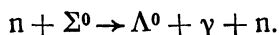


жаться в ядре. Если пятой частицей будет не  $n$ , а  $\Lambda^0$ , то для нее запрет Паули снимается, и она может находиться в том же состоянии. Ядро  ${}^4\text{He}^5$  в природе существует.

К настоящему времени обнаружено несколько сотен  $\Lambda^0$ -гиперфрагментов, образованных при ядерных взаимодействиях, и определена энергия их связи.

В то же время  $\Sigma$ -ядра в природе не обнаружены. Чем это объясняется? Представим себе, что в ядре в результате какой-либо реакции появился  $\Sigma$ -гиперон, допустим, что это сигма-минус-гиперон. Тогда он вступит в реакцию с одним из протонов ядра  $\Sigma^- + p$  и образуется новая пара  $\Sigma^0 + n$  — произойдет так называемый процесс перезарядки. Такой переход энергетически выгоден, так как масса  $\Sigma^-$  больше массы  $\Sigma^0$ . При этом выполняется закон сохранения странности  $\Delta S = 0$  и изотопического спина  $\Delta \tau = 0$ , и, следовательно, процесс пойдет по каналу, характеризующемуся сильными взаимодействиями, которые реализуются за  $10^{-23}$  сек. Итак, заряженный сигма-гиперон в ядре практически мгновенно превращается в нейтральный сигма гиперон. Далее идет следующий процесс:



Это электромагнитный процесс и время его порядка  $10^{-20}$  сек, тогда как время жизни  $\Lambda^0$ -частицы относительного процесса  $\Lambda^0 \rightarrow p + n$  имеет порядок  $10^{-10}$  сек. Следовательно, все остальные гипер-ядра распадаются практически мгновенно, поэтому мы и не наблюдаем их.

Распад лямбда-ядер возможен как мезонный, когда  $\pi^-$ -мезон после распада  $\Lambda^0$ -гиперона вылетает из ядра, так и безмезонный. В последнем случае  $\pi^-$ -мезон поглощается в ядре нуклоном, в результате чего из ядра вылетает уже не мезон, а нуклон.

Обнаружение гиперфрагментов привело к созданию нового раздела ядерной физики, изучающего свойства стационарных систем, состоящих из нуклонов и  $\Lambda^0$ -гиперонов.

## § 52. НАРУШЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ

Заканчивая обзор основных свойств и характеристик элементарных частиц, необходимо остановиться на одном из последних крупных открытий в физике высоких энергий — нарушении закона сохранения четности при слабых взаимодействиях, которое явилось одним из самых сенсационных событий физики последних лет.

Как и все законы физики, законы сохранения полной энергии, полного импульса и момента количества движения в изолированной системе являются обобщением опытных данных. Оказывается, что с теоретической точки зрения они теснейшим образом связаны со свойствами физических систем по отношению к пространству и времени. Эти законы являются следствием однородности пространства и времени и изотропии пространства [12].

Так, вследствие однородности времени протекание физических явлений не зависит от выбора момента времени, в который начинает проводиться эксперимент. Достаточно наложить это условие на законы движения системы, чтобы получить из них в качестве вывода закон сохранения полной энергии системы.

В силу однородности пространства механические свойства замкнутой системы не меняются при любом параллельном переносе системы как целого в пространстве; следствием этой независимости является закон сохранения импульса.

Из-за того что пространство изотропно, на результатах эксперимента не сказывается поворот замкнутой системы на некоторый угол в пространстве; следствием этого является закон сохранения момента количества движения.

Первые два свойства физических систем по отношению к пространству и времени называют *трансляционной симметрией*. Отражением ее и являются законы сохранения энергии и импульса. Из-за существования вращательной симметрии возникает закон сохранения момента количества движения.

Таким образом, каждому из упомянутых законов сохранения соответствует независимость законов движения относительно некоторого преобразования системы отсчета. Это соответствие имеет и более общее значение: каждому свойству независимости законов движения от какого-либо преобразования системы отсчета («инвариантности» относительно такого преобразования) отвечает закон сохранения физической величины.

Так всегда предполагалось, что в природе существует зеркальная симметрия, т. е. законы природы не должны изменяться, если заменить все явления на их зеркальное отображение. Зеркальной симметрии должен также соответствовать закон сохранения некоторой физической величины. Такой величиной является четность волновой функции. Принцип зеркальной симметрии облекается в математическую форму с помощью представления о четности волновой функции и принимает выражение закона сохранения четности.

Зеркальное отображение означает замену направлений координатных осей на обратные:  $x \rightarrow -x$ ,  $y \rightarrow -y$ ,  $z \rightarrow -z$ . Мы знаем (§ 8), что волновая функция системы при этом может либо не менять знака (и тогда состояние является четным —  $P = +1$ ), либо менять на обратный (и тогда состояние нечетное —  $P = -1$ ), т. е. в общем виде

$$\psi(x, y, z) = P\psi(-x, -y, -z).$$

Все известные нам законы движения таковы, что они не меняются при указанной замене. Если мы имеем реакцию типа  $A + B + \dots \rightarrow a + b + \dots$ , то при зеркальной симметрии, должна происходить точно такая же реакция для зеркально отраженных частиц:  $\bar{A} + \bar{B} + \dots \rightarrow \bar{a} + \bar{b} + \dots$ . Но при отражении волновые функции

всей системы в левой части уравнения и всей системы в правой части умножаются на  $P$ , где  $P$  — четность системы соответственно до и после реакции. Ясно, что вторая (зеркально отраженная) реакция существует только, если этот фактор одинаков слева и справа, т. е. если четность в реакции сохраняется.

Таким образом, при существовании физических свойств инва-

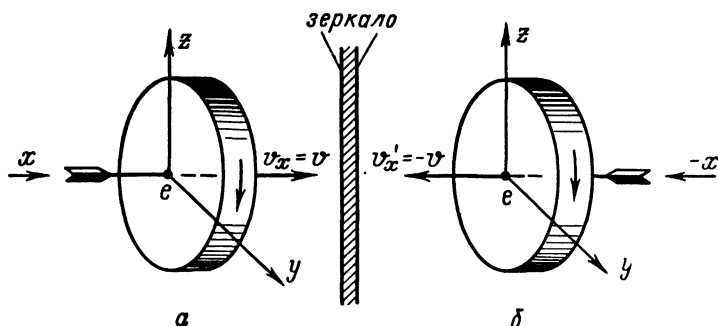


Рис. 99. Поляризованный электрон и его «зеркальное изображение»

риантности по отношению к зеркальной симметрии полная четность частиц в изолированной системе не должна изменяться при любых превращениях.

Закон сохранения четности считался столь же несомненным, как, например, закон сохранения импульса. Казалось совершенно естественным, что «правое» и «левое» в природе должно быть равноценно.

В таком случае явления должны протекать одинаково и при изменении направления только одной из осей. Например, допустим, что электрон движется вдоль оси  $x$  со скоростью  $v = v_x$  и его спин направлен вдоль этой же оси (рис. 99). При этом внутреннее вращение электрона происходит в плоскости  $yz$ . Заменим  $x$  на  $-x$ , оставив оси  $y$  и  $z$  неизменными. Это значит, что процесс отражен в зеркале, перпендикулярном оси  $x$ . При этом направление движения электрона изменится на обратное, а направление вращения сохранится. Из правополяризованного<sup>1</sup> (рис. 99, а) он станет левополяризованным (рис. 99, б). В данном примере состояние электрона при зеркальном отображении изменилось. Закон сохранения четности, закон равноправия обеих систем координат означает, что все физические процессы, в которых  $x$ -компоненты скорости всех частиц изменены на обратные, будут протекать одинаково.

Сомнение в сохранении четности при слабых взаимодействиях зародилось в связи со странным поведением К-мезона. К<sup>0</sup>-мезон

<sup>1</sup> Правополяризованной называют частицу, тогда, когда проекция ее спина на импульс имеет одинаковое с ним направление; у левополяризованной частицы они взаимно противоположны.

распадается как на два, так и на три пиона. Так как четность пиона отрицательна, то по закону сохранения четности на два пиона может распадаться покоящаяся частица с четностью, равной  $P = +1$ , а на три пиона — частица с четностью  $P = -1$ .

Долгое время считали, что существуют два различных  $K^0$ -мезона с различной четностью: «тау» ( $\tau$ ) и «тета» мезоны, однако, точные исследования показали, что все остальные свойства «тау» и «тета» тождественны: массы, времена жизни и спины оказались у них одинаковыми.

Два физика-теоретика в Колумбийском университете (США) Ли и Янг предположили, что «тау» и «тета» тождественны, но при слабых взаимодействиях четность может не сохраняться. Был предложен опыт для проверки этой гипотезы. Предлагалось соориентировать спины бета-активных ядер вдоль определенной оси и определить число электронов, вылетающих в двух противоположных направлениях вдоль этой оси. В том случае, если процесс  $\beta$ -распада не зависит от взаимной ориентации спина ядра и скорости электрона, испускание электронов будет происходить симметрично в обоих направлениях. При этом зеркальное отображение неотлично от самого предмета (рис. 100) и, следовательно, четность сохраняется.

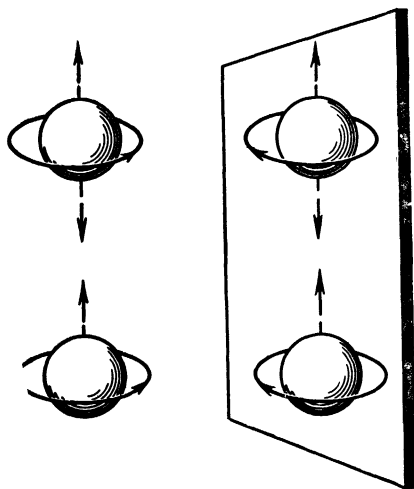


Рис. 100. Ядра, испускающие электроны, и их зеркальное отображение

Отличить *левое* от *правого* станет возможным, если будет обнаружено преимущественное испускание частиц в одном каком-нибудь направлении. При этом отраженное в зеркале событие уже не будет эквивалентно происходящему процессу, как это было в случае, представленном на рис. 99.

Эксперимент был поставлен в Колумбийском университете в 1957 г. под руководством Ву. Исследовался  $\beta^-$ -распад искусственного радиоактивного изотопа кобальта  $Co^{60}$



На тончайшую подложку был осажден радиоактивный  $Co^{60}$ , ядра которого парамагнитны (имеют постоянные магнитные моменты). Во внешнем магнитном поле такие ядра одинаково ориентируются по полю, а поскольку направление магнитного момента связано с направлением спина ядра, то происходит и ориентация

спинов ядер кобальта. «Вращающиеся» ядра кобальта (рис. 101) (светлые большие кружки) испускают электроны (темные малые кружки) преимущественно в одном направлении вдоль оси вращения и антинейтрино (точки) в противоположном направлении. Это явление обычно нельзя обнаружить (верхний ряд рис. 101), однако

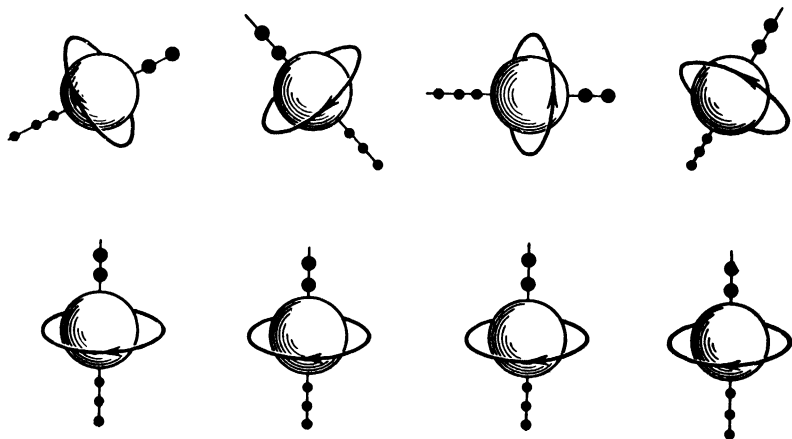


Рис. 101. Возникновение преимущественного направления излучения при ориентации ядер кобальта под действием внешнего поля

оно становится заметным, если оси ядер ориентированы (нижний ряд рис. 101). Для того чтобы ориентация ядер не нарушалась тепловым движением атомов, кобальт охлаждался жидким гелием. По достижении температуры  $0,06^\circ \text{K}$  подложка с кобальтом вынималась и помещалась во внешнее магнитное поле. Надо было определить, существует ли преимущественное направление вылета электронов. Для этой цели над подложкой и под ней располагались счетчики (ряд 1 и 2).

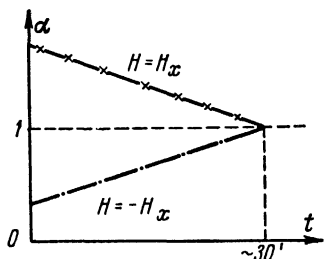


Рис. 102. Зависимости отношения числа электронов, зарегистрированных счетчиками 1 и 2 рядов от времени при противоположных направлениях внешнего магнитного поля

Полученная из эксперимента зависимость отношения числа электронов, зарегистрированных счетчиками первого и второго ряда  $\alpha = \frac{N_1}{N_2}$  от времени измерения  $t$  (рис. 102), показала, что при малом времени наблюдения существует асимметрия в вылете электронов и  $\alpha$  не равна единице.  $\alpha$ -частицы, испускаемые ориентированными ядрами кобальта, вылетают преимущественно против направления магнитного поля. Со временем ориентация ядер ухуд-

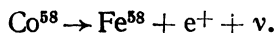
шается, и  $\alpha$  приближается к единице.

шается и приблизительно через 30 мин эффект пропадает. Повторив опыт при противоположном направлении поля, получили, что направление преимущественного вылета также изменилось на обратное (рис. 102, нижняя кривая).

В результате распада кобальт превращался в изотоп  $Ni^{60}$ , спин которого на единицу меньше, чем у  $Co^{60}$ . Поскольку спины электрона и антинейтрино равны  $1/2$ , они должны быть направлены в одну сторону ( $1/2 + 1/2 = 1$ ), чтобы скомпенсировать изменение спинов ядер на единицу.

Детальный анализ эксперимента показывает, что различие в вероятностях, вылета вверх и вниз как раз такое, какое должно было бы быть, если бы в природе существовало только правовинтовое (или правополяризованное) антинейтрино.

Опыт был повторен с  $Co^{58}$ , испытывающем  $\beta^+$ -распад:



Получилось также асимметричное распределение, согласно которому можно утверждать, что в природе есть только левополяризованное нейтрино.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что при слабых взаимодействиях закон сохранения четности не выполняется.

Опыты, в которых делались попытки обнаружить несохранение четности в сильных и электромагнитных взаимодействиях, дали отрицательные результаты: с достигнутой пока точностью в этих взаимодействиях четность сохраняется.

Процессы, вызываемые слабыми взаимодействиями, встречаются реже, чем электромагнитные процессы и процессы, вызываемые сильным взаимодействием. Поэтому подавляющее большинство явлений в мире протекает с сохранением четности.

Однако в принципе все частицы иногда наряду с гораздо более существенными сильными и электромагнитными испытывают и слабые взаимодействия. Поэтому о принципе зеркальной симметрии как общем принципе симметрии законов природы теперь уже говорить нельзя.

Как следует понимать природу этой асимметрии? Является ли она свойством пространства или свойством частиц и их взаимодействий? Поскольку несохранение четности имеет место только для слабых взаимодействий, справедливо, по-видимому, именно последнее утверждение.

Была выдвинута гипотеза о том, что, хотя инвариантность законов природы относительно отражения пространственных координат не имеет места, любые взаимодействия должны быть инвариантны относительно преобразования, заключающегося в отражении — инверсии — пространственных координат и одновременном переходе от частиц к античастицам. Эту комбинацию пространственной инверсии и зарядового сопряжения Ландау назвал комбинированной инверсией. Иными словами, явления природы проте-

кают одинаково, если при отражении в зеркале одновременно заменять частицы на античастицы. Такое преобразование обозначается символом  $CP$ , где  $C$  является оператором зарядового сопряжения, а  $P$  — оператором инверсии пространственных координат.

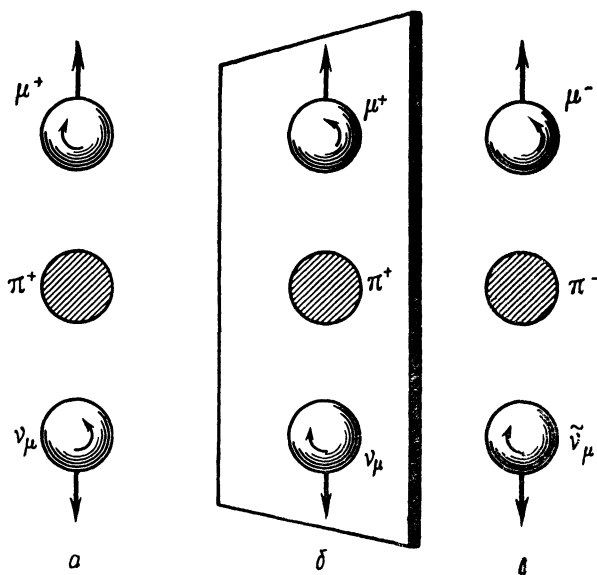


Рис. 103.  $CP$  — инвариантность при слабых взаимодействиях:  $a$  — схема распада  $\pi^+$ -мезона;  $b$  — зеркальное отображение процесса распада  $\pi^+$ -мезона;  $v$  — схема распада при комбинированной  $CP$ -инверсии

До последнего времени казалось, что  $CP$ -инвариантность (или, как говорят, комбинированная четность) сохраняется в слабых взаимодействиях. (Можно легко убедиться, что в описанном явлении  $\beta$ -распада это справедливо.)

На рис. 103 дан пример типичного слабого взаимодействия.  $\pi^+$ -мезон распадается на  $\mu^+$ -мезон и нейтрино (рис. 103,  $a$ ).

На рис. 103,  $b$  показано, как этот процесс выглядит при зеркальном отображении. В природе не существует соответствующего (рис. 103,  $b$ ) процесса, так как не существует нейтрино, спин которого параллелен импульсу (правополяризованное нейтрино). Однако если провести теперь  $C$ -преобразование и заменить все частицы на античастицы (рис. 103,  $v$ ), то видно, что полученная в результате комбинированной инверсии  $CP$  система представляет действительно наблюдаемый распад  $\pi^-$ -мезона.

Однако в экспериментах, проведенных Кроиним и Фитчем в 1964 г. был обнаружен примерно в 0,2% случаев распад  $K_2^0$ -мезо-

нов на два заряженных  $\pi$ -мезона, что строго запрещено  $CP$ -инвариантностью. В большинстве случаев  $K_2^0$ -мезон, являющийся комбинированно-нечетной системой, распадается на три  $\pi$ -мезона. Комбинированная четность состояний ( $2\pi^0$ ) и ( $\pi^+$  и  $\pi^-$ ) положительная, а состояния ( $\pi^+\pi^-\pi^0$ ) может быть, как положительной, так и отрицательной. Таким образом, возможность распада  $K_2^0$  как на три, так и на два  $\pi$ -мезона указывает на несохранение  $CP$  в слабых взаимодействиях. Это создает трудность фундаментального характера.

В теории элементарных частиц важное значение имеют 3 типа скачкообразных преобразований, определяемых: заменой частицы на античастицу (зарядовым сопряжением —  $C$ ), заменой  $\vec{r}$  на  $-\vec{r}$  (инверсией пространства —  $P$ ) и заменой  $T$  на  $-T$  (инверсией времени, меняющей знаки скоростей, а следовательно, импульсов и проекции спинов всех частиц). Существующая — хотя и несовершенная — квантовая теория элементарных частиц инварианта относительно произведения преобразований  $C$ ,  $P$  и  $T$ :  $CPT=1$  (так называемая  $CPT$ -теорема Людерса — Паули [13]).

Эксперимент показывает, что сильные взаимодействия с большой степенью точности порознь  $C$ -,  $P$ - и  $T$ -инвариантны. Электромагнитные взаимодействия  $P$ -инвариантны, но, возможно, заметно нарушают  $C$ - (и  $T$ -) инвариантность. Наконец, слабые взаимодействия полностью нарушают  $C$ -,  $P$ - и, возможно,  $T$ -инвариантность. Будущая теория элементарных частиц должна в первую очередь объяснить этот факт.

### § 53. ФИЗИКА НЕЙТРИНО

**Нейтрино и антинейтрино.** Вопрос о нейтрино здесь выделен потому, что эта удивительная элементарная частица, участвующая только в слабых взаимодействиях, уже дала и может дать в будущем много необычайно важных научных сведений. К сожалению, эти сведения получаются с большим трудом из-за крайне малого эффективного сечения взаимодействия нейтрино с веществом, хотя, по-видимому, оно растет с энергией и при  $E \sim 10^{14}$  эв можно ожидать принципиально новых процессов.

После того как в опытах Рейнеса и Коуэна было доказано существование антинейтрино (§ 44), возник вопрос о том, являются ли нейтрино и антинейтрино разными частицами и в чем их отличие друг от друга.

Еще до открытия несохранения четности Дэвис провел опыты, показывающие, что нейтрино и антинейтрино — частицы разные. Если бы нейтрино и антинейтрино были тождественны, то реакция

$$\tilde{\nu} + n \rightarrow p + e^-$$

должна была бы идти с такой же вероятностью, как и реакция