

В случае реакции с π^+ -мезоном справедливы те же формулы, если сделать замену $m_{K^+} \rightarrow m_{\pi^+}$. Для этого случая получается $\mathcal{E}_{\mu}^{\text{кин}} = 4,36$ МэВ, $\mathcal{E}_{\nu}^{\text{кин}} = 29,8$ МэВ. Так как согласно общему правилу (107.4): $m_{K^+} > m_{\mu}$, $m_{\pi^+} > m_{\mu}$, то всегда получается $\mathcal{E}_{\nu}^{\text{кин}} > \mathcal{E}_{\mu}^{\text{кин}}$.

Найденные числа поучительны еще в одном отношении. Кинетическая энергия мюона в случае распада K^+ -мезона равна 152 МэВ, тогда как в случае распада π^+ -мезона она составляет всего 4,36 МэВ. Отсюда следует, что трек мюона при распаде останавливающегося K^+ -мезона должен быть во много раз длинее трека мюона при распаде π^+ -мезона. Это позволяет отличить один распад от другого.

§ 109. Другие законы сохранения и квантовые числа

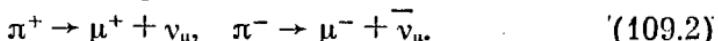
1. Было замечено, что гипероны интенсивно рождаются при столкновениях адронов высоких энергий. Это указывает на то, что их рождение связано с *сильными* взаимодействиями. Поэтомуказалось бы, что время жизни гиперонов должно быть порядка 10^{-23} с, что характерно для процессов, связанных с *сильными* взаимодействиями. Это время жизни примерно в 10^{13} раз меньше найденного экспериментально для гиперонов. Это казалось странным.

Проблема указанного странного поведения частиц была решена на основе гипотезы парного рождения частиц, подтвержденной на ускорителях. Было установлено, что при столкновениях π -мезонов и нуклонов с цуклонами гипероны всегда рождаются *парами* или *большими группами* совместно с K -мезонами или другими гиперонами. Ранее наблюдалось совместное рождение только частиц с античастицами. Здесь же парами рождались совсем другие частицы. Например, при столкновении протонов наблюдалась реакция



причем Λ^0 -гиперон появлялся только совместно с K^+ -мезоном или Σ^+ -гипероном, но никогда не появлялся вместе с K^- -мезоном или Σ^- -гипероном.

Гипероны и K -мезоны были названы *странными частицами*. Для K -мезонов также характерны относительно большие времена жизни (и даже на 1—2 порядка большие, чем у гиперонов). Это время, как и для гиперонов, того же порядка, что и у заряженных пионов. Но последние распадаются в результате слабого взаимодействия главным образом по схеме

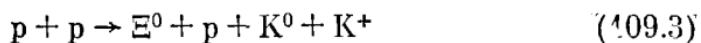


Это наводит на мысль, что гипероны и K -мезоны распадаются также за счет *слабого взаимодействия*. Все факты свидетельствуют, что это действительно так. В частности, относительная вероятность слабых взаимодействий в исследуемой области энергий

на 12—14 порядков меньшие вероятности сильных взаимодействий. Это и ведет к увеличению времени жизни примерно в то же число раз.

2. Для количественного описания парного рождения и истолкования относительно большого времени жизни странных частиц Гелл-Манн (р. 1929) и независимо от него Нишиджима (р. 1926) ввели новое квантовое число S , которое было названо *странным числом*. Поведение странных частиц можно объяснить, если предположить, что частицы $\Lambda^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0, K^-, \bar{K}^0$ имеют странность -1 , частицы $\bar{\Lambda}^0, \bar{\Sigma}^+, \bar{\Sigma}^-, \bar{\Sigma}^0, \bar{K}^+, \bar{K}^0$ — странность $+1$, частицы Ξ^-, Ξ^0 — странность -2 , частицы $\Xi^-, \bar{\Xi}^0$ — странность $+2$, частица Ω^- — странность -3 , а нуклоны, пионы и η^0 -мезоны лишены странности. Далее, надо предположить, что странность аддитивна, в сильных и электромагнитных взаимодействиях она сохраняется, а в слабых может меняться на ± 1 .

Странные частицы рождаются в сильных взаимодействиях. Так как при этом странность не меняется, то странные частицы могут рождаться только парами частиц с противоположными странностями. Вот почему в реакции (109.1) появляются две частицы Λ^0 и K^+ с противоположными странностями, но не частицы Λ^0 и K^- , имеющие страныости, знаки которых совпадают. В реакции

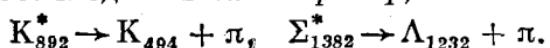


одновременно вместе с частицей Ξ^0 , странность которой равна -2 , появляются два странных мезона K^0 и K^+ , суммарная странность которых равна $+1 + 1 = 2$.

В процессах распада странных частиц меняется странность продуктов распада. Это указывает на то, что эти процессы не вызываются сильными и электромагнитными взаимодействиями. В противном случае странность не менялась бы. Значит, за распад странных частиц ответственны *слабые силы*. Вот почему скорость распада уменьшается в 10^{12} — 10^{14} раз по сравнению со скоростями распадов, вызываемых сильными взаимодействиями.

Сильные взаимодействия не способны вызывать распад странных частиц. Масса странных частиц (каонов, $\Lambda^0, \Sigma^\pm, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$ гиперонов) такова, что распады их с сохранением странности на более мелкие частицы невозможны; таким образом, эти распады не могут происходить благодаря сильному взаимодействию, в котором странность сохраняется. Например, если бы было $M_{\Sigma^+} > M_n + M_{\pi^+}$, то мог бы происходить распад $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$. Но на самом деле $M_{\Sigma^+} < M_n + M_{\pi^+}$, так что рассматриваемый распад невозможен.

Есть случаи, когда распад странных частиц происходит за счет сильного взаимодействия. Например,



Странность здесь сохраняется, поскольку распад идет за счет сильного взаимодействия. (Странность резонансов K^* , Σ^* , Λ , а также K равна +1, π -мезонов — 0. Нижний цифровой индекс означает массу соответствующей частицы в мегаэлектронвольтах. Ширины резонансов K^* и Σ^* равны соответственно 51 и 35 МэВ, так что их времена жизни составляет 10^{-23} с.)

Электромагнитные взаимодействия происходят без изменения странности, но в исключительных случаях могут вызвать распад странных частиц. Примером может служить распад $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$, происходящий под действием электромагнитных сил. Здесь энергии Σ^0 достаточно для рождения Λ^0 -гиперона и γ -кванта, а странность не меняется. (Эта реакция не может происходить за счет сильного взаимодействия, так как $M_{\Sigma^0} < M_{\Lambda^0} + M_{\gamma}$.) За исключением подобных редких случаев распад странных частиц вызывается слабыми силами.

Вместо странности S часто используют гиперзаряд Y , определяемый соотношением

$$Y = B + S. \quad (109.4)$$

Так как барионный заряд целочисленный, аддитивен и сохраняется, то гиперзаряд обладает теми же свойствами, что и странность, и совпадает с ней для частиц, у которых $B = 0$.

3. Аналогами квантового числа S являются также аддитивные целочисленные квантовые числа: *очарование (шарм) C* и *красота (прелест) b*. Эти величины сохраняются не во всех, а только в сильных и электромагнитных взаимодействиях. Значения C приводятся в таблицах в конце книги. Об очаровании C и красоте b более подробно говорится в следующем параграфе.

Упомянем еще о *законе сохранения четности*, о котором подробно говорилось в § 69. Четность сохраняется во всех взаимодействиях за исключением слабого, в котором она нарушается. Заметим еще, что состояние со спином J и четностью P изображается символом J^P (например, 1^+ или $1/2^-$).

4. Существуют адроны, весьма близкие по своим физическим свойствам, объединяемые в группы, называемые *изотопическими мультиплетами* (*дуплетами*, *триплетами* и т. д.). Они одиваковым образом участвуют в сильных взаимодействиях, имеют приблизительно равные массы, один и те же барионный заряд, спин, одинаковые внутреннюю четность, странность и отличаются друг от друга электромагнитными характеристиками (электрический заряд, магнитный момент). Если бы не было электромагнитных и слабых взаимодействий, то все свойства таких частиц были бы одинаковыми. Так, объединяются в изотопический дуплет протон и нейтрон. Эти две частицы рассматриваются как различные квантовые состояния *одной и той же частицы — нуклона*. Существуют изотопические триплеты частиц, например (π^-, π^0, π^+) , $(\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+)$, а также мультиплеты (особенно среди резонан-

сов), состоящие и из большего числа частиц. Существуют и одиночные частицы, не входящие в изотопические мультиплеты; они называются *синглетами*.

Число частиц в мультиплете по одной из оправдавших себя гипотез можно представить формулой

$$N = 2T + 1, \quad (109.5)$$

где T принимает одно из значений $T = 0, 1/2, 1, 3/2$. Эта формула аналогична формуле, определяющей число возможных проекций углового момента (спина) на избранное направление. Чтобы провести эту формальную аналогию дальше, вводят некоторое абстрактное изотропное пространство (не имеющее ничего общего с обычным пространством), которое называется *изотопическим пространством* (правильнее его надо было бы назвать *изобарическим пространством*, но по случайным причинам этот термин не привился). В этом пространстве каждому адрону соответствует некоторое направление и на нем откладывается вектор длины T . Длина этого вектора называется *изотопическим спином* или, короче, *изоспином* соответствующего адрона. В изотопическом пространстве можно произвольно выбрать некоторую ось и назвать ее *изотопической осью*. Проецированием вектора T на эту ось получают систему точек, отстоящих одна от другой на расстояние 1. Каждой такой проекции соответствует частица мультиплета. Проекцию вектора T на изотопическую ось мы будем обозначать через T_3 . При заданном изоспине T проекция T_3 может принимать следующие значения:

$$T_3 = -T, -(T-1), \dots, +(T-1), +T.$$

Так, пуклон (протон и нейтрон) имеет изоспин $T = 1/2$; протону условились приписывать проекцию $T_3 = +1/2$, а нейтрону — $T_3 = -1/2$. Трем π-мезонам соответствует изоспин $T = 1$ ($3 = 2 \cdot 1 + 1$), и т. д.

Все изложенное носит чисто формальный характер. Реальной физической величиной пока что является только число частиц N в изотопическом мультиплете, и совсем не обязательно представлять это число формулой (109.5). Однако можно указать и утверждения *физического характера*, которые нагляднее всего формулируются с использованием понятия *изотопического спина*. Для этого надо путем определения ввести правило, по которому находится изоспин системы адронов по изоспинам частиц, из которых состоит эта система. Условились складывать векторы изоспинов частиц по тому же правилу *векторного сложения*, по которому складываются угловые моменты (спины) частиц. Существенно заметить, что изоспин системы зависит не только от изоспинов всех составляющих частиц, но и от углов между векторами изоспинов этих частиц. Поэтому при одном и том же составе систем они могут обладать различными изоспинами. На-

пример, изоспин системы, состоящей из пуклона и пиона, может быть либо $1/2$ (когда изоспины этих частиц направлены противоположно), либо $3/2$ (когда они направлены одинаково).

Физическое утверждение, о котором упоминалось выше,— это закон *сохранения изотопического спина*. Этот закон заключается в том, что изотопический спин сохраняется при *сильных взаимодействиях*, но нарушается в электромагнитных и в других взаимодействиях.

Сильное взаимодействие для всех частиц, входящих в один и тот же изотопический мультиплет, одинаково, т. е. не зависит от электрических зарядов частиц. В этом проявляется так называемая *изотопическая инвариантность* элементарных частиц, присущая сильному взаимодействию. Частным случаем ее является зарядовая независимость ядерных сил. Формально математически изотопическая инвариантность может быть интерпретирована как независимость сильного взаимодействия от вращения в изотопическом пространстве.

На основании изотопической инвариантности удается предсказать существование, массу и заряд новых частиц, если известны их изотопические «搭档еры». Именно так было предсказано существование и свойства π^0 , Σ^0 , Ξ^0 по известным π^\pm , Σ^\pm и Ξ^- .

Приведем другой пример. Из изотопической инвариантности следует, что вероятность реакции $p + p \rightarrow d + \pi^+$ вдвое больше вероятности реакции $n + p \rightarrow d + \pi^0$ (обе реакции идут за счет сильного взаимодействия). Это следует из того, что в конечном состоянии обеих реакций суммарный изоспин $T = 1$ (для π $T = 1$, для d $T = 0$). В начальном состоянии первой реакции всегда $T = 1$ (так как $T_3 = 1/2 + 1/2 = 1$), а для второй реакции суммарный изоспин может быть 1 или 0 (так как $T_3 = 1/2 - 1/2 = 0$). Поэтому по закону сохранения изотопического спина первая реакция может идти при любых начальных состояниях, тогда как вторая — только для половины начальных состояний.

Поскольку изотопическая инвариантность имеет место только для сильных и нарушается для электромагнитных взаимодействий, точность предсказаний на ее основе по порядку величины равна отношению сил электромагнитного и сильного взаимодействий, т. е. составляет примерно 1 %.

5. Заслуживает внимания следующее правило. Допустим, например, что наблюдается реакция



Здесь a , b , c и d изображают какие-то частицы. Если такая реакция идет, то должны выполняться все законы сохранения, соответствующие вызывающему ее взаимодействию. Обратно, если все законы сохранения выполняются, то реакция (109.6) должна обязательно идти (см. § 107, пункт 1). (Для слабых взаимодей-

ствий суммарные странность, очарование, красота не сохраняются.)

Рассмотрим в качестве примера барионный заряд B , которым обладает, скажем, частица b . Если эту частицу перенести из левой части в правую, то барионный заряд слева уменьшится, а справа увеличится на B . Но если при таком переносе частицу b одновременно заменить античастицей \bar{b} , то барионный заряд и справа уменьшится на B . Равенство барионных зарядов восстановится. То же относится и к другим зарядам. Законы сохранения допускают возможность реакции.



Вообще, если какую-либо частицу или группу частиц перенести из одной части равенства в другую, заменив их античастицами, то получится соотношение, выражающее возможную новую реакцию.

При доказательстве не использованы законы сохранения энергии, импульса и момента импульса. Но их и не надо было учитывать, так как эти величины характеризуют не сами частицы, а состояние их движения. А эти состояния могут изменяться в широких пределах, определяемых не законами сохранения, а начальными условиями. Аналогично, при переносе частиц из-за вращения изоспинов в изотопическом пространстве получатся состояния с требуемыми суммарными изоспинами.

Приведем примеры. Возьмем реакцию распада нейтрона



Перенесем антинейтрино $\bar{\nu}_e$ справа налево, заменив его на нейтрино ν_e . Получим



Мы получили реакцию взаимодействия нейтрино с нейтроном с образованием протона p и электрона e^- .

Возьмем, далее, процесс комптоновского рассеяния кванта на электроне

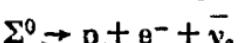


Здесь частица γ совпадает со своей античастицей. Перенесем ее слева направо, а электрон с соответствующей заменой — справа налево. Возникнет процесс



выражающий аппликацию пары e^+e^- с испусканием двух γ -квантов.

Более интересен следующий пример. Процесс распада



в принципе возможен, но его не наблюдают, так как идет распад $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$, который на 12—13 порядков более вероятен. Однако взаимодействие, приводящее к этому процессу, можно изучать в нейтринных опытах:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow \Sigma^0 + e^+, \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \Sigma^0 + \mu^+.$$

§ 110. Кварковая модель адронов

1. Обилие уже открытых и вновь открываемых адронов (в том числе резонансов) наводит на мысль, что все они построены из каких-то других, более фундаментальных частиц. С наибольшим успехом эта идея реализована в кварковой модели адронов. Кварковая модель объясняет не только систематику, но и динамику адронов. Она приводит к массе оправдывающихся предсказаний и в настоящее время считается общепризнанной.

В 1964 г. Гелл-Манном и независимо от него Цвейгом (р. 1937) была выдвинута гипотеза, подтвержденная дальнейшими исследованиями, что все адроны построены из более фундаментальных частиц, которые, по предложению Гелл-Манна, были названы *кварками*. На основе кварковой гипотезы не только была понята структура уже известных адронов, но и предсказано существование новых. Ниже дается понятие о кварковой модели без каких-бы то ни было претензий на полноту и обоснование полученных результатов.

К настоящему времени установлено существование пяти разновидностей (или так называемых *ароматов*) кварков: u , d , s , c , b . Их массы: $m_u \approx 5$ МэВ, $m_d \approx 7$ МэВ, $m_s \approx 150$ МэВ, $m_c \approx \approx 1,3$ ГэВ, $m_b \approx 5$ ГэВ. На эти данные надо смотреть как на оценочные и грубо ориентировочные, так как кварки в свободном состоянии не наблюдались и поэтому их массы нельзя было измерить прямыми методами (см. пункт 7). Неоднократно поступали предварительные сообщения об открытии t -кварка ($m_t \geq 22$ ГэВ), но окончательно существование t -кварка еще не установлено. Каждому кварку соответствует свой антикварк.

Все кварки имеют спин $1/2$ и барионный заряд $1/3$. Кварки u , c , t называют *верхними*, так как они имеют дробный электрический заряд $+2/3$. Остальные кварки d , s , b с электрическим зарядом $-1/3$ принято называть *нижними*. В соответствии с этой терминологией кварки можно расположить в таблице:

$$u, c, t \text{ (заряд } 2/3); \quad d, s, b \text{ (заряд } -1/3). \quad (110.1)$$

Кварк s является носителем странности, c — очарования, b — красоты (прелести).

Протон состоит из двух u -кварков и одного d -кварка ($p \rightarrow uud$), нейтрон состоит из одного u -кварка и двух d -кварков