия необходима для рождения нейтрон-антинейтронной пары?
9. (II) Чему равны длины волн двух фотонов, возникающих при аннигиляции в состоянии покоя протон-антипротонной пары?



## Раздел 43.5

10. (I) Какая энергия выделяется при распаде  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ?
11. (I) Какая примерно энергия выделяется при распаде  $\Lambda^0$ -частицы (табл. 43.2)?
12. (II) Чему равны длины волн двух фотонов, возникающих при аннигиляции электрон-позитронной пары с кинетической энергией каждой частицы 300 кэВ?
13. (II) Чему равна кинетическая энергия позитрона, возникающего в редком распаде  $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ ?

## Разделы 43.6–43.10

14. (I) Измеренная ширина  $\psi$ -мезона равна 63 кэВ. Оцените его время жизни.

15. (I) Измеренная ширина  $\psi'$ -мезона равна 215 кэВ. Оцените его время жизни.
16. (II) а) Покажите, что так называемый масштаб объединения ( $10^{-31}$  м) в теории Большого объединения эквивалентен энергии около  $10^{15}$  ГэВ. Воспользуйтесь формулой для дебройлевской длины волны или принципом неопределенности и объясните, как их применять в данном случае. б) Вычислите температуру, соответствующую масштабу объединения.
17. (II) Нарушение симметрии в электрослабой теории происходит на расстояниях порядка  $10^{-18}$  м. Покажите, что это соответствует энергии, примерно эквивалентной массе  $W^+$ -частиц.
18. (II) Нарисуйте кварковые диаграммы Фейнмана (по аналогии с рис. 43.8, в) для реакций: а)  $p\bar{n} \rightarrow p\bar{n}$ ; б)  $\bar{p}p \rightarrow \pi^+ \pi^-$ .