

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-

исходит их названия). К фермионам относятся: лептоны, все барионы и барионные резонансы, кварки (спин 1/2), а также соответствующие античастицы.

2. По времени жизни τ различают стабильные, квазистабильные и резонансные частицы. Последние для краткости называют просто резонансами. Резонансными называют частицы, распадающиеся за счет сильного взаимодействия с временем жизни 10^{-23} с. Нестабильные частицы, время жизни которых превышает 10^{-20} с, распадаются за счет электромагнитного или слабого, но не за счет сильного взаимодействия. Эти частицы относят к квазистационарным. Время 10^{-20} с, ничтожное в обычных масштабах, должно считаться большим, если его сравнивать с ядерным временем. Последнее есть время, требующееся свету на прохождение диаметра ядра (10^{-13} см). Даже за время 10^{-20} с свет успевает пробежать расстояние в $10^3 - 10^4$ пучковых диаметров. За это время может совершиться еще много внутринуклонных процессов. Вот почему частицы, названные позже квазистабильными, в справочниках называют просто стабильными. Впрочем, абсолютно стабильными частицами являются, по-видимому, только фотон γ , электрон e^- , протон $p(?)$, электрополое v_e , мюонное v_μ и таоное v_τ пейтрионо и их античастицы — распад всех этих частиц на опыте не зарегистрирован.

Распады могут происходить по сильному, по электромагнитному и по слабому взаимодействию. Наиболее быстро происходят распады по сильному взаимодействию — таковы распады резонансов. Квазистабильные частицы распадаются за счет слабого или электромагнитного взаимодействия. Они стали бы абсолютно устойчивыми, если бы можно было мысленно «выключить» эти взаимодействия, оставив только сильное. Наиболее стабильными резонансами являются частицы J/ψ и Υ , для которых $\tau \approx 10^{-20}$ с. Они относятся к резонансам потому, что у них имеются капалы распада, обусловленные сильным взаимодействием, по эти распады подавлены законами сохранения очарования и красоты при сильных взаимодействиях (см. § 110, пункты 4, 5).

В силу малости времени жизни τ , резонансы не обладают определенной массой. Это видно из соотношения неопределенностей $\Delta\mathcal{E}\tau \approx \hbar$. Резонансы описываются непрерывным спектром масс. Положение максимума этого спектра и называется массой резонанса. Ширина спектра Γ определяется обычным соотношением $\Gamma \approx \hbar/\tau$. При очень малых временах жизни она бывает сравнима со значением самой массы резонанса. Именно ширина Γ (а не τ) обычно и приводится в таблицах в качестве меры нестабильности резонанса. Так, при $\tau \approx 10^{-23}$ с получаем $\Gamma \approx 100$ МэВ. Поэтому резонансами можно назвать частицы с большой шириной спектра масс $\Gamma \approx 100$ МэВ.

3. Особую группу элементарных частиц составляют фотоны, являющиеся *переносчиками электромагнитного взаимодействия*, и *родственные им* W^\pm -, Z^0 -бозоны, являющиеся *переносчиками слабого взаимодействия*. Эти четыре частицы образуют группу так называемых *переносчиков взаимодействия*. К переносчикам взаимодействия относятся и *глюоны*, а также гипотетические *гравитоны*. Все остальные частицы разделяются на *лектоны* и *адроны*.

Лектонами называются частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях и имеющие спин $1/2$. В настоящее время установлено существование шести заряженных лектонов: *электрон* e^- , *позитрон* e^+ , *мюоны* μ^\pm , *тяжелые лектоны* τ^\pm (*таоны*), и соответствующих им шести нейтральных частиц: *электронное нейтрино* ν_e и *антинейтрино* $\bar{\nu}_e$, *мюонное нейтрино* ν_μ и *антинейтрино* $\bar{\nu}_\mu$, *таунное нейтрино* ν_τ и *антинейтрино* $\bar{\nu}_\tau$. Нейтральные лектоны (*нейтрино*) не участвуют и в электромагнитных взаимодействиях.

Все лектоны, на современном уровне знания, можно назвать *истинно элементарными частицами*, так как у них в отличие от адронов не обнаружена внутренняя структура. В этом смысле лектоны называются *точечными частицами*.

Мюоны были открыты в космических лучах Андерсоном вместе с Неддермайером в 1937 г. Наличие у мюонов собственного (мюонного) нейтрино было установлено позже — только в начале 60-х годов. τ -лектоны были открыты в 1975 г. в Стенфорде (США) группой экспериментаторов во главе с Перлом (р. 1927) в опытах со встречными электрон-позитронными пучками. Тау-лектон получается в результате аннигиляции электрона и позитрона ($e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$). Масса мюона $m_\mu = -105,7$ МэВ, время жизни $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с, масса тауна $m_\tau \sim \sim 1,8$ ГэВ, время жизни $\tau_\tau \sim 5 \cdot 10^{-13}$ с.

Наши сведения о нейтрино очень неполные (см. § 74, пункт 11). Особенно это касается μ - и τ -нейтрино. Даже в отношении электронного нейтрино нельзя категорически утверждать, равна ли масса этой частицы нулю или только очень мала.

4. Адронами называются элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. Они, как правило, участвуют также и во всех других взаимодействиях — электромагнитном и слабом.

Эти частицы, в основном резонансы, составляют наиболее многочисленную группу элементарных частиц — их насчитывается около 400. Адроны подразделяются на *стабильные* и *квазистабильные адроны* и *резонансы*. В свою очередь стабильные адроны подразделяются на *мезоны* и *барионы*. Теоретические мотивы такого подразделения выясняются в § 110 (в *кварковой модели*). В группу резонансов входят *мезонные* и *барионные резонансы*.

Мезонами называются нестабильные заряженные или нейтральные адроны, обладающие нулевым или целочисленным спином, а потому принадлежащие к классу бозонов. Сюда относятся π^0 - и π^\pm -мезоны, K^\pm -мезоны. Эти мезоны были открыты раньше других. Масса их — промежуточная между массами электрона и протона (отсюда и происходит их название — от греческого слова mesos, что означает «средний, промежуточный»). Позднее были открыты более тяжелые D^\pm , D^0 , F^\pm -мезоны, масса которых больше массы протона. Было открыто также много мезонных резонансов, т. е. мезонов с временами жизни порядка 10^{-23} с. Масса некоторых из них также превосходит массу протона.缪оны μ первоначально назывались μ -мезонами, но они не относятся к классу мезонов, так как имеют спин $1/2$ и не участвуют в сильных взаимодействиях.

Барионами и барионными резонансами называются адроны с полуцелым спином и массами, не меньшими массы протона. К ним относятся *нуклоны* (протоны и нейтроны), *гипероны* и др. Протон и пейтрон — самые легкие барионы. Протон — единственный стабильный барион (см., впрочем, § 108, пункт 4), все остальные барионные резонансы нестабильны и путем последовательных распадов превращаются в нуклоны и легкие частицы: π -мезоны, электроны, нейтрино, γ -кванты. (Нейтрон в свободном состоянии — нестабильная частица с временем жизни ~ 16 миц, но в связанным состоянии внутри ядра он стабилен, если $ZM < z_{+1}M + m_e$, т. е. когда не происходит β^- -распада. Если же $ZM > z_{-1}M + m_e$, то стабилен протон и происходит позитронный β^+ -распад: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$.)

Нестабильные барионы с массами, большими массы нуклона (протона и пейтрона), и большим временем жизни по сравнению с ядерным временем (порядка 10^{-23} с) называются *гиперонами*. Первые гипероны (Λ) были открыты в космических лучах. Детальное изучение их стало возможным после того, как их стали получать на ускорителях заряженных частиц высоких энергий при столкновениях быстрых нуклонов, π - и K -мезонов с нуклонами атомных ядер. Известно несколько типов гиперонов: *лямбда* (Λ^0), *сигма* ($\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+$), *кси* (Ξ^-, Ξ^0), *омега* (Ω^-), Λ_c . Все гипероны имеют спин $1/2$, за исключением гиперона Ω^- , спин которого равен $3/2$. Таким образом, гипероны, как и все барионы, являются фермионами. Время жизни гиперонов $\tau \sim 10^{-10}$ с (за исключением Σ^0 и Λ_c , для которых τ равно 10^{-19} и 10^{-13} с соответственно). За это время они распадаются на нуклоны и легкие частицы (π -мезоны, электроны, нейтрино, γ -кванты).

В 70-х годах на больших ускорителях были созданы пучки заряженных и нейтральных гиперонов высоких энергий (20—100 ГэВ). Это позволило проверить формулу для релятивистского замедления времени в лучших условиях по сравнению с тем,

как это делалось раньше (см. т. IV, § 106, пункты 4, 5). Если бы не было релятивистского замедления времени, то гипероны от своего рождения до распада пробегали бы путь порядка ст., т. е. порядка сантиметра или десятков сантиметров. На самом деле этот путь достигает нескольких метров.

Детализация классификации элементарных частиц будет произведена в следующих параграфах по мере надобности. Отличительные признаки лептонов, мезонов и барионов станут более ясными, если при классификации частиц исходить из квартовой модели (см. § 110).

§ 106. Античастицы

1. В микромире каждой частице соответствует античастица. В некоторых случаях частица совпадает со своей античастицей, т. е. все свойства частицы и античастицы тождественны. В таком случае элементарные частицы называют *истинно нейтральными частицами*. К ним относятся *фотон* γ , π^0 -*мезон*, η^0 -*мезон*, J/ψ -*мезон*, *ипсилон-частица* Υ . Если же частица и античастица не совпадают, то массы, спины, изотопические спины, времена жизни у частицы и античастицы одинаковы, а прочие характеристики (электрический заряд, магнитный момент, лептонные и барионные заряды, странность, очарование, красота) однаковы по абсолютной величине, но противоположны по знаку. (Встречающиеся здесь термины будут определены в следующих параграфах.) Так, электрон и протон отличаются от позитрона (антиэлектрона) и антипротона прежде всего знаком электрического заряда. Нейtron отличается от антинейтрона знаком магнитного момента. Лептонные заряды у лептонов и антилептонов, барионные заряды у барионов и антибарионов противоположны по знаку.

Понятия частицы и античастицы относительны. Что назвать частицей и что античастицей — это вопрос соглашения. Электрон считают частицей, а позитрон — античастицей только потому, что в нашей Вселенной преобладают именно электроны, а позитроны являются более экзотическими объектами. Но, в принципе, с равным успехом частицей можно было бы назвать позитрон, а электрон — античастицей.

2. Первая античастица — *позитрон* (антиэлектрон) была предсказана теоретически Дираком в 1931 г. и обнаружена в 1932 г. Айдерсоном (р. 1905). Дирак исходил из предложенного им релятивистского волнового уравнения и принципа Паули. Рассмотрение его теории, по существу, далеко выходит за рамки нашего курса, и мы не будем ее касаться. Отметим только, что теория Дирака в вопросе о частичках и античастичках, во всяком случае, недостаточна. Это видно уже из того, что она