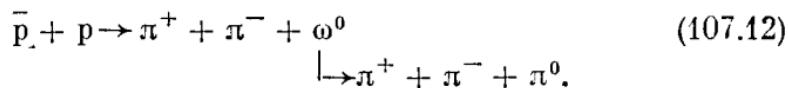


никшей при столкновении антипротона с протоном. Такую частицу мы обозначили через  $\omega^0$ . Изученная реакция идет через появление промежуточной нейтральной частицы  $\omega^0$ :



Вершине соответствующей кривой соответствует определенное значение массы, которая и принимается за массу частицы  $\omega^0$ . Становится понятным, почему частица  $\omega^0$  названа *резонансной частицей*, или *резонансом*. Сам резонанс характеризуется определенной шириной (полужирины)  $\Gamma$ . По этой ширине и определяется время жизни частицы  $\tau \sim \hbar/\Gamma$ . Для  $\omega^0$ -резонанса  $m_{\omega^0} = (782,6 \pm 0,3)$  ГэВ,  $\Gamma = 10,1$  МэВ ( $\tau = 6,52 \cdot 10^{-23}$  с).

9. Теперь скажем несколько слов о законе сохранения момента импульса. Момент импульса определяется одинаково в нерелятивистской и релятивистской классической механике, т. е. формулой  $M = [rP]$ . Той же формулой, но в операторной форме орбитальный момент  $M$  определяется в квантовой механике. Собственный (или спиновый) момент частицы определяется иначе. Об этом вскользь было сказано в § 36 (пункт 5). Подробное рассмотрение этого вопроса выходит за рамки общего курса физики. В квантовой механике момент импульса квантуется и, кроме того, частица может обладать внутренним моментом — спином. Сохраняется полный момент: орбитальный плюс спиновый. Например, в системе центра масс в распаде  $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  спиновый момент равен 1, а пионы возникают в  $p$ -состоянии; в распаде  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$  спин равен  $1/2$ , а  $p$  и  $\pi^-$  могут быть в  $s$ - и  $p$ -состояниях.

## § 108. Законы сохранения электрического, лептонных и барионного зарядов

1. Названные законы выполняются для всех взаимодействий (сильного, электромагнитного, слабого; для гравитационного взаимодействия элементарных частиц они, разумеется, не проверены). Их происхождение неясно, в частности не выяснено, с какой симметрией они связаны. Существуют веские основания считать, что закон сохранения электрического заряда — точный (масса фотона нулевая, на опыте установлено, что  $m_\phi < 10^{-21} m_e$ ). Законы сохранения лептонных и барионного зарядов — чисто эмпирические, и не исключено, что они могут нарушаться (см. пункты 3, 4).

Электрический заряд  $Q$  частицы играет двоякую роль. Во-первых, он является *источником силового поля*. Во-вторых, это есть *квантовое число*, характеризующее частицу. Лептонные и барионные заряды, насколько известно в настоящее время, не явля-

ются источниками каких бы то ни было дальнодействующих силовых полей. Это просто квантовые числа, характеризующие внутренние свойства элементарных частиц.

2. Различают три вида лептонных зарядов: *электронный*  $L_e$  (для  $e^-$  и  $\nu_e$ ), *мюонный*  $L_\mu$  (для  $\mu^-$  и  $\nu_\mu$ ), *таунский*  $L_\tau$  (для  $\tau^-$  и  $\nu_\tau$ ). Барионный заряд один и обозначается через  $B$ .

С помощью лептонных зарядов простейшим образом интерпретируется установленный на опыте закон, согласно которому в замкнутой системе при любых процессах остается постоянной разность между числом лептонов и антилептонов каждого вида. То же относится и к барионам. Условились считать, что лептонный заряд  $L_e$  равен  $+1$  (для  $e^-$  и  $\nu_e$ ),  $L_\mu = +1$  (для  $\mu^-$  и  $\nu_\mu$ ),  $L_\tau = +1$  (для  $\tau^-$  и  $\nu_\tau$ ) и  $-1$  для всех антилептонов ( $e^+$ ,  $\bar{\nu}_e$ ,  $\mu^+$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\tau^+$ ,  $\nu_\tau$ ). Для всех остальных элементарных частиц лептонные заряды принимаются равными нулю. Барионный заряд принимается равным  $+1$  для всех барионов и барионных резонансов и  $-1$  для их античастиц. Все заряды аддитивны. Это значит, что для сложной системы заряд каждого вида равен сумме зарядов того же вида всех входящих в неё элементарных частиц. Например, барионный заряд атомного ядра равен сумме всех барионных зарядов нуклонов, из которых построено ядро. Иными словами, барионный заряд ядра равен массовому числу  $A$ .

3. Ни одного случая нарушения закона сохранения лептонного заряда не обнаружено. Однако точность, с которой проверен этот закон, невелика. Не исключено, что закон сохранения лептонного заряда приближенный и в определенных условиях может нарушаться. Если бы это было так, то в вакууме могли бы осуществляться превращения нейтрино в антинейтрино и наоборот, а также превращения одного типа нейтрино в другие. Поиски этих явлений представляют большой интерес.

Закон сохранения ленточного заряда требует, например, чтобы при электронном  $\beta$ -распаде ( $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ ) вместе с электроном обязательно рождалось электронное антинейтрино, так как суммарный лептонный заряд этих двух частиц равен нулю. При позитронном  $\beta$ -распаде ( $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ ) паоборот, вместе с позитроном должно появляться электронное нейтрино.

Законом сохранения лептонного заряда объясняется отсутствие таких процессов, как

$$\nu_e + p \not\rightarrow e^+ + n, \quad \nu_\mu + p \not\rightarrow \mu^+ + n, \quad (108.1)$$

хотя другими законами сохранения они разрешены. Напротив, процессы

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n, \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n, \quad (108.2)$$

удовлетворяющие закону сохранения лептонного заряда, наблюдаются экспериментально. Первый процесс наблюдается в ядер-

ных реакторах при взаимодействии электроны антинейтрино с протонами вещества. Второй процесс наблюдался на ускорителях высоких энергий, где получались мюонные нейтрино в реакциях распада  $\pi^-$ - и  $K^-$ -мезонов;  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$  и  $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ . Эти антинейтрино и взаимодействовали с протонами вещества.

Примеры (108.1) и (108.2) показывают, что нейтрино (как электронное, так и мюонное) не тождественны своим античастицам. В 1962 г. было установлено (в частности, по отсутствию реакции  $\nu_\mu + p \rightarrow e^- + p$ ), что  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$  — разные частицы. После этого и были введены разные лептонные заряды  $L_e$  и  $L_\mu$ . Аналогично обстояло дело с введением  $t^\pm$ -лептонов и таонных нейтрино  $\nu_t \bar{\nu}_t$  и соответствующего им лептонного заряда  $L_t$ .

4. Из закона сохранения барионного заряда следует, что протон не может превратиться, например, в позитрон и фотон, хотя при таком превращении не нарушались бы ни закон сохранения энергии, ни другие уже рассмотренные выше законы сохранения. Если бы такое превращение было возможно, то оно неизбежно привело бы к аннигиляции атомов вещества, так как образовавшиеся позитроны аннигилировали бы с электронами атомных оболочек. Из того же закона следует, что антибарион может рождаться только в паре со своим барионом. Так, антипротон рождается в реакции  $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$ . При столкновении двух протонов могут возникнуть и два антипротона. Но тогда появятся и два новых протона — всего получится шесть частиц, а это значительно повысит порог реакции (см. § 107, пункт 4). Аналогично, среди продуктов распада бариона должен обязательно присутствовать также барион. Могут появиться и несколько барионов, но совместно с антибарионами, число которых будет на единицу меньше. Все сказанное относится и к лептонам.

Не исключено, что барионный заряд не всегда строго соблюдается. В так называемой теории великого объединения допускается возможность распада протона на более легкие частицы, например  $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ . Такой распад был бы связан с изменением барионного заряда. Экспериментально распад протона пока не обнаружен. На опыте установлено, что время жизни протона  $\tau > 10^{32}$  лет.

### ЗАДАЧИ

1. Определить порог рождения антипротона:

- при соударении электрона с покоящимся протоном,
- при соударении электрона с покоящимся электроном,
- при соударении фотона с покоящимся протоном,
- при соударении фотона с покоящимся электроном.

Указание. Задачи решаются аналогично задаче из § 107, пункт 4.

При выборе соответствующей реакции необходимо руководствоваться законом сохранения барионного заряда. В частности, надо учесть, что антипротон всегда рождается в паре с протоном. В соответствии с этим надо

выбрать реакции:

- а)  $e^- + p \rightarrow e^- + p + p + \bar{p}$ , (108.3)  
 б)  $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^- + p + \bar{p}$ , (108.4)  
 в)  $\gamma + p \rightarrow \gamma + p + p + \bar{p}$ , (108.5)  
 г)  $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^- + p + \bar{p}$ . (108.6)

При рассмотрении реакций с участием  $\gamma$ -квантов надо использовать соотношение  $P_\gamma = \mathcal{E}_\gamma$ . Порог реакции соответствует случаю, когда энергия  $\gamma$ -кванта после реакции стремится к нулю. Пороги приведенных реакций соответственно равны:

- а)  $4m_p + 2m_e = 3,754 \text{ ГэВ}$ , (108.3a)  
 б)  $2m_p(m_p/m_e + 2) = 3446 \text{ ГэВ}$ , (108.4a)  
 в)  $4m_p = 3,753 \text{ ГэВ}$ , (108.5a)  
 г)  $2(m_p/m_e + 1)m_p = 1724 \text{ ГэВ}$ . (108.6a)

2. Определить порог реакции

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0. \quad (108.7)$$

Ответ:

$$2m_{\pi^0} + m_{\pi^0}^2/(2m_p) = 284 \text{ МэВ}. \quad (108.7a)$$

3.  $K^+$ -мезоны распадаются по схеме  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ . По мере уменьшения скорости мезона в среде след его становится все более извилистым и запутанным — частица начинает беспорядочно блуждать между атомами. Наконец, след обрывается из-за остановки частицы. Из точки остановки исходят две частицы —  $\mu^+$  и  $\nu_\mu$ . Заряженный мюон  $\mu^+$  оставляет след, нейтрино следа не оставляет. По следу заряженной частицы и можно судить о характере процесса. Рассчитать энергию мюона и пейтральной частицы в точке, из которой они исходят.

То же самое сделать, заменив  $K^+$ -мезон  $\pi^+$ -мезоном, т. е. для распада  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ .

Решение. Полная энергия остановившегося мезона равна его массе  $m_{K^+}$ . Если  $\mathcal{E}_\mu$  и  $\mathcal{E}_\nu$  — полные энергии мюона и нейтрино в момент их образования, то

$$\mathcal{E}_\mu + \mathcal{E}_\nu = m_{K^+}$$

Для мюона

$$\mathcal{E}_\mu^2 - P_\mu^2 = m_\mu^2.$$

Наконец, для нейтрино  $P_\nu = \mathcal{E}_\nu$ . Из этих трех уравнений однозначно получаем (так как  $\mathcal{E}_\mu \neq \mathcal{E}_\nu$ )

$$\mathcal{E}_\mu = m_{K^+}/2 + m_\mu^2/(2m_{K^+}), \quad \mathcal{E}_\nu = m_{K^+}/2 - m_\mu^2/(2m_{K^+}).$$

Итак, более легкая частица (нейтрино) получает меньшую энергию. Не противоречит ли это известному утверждению, что при распаде неподвижной частицы большая энергия уносится меньшей частицей? Нет, не противоречит. Это утверждение относится не к полной, а к кинетической энергии. Кинетические энергии частиц будут

$$\mathcal{E}_\mu^{\text{кин}} = m_{K^+}/2 + m_\mu(1 - m_\mu/(2m_{K^+})) = 152 \text{ МэВ},$$

$$\mathcal{E}_\nu^{\text{кин}} = \mathcal{E}_\nu = m_{K^+}/2 - m_\mu^2/(2m_{K^+}) = 236 \text{ МэВ}.$$

В случае реакции с  $\pi^+$ -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  $\pi^+$ -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  $\pi^+$ -мезона. Это позволяет отличить один распад от другого.

## § 109. Другие законы сохранения и квантовые числа

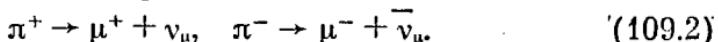
1. Было замечено, что гипероны интенсивно рождаются при столкновениях адронов высоких энергий. Это указывает на то, что их рождение связано с *сильными* взаимодействиями. Поэтомуказалось бы, что время жизни гиперонов должно быть порядка  $10^{-23}$  с, что характерно для процессов, связанных с *сильными* 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  $\pi$ -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  $\Lambda^0$ -гиперон появлялся только совместно с  $K^+$ -мезоном или  $\Sigma^+$ -гипероном, но никогда не появлялся вместе с  $K^-$ -мезоном или  $\Sigma^-$ -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