

## ГЛАВА XVI

### ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

\* \*

#### § 104. Что такое элементарные частицы

1. В общем курсе о физике элементарных частиц можно дать только предварительные представления. Это касается как экспериментальных методов, так в особенности и теоретических представлений. Этому разделу науки посвящены специальные курсы, в которых излагается как предмет в целом, так и его отдельные части. Наше весьма неполное изложение носит описательный информационный характер и, как правило, не затрагивает теоретические основы изучаемых закономерностей.

Отметим с самого начала, что в физике элементарных частиц вводится ряд понятий с весьма экзотическими названиями: *страннысть, очарование, красота* (или *прелесть*), *цвет* и пр. Все эти термины не имеют никакого отношения к тому, в каком смысле они употребляются в обыденной жизни. Это просто какие-то *квантовые числа*, вводимые для описания характеристик элементарных частиц.

2. При введении понятия *элементарных частиц* первоначально предполагалось, что это есть *первичные, далее неделимые частицы*, из которых состоит вся материя. Таковыми вплоть до начала XX века считались атомы (слово «атом» в переводе с греческого означает «неделимый»). После того как была установлена сложная структура атомов, они перестали считаться элементарными частицами в указанном смысле слова. Такая же судьба постигла ядро, а затем протон и пейтрои, у которых была установлена внутренняя структура. Открывались новые и новые объекты (*мюоны, пионы, нейтрин* и пр.), которые могли претендовать на роль элементарных частиц. Для большинства из них эти претензии были отклонены очень быстро. Но и в настоящее время мы с достоверностью не знаем, какие частицы являются действительно элементарными и есть ли вообще элементарные частицы в первоначальном смысле этого слова. *Элементарными частицами сейчас условно называют большую группу мельчайших микрочастиц, не являющихся атомами или атомными ядрами* (за исключением протонов — ядер атома водорода). Общее, что роднит все элементарные частицы, состоит в том, что все они являются специфическими формами материи, не ассоциированной с атомами и атомными ядрами.

В настоящее время к «истинно» элементарным принято относить следующие частицы (и их античастицы): 1) *лектоньи*

( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$  и соответствующие им *нейтрино*), 2) *кварки*, 3) *фотоны* и *промежуточные бозоны*  $W^\pm$ ,  $Z^0$ . Необходимо, однако, заметить, что существуют гипотезы (основанные на наблюдаемой на опыте симметрии между кварками и лептонами в электромагнитных взаимодействиях, а также на идеях Великого объединения сил) о том, что кварки и лептоны сами состоят из более фундаментальных частиц — «преопов». То же относится к  $W^\pm$ ,  $Z^0$ -бозонам (у которых предполагается существование дискретных возбужденных состояний). Если разности энергетических уровней велики по сравнению с энергиями, действующими на систему, то последняя ведет себя как целая — как элементарная частица.

3. Естественным источником различных частиц высоких энергий являются космические лучи. Не случайно поэтому, что до начала 50-х годов физика элементарных частиц была тесно связана с изучением космических лучей. В настоящее время источниками заряженных частиц высоких энергий являются в основном ускорители. Они в комбинации с детекторами позволяют исследовать процессы, в которых образуются и взаимодействуют различные элементарные частицы в лучших контролируемых условиях. Понятно, почему физику элементарных частиц называют также *физикой высоких энергий*.

Для осуществления взаимодействия на очень малых расстояниях частицы должны обладать очень высокими энергиями. Но в ультрарелятивистской области полная энергия частицы связана с ее импульсом соотношением  $\mathcal{E} = pc$ , так что соотношение неопределенностей  $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$  принимает вид

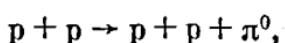
$$\Delta\mathcal{E} \cdot \Delta x \geq \hbar c/2, \quad (104.1)$$

или

$$\Delta\mathcal{E} \geq 10^{-14}/\Delta x, \quad (104.2)$$

если энергию выражать в гигаэлектронвольтах, а расстояние  $\Delta x$  — в сантиметрах. Из формулы видно, что для проникновения на расстояние  $10^{-16}$  см требуется энергия, превышающая примерно 100 ГэВ. Именно энергия такого порядка потребовалась, например, для получения промежуточных векторных бозонов  $W^\pm$  и  $Z^0$ .

4. Наиболее характерным свойством элементарных частиц, связанным по современным представлениям с корпускулярно-волновым дуализмом, является их *способность рождаться и взаимопревращаться друг в друга* при столкновениях. При этом полная (релятивистская) энергия сохраняется, т. е. полная энергия всех частиц до столкновения равна полной энергии всех частиц после столкновения. Например, при столкновении движущегося протона с неподвижным протоном может происходить реакция



в которой возникает нейтральный пион. Каково необходимое (по недостаточное) условие возможности такой реакции? Масса пиона равна 135 МэВ. Поэтому для осуществления этой реакции кинетическая энергия налетающего протона во всяком случае должна быть не меньше 135 МэВ. На самом деле она должна быть не меньше 290 МэВ, так как в соответствии с законом сохранения импульса часть энергии уносится системой в ее поступательном движении и не участвует в реакции (см. задачу 3 к § 108).

Вторая характерная черта элементарных частиц состоит в том, что подавляющая часть их *неустойчива*. Частицы самопротивольно распадаются. Среднее время жизни  $\tau$  частицы в свободном состоянии меняется в широких пределах — от  $10^{-24}$  с до бесконечности (для протона, например, экспериментально установлено, что  $\tau > 10^{32}$  лет).

Распад элементарных частиц и их взаимопревращаемость друг в друга ставят под сомнение сам смысл вопроса: «Из чего состоит частица?» Например, при распаде пейтрана ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ) возникают новые частицы: протон, электрон и антинейтрин. Но это не означает, что пейтран состоит из таких частиц. На опыте констатируется только, что эти частицы *рождаются* в результате распада пейтрана. Нейтран в той же мере элементарен, что и протон. Новые частицы могут рождаться и при распадах и взаимодействиях других частиц. Частицу можно считать сложной, построенной из нескольких других частиц в том случае, когда энергия связи каждой из составляющих частиц много меньше ее энергии покоя. Именно в таком смысле надо понимать утверждение, что атомное ядро состоит из протонов и пейтранов.

5. В § 63 (пункт 9) уже говорилось, что все процессы и явления в природе осуществляются в результате четырех взаимодействий: *сильных, электромагнитных, слабых и гравитационных*. Сравнение интенсивностей этих взаимодействий приобретает определенный смысл только тогда, когда точно указаны условия, при которых происходит сравнение. В § 63 проводилось сравнение при условии, что средние кинетические энергии сталкивающихся частиц порядка 1 ГэВ.

Сильное взаимодействие вызывают процессы, протекающие наиболее быстро по сравнению с другими процессами. Оно обеспечивает и самую сильную связь элементарных частиц. В частности, связь между нуклонами в атомных ядрах обусловлена сильным взаимодействием. Им объясняется исключительная прочность атомных ядер, лежащая в основе стабильности вещества в земных условиях.

Электромагнитное взаимодействие сводится к взаимодействию электрических зарядов (и магнитных моментов) частиц с электромагнитным полем. Процессы, связанные с электромаг-

нитным взаимодействием, протекают значительно менее быстро, чем процессы, вызываемые сильным взаимодействием. Электромагнитное взаимодействие обеспечивает связь электропров в атомах, ионов в кристаллах, атомов в молекулах. Электромагнитное взаимодействие (паряду с тяготением) играет основную роль в окружающем нас макроскопическом мире. Это связано с тем, что радиус действия сильных взаимодействий порядка  $10^{-13}$  см и на больших расстояниях сильное взаимодействие фактически исчезает. Электромагнитное же взаимодействие (и тяготение) характеризуется бесконечным радиусом действия.

Слабое взаимодействие, как показывает само название его, вызывает очень медленно протекающие процессы с элементарными частицами. Хорошой иллюстрацией этого может служить исключительная слабость взаимодействия нейтрино низких энергий с веществом (см. § 74). Ведь нейтрино свойственно одно только слабое взаимодействие. Со слабым взаимодействием связана также относительная медленность распада квазистабильных частиц. Время жизни большинства этих частиц лежит в диапазоне  $10^{-8} - 10^{-13}$  с, тогда как время жизни сильно взаимодействующих частиц составляет  $10^{-23} - 10^{-24}$  с. Интенсивность слабого взаимодействия растет с энергией (в системе центра масс). При  $\mathcal{E} \sim M_w$  слабое взаимодействие сравнивается с электромагнитным.

Гравитационное взаимодействие доминирует в случае больших макроскопических масс (планет, звезд). Но в мире элементарных частиц, ввиду малости их масс, даже на самых малых характерных для них расстояниях порядка  $10^{-13}$  см это взаимодействие ничтожно. В физике элементарных частиц при современном ее состоянии гравитационное взаимодействие не учитывается. Оно, возможно, существенно лишь на расстояниях порядка  $10^{-33}$  см.

### § 105. Классификация элементарных частиц

1. Все частицы (в том числе и неэлементарные частицы и квазичастицы) разделяются на бозоны и фермионы. Бозонами (или бозе-частицами) называются частицы или квазичастицы, обладающие нулевым или целочисленным спином. Бозоны подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна (отсюда и происходит их название). К бозонам относятся: гипотетический гравитон (спин 2), фотон (спин 1), промежуточные векторные бозоны (спин 1), глюоны (спин 1), мезоны и мезонные резонансы, а также античастицы всех перечисленных частиц. Частицы или квазичастицы с полуцелым спином называются фермионами (или ферми-частицами). Для них справедлив принцип Паули, и они подчиняются статистике Ферми — Дирака (отсюда и про-