

координат. Однако, как показал Л. Д. Ландау [32], несохранение четности при  $\beta$ -распаде может не затрагивать симметрии пространства, если предположить, что при слабых взаимодействиях не имеют места в отдельности закон сохранения четности и инвариантность относительно зарядового сопряжения.

Если в сильных и электромагнитных взаимодействиях каждый из этих законов выполняется в отдельности, то при слабых взаимодействиях имеет место инвариантность только относительно совокупности этих двух операций. Совокупность операции инверсии и зарядового сопряжения Ландау назвал *комбинированной инверсией*. При комбинированной инверсии происходит инверсия пространственных координат и одновременно частицы переходят в античастицы. Инвариантность слабого взаимодействия относительно комбинированной инверсии оставляет пространство полностью симметричным, асимметричными делаются заряды частиц.

Частицы, тождественные со своими античастицами, т. е. истинно нейтральные частицы, при комбинированной инверсии переходят сами в себя. Поэтому для таких частиц комбинированная инверсия совпадает с обычной пространственной инверсией. В этом случае закон сохранения комбинированной инверсии совпадал бы с законом сохранения четности.

В следующем параграфе мы рассмотрим основные свойства нейтрино, вытекающие из явления  $\beta$ -распада, и, в частности, те свойства, которые связаны с нарушением закона сохранения четности при  $\beta$ -распаде.

#### § 40. Основные свойства нейтрино

Свойства нейтрино, введенных Ферми в теорию  $\beta$ -распада, таковы, что непосредственно наблюдать их очень сложно. Электрический заряд нейтрино равен нулю, масса и магнитный момент также равны нулю (или очень малы), поэтому их взаимодействие с веществом может происходить только за счет слабого взаимодействия, проявляющегося в процессах  $\beta$ -распада. Поток нейтрино, попадая на ядра, может вызвать процессы, обратные  $\beta$ -распаду, при которых будут выделяться электроны или позитроны. На возможность такого процесса указали Бете и Пайерлс [33] сразу же после опубликования работы Ферми. Однако вследствие малого эффективного сечения реакции ( $\sim 10^{-44}$  см<sup>2</sup>) трудно было надеяться, что этот процесс можно будет наблюдать в эксперименте. Положение изменилось в последние годы, когда были созданы мощные ядерные реакторы, работа которых сопровождается выделением большого количества нейтрино.

Практическое осуществление реакции обратного  $\beta$ -распада связано с вопросом о том, являются ли нейтрино и антинейтрино тождественными частицами или разными. Мы условились называть антинейтрино  $\bar{\nu}$ -частицу, которая выделяется при электронном распаде нейтрона



тогда при позитронном распаде должно выделяться нейтрино

$$p \rightarrow n + \bar{e} + \nu. \quad (40,2)$$

В связи с тем, что испускание частицы эквивалентно поглощению античастицы, а испускание античастицы эквивалентно поглощению частицы, можно написать:

$$\nu + n \rightarrow p + e, \quad (40,3)$$

$$\bar{\nu} + p \rightarrow n + \bar{e}. \quad (40,4)$$

Реакция (40,3) указывает, что нейтрон может переходить при поглощении нейтрино в протон с испусканием электрона. Протон согласно (40,4) при поглощении антинейтрино переходит в нейтрон и испускает позитрон.

Реакции (40,1)—(40,4) позволяют решить вопрос о тождественности нейтрино и антинейтрино. Если нейтрино отличается от антинейтрино, то антинейтрино, полученные в реакции (40,1) при электронном распаде нейтрона, могут приводить к обратному  $\beta$ -распаду только при взаимодействии с протоном. Если же нейтрино и антинейтрино тождественны, то частицы, возникающие в реакции (40,1), будут приводить к обратному  $\beta$ -процессу при взаимодействии как с нейтроном, так и с протоном.

Ядерные реакторы при электронном  $\beta$ -распаде продуктов деления излучают антинейтрино (реакция (40,1)). С помощью полученных таким способом антинейтрино Райнес и Коуэн [34] изучали реакцию  $\bar{\nu} + p \rightarrow n + \bar{e}$ .

В опытах регистрировались совпадения между  $\gamma$ -квантами, образующимися при аннигиляции позитрона, и  $\gamma$ -квантом, излучаемым при захвате нейтрона кадмием, примешанным в систему. Эти опыты были повторены в лучших условиях в 1956 [35] и в 1957 г. [36]. При этом были соответственно получены для эффективного сечения реакции (40,4) следующие значения:  $(12 \pm 6) \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$  и  $6 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$ . Эти опыты можно рассматривать как опыты, дающие непосредственное подтверждение существования нейтрино.

Если нейтрино и антинейтрино тождественны ( $\nu = \bar{\nu}$ ), то излучаемые из реактора антинейтрино могли бы приводить к реакции типа (40,3). Примером такой реакции может служить реакция

$$\bar{\nu} + \text{Cl}^{37} \rightarrow \text{A}^{37} + e, \quad (40,5)$$

указанная в 1946 г. Понтекорво. О наличии этой реакции можно было бы судить по выделяющемуся инертному радиоактивному (электронный захват) газу аргону. Попытки обнаружения реакции (40,5) с помощью антинейтрино, получаемых от реакторов, были предприняты Дэвисом [37]. Обнаружение реакции (40,5) свидетельствовало бы о тождественности:

нейтрино и антинейтрино. В пределах ошибок эксперимента такая реакция обнаружена не была.

Вторая возможность выяснения вопроса о тождественности нейтрино и антинейтрино заключается в исследовании двойного  $\beta$ -распада. Двойной  $\beta$ -распад должен происходить при превращении ядра в изобарное ядро с зарядом, отличающимся на две единицы от материнского ядра, если этот переход не происходит (вследствие энергетических соображений или из-за очень большого запрета) путем двух последовательных  $\beta$ -распадов через промежуточное изобарное ядро. Вероятность двойного  $\beta$ -распада очень мала, так как она пропорциональна четвертой степени константы взаимодействия  $g$  электронно-нейтринного поля с нуклоном. Численное значение вероятности двойного  $\beta$ -распада очень существенно зависит от того, являются ли нейтрино и антинейтрино разными частицами или нет.

Если нейтрино и антинейтрино разные частицы, то при двойном  $\beta$ -распаде должны испускаться четыре частицы: два электрона и два антинейтрино. Энергия перехода  $E$  будет распределяться между четырьмя частицами, поэтому суммарная энергия двух электронов будет изменяться от нуля до энергии перехода. Если нейтрино и антинейтрино тождественные частицы, то нейтрино, вылетевшее при распаде одного нейтрона, может поглотиться при распаде второго нейтрона, т. е. в этом случае двойной  $\beta$ -распад будет сопровождаться вылетом только двух электронов, суммарная энергия которых равна энергии перехода. Таким образом, путем измерения суммарной энергии двух электронов, выделяющихся в двойном  $\beta$ -переходе, можно было бы решить вопрос о тождественности нейтрино и антинейтрино. Практическое выполнение таких измерений пока не удавалось из-за очень малой вероятности распада.

Кроме различия в суммарной энергии вылетающих электронов, указанные две возможности двойного  $\beta$ -распада существенно отличаются своими временами жизни. Если бы нейтрино и антинейтрино были одинаковыми, то двойной  $\beta$ -распад без вылета нейтрино был бы значительно более вероятен, чем двойной  $\beta$ -распад с вылетом двух антинейтрино. При первом типе распада нейтрино появляются только в промежуточном состоянии, поэтому число возможных состояний, участвующих в распаде, будет значительно больше, чем в случае распада с выделением двух антинейтрино, суммарная энергия которых определяется законом сохранения энергии.

Время жизни ядра по отношению к двойному  $\beta$ -распаду с выделением двух антинейтрино было рассчитано Геперт-Майер [38]. Численное значение времени жизни зависит от величины матричного элемента перехода, и грубые оценки приводят к величине  $\sim 10^{19} - 10^{20}$  лет. Время жизни двойного  $\beta$ -распада без испускания нейтрино  $\sim 10^{15} - 10^{16}$  лет [39] (для ядра  $\text{Ca}^{48}$ ). Последние измерения времени жизни двойных  $\beta$ -распадов  $\text{Ca}^{48} \rightarrow \text{Tl}^{48}$  и  $\text{Zr}^{96} \rightarrow \text{Mo}^{96}$ , выполненные Авшаломом [40], указывают, что время полураспада  $\text{Ca}^{48}$  больше  $2 \cdot 10^{18}$  лет, а время полу-

распада  $Zr^{96}$  больше  $0,5 \cdot 10^{18}$  лет. Эти данные подтверждают вывод, полученный в экспериментах с нейтрино атомных реакторов, о разных свойствах нейтрино и антинейтрино.

Нарушение закона сохранения четности в процессах  $\beta$ -распада, как показал Ландау [41] и независимо от него Салам [42], Ли и Янг [43], привели к возможности существования новых свойств у нейтрино.

Уравнение Дирака для всех частиц со спином  $1/2$  и нулевой массой распадается на две пары не связанных друг с другом уравнений, соответствующих разным поляризациям частицы. Эти уравнения, однако, переходят друг в друга при операции зарядового сопряжения. Если же требовать, чтобы сохранилась инвариантность только при комбинированной инверсии, то мы приходим к заключению, что нейтрино описывается только одной парой уравнений. В этом случае нейтрино будет характеризоваться только одним состоянием поляризации — только по (или только против) направлению движения. Такие нейтрино Ландау назвал *продольно поляризованными нейтрино*. Продольно поляризованные нейтрино должны иметь нулевую массу покоя. Антинейтрино всегда поляризованы противоположным образом по отношению к нейтрино.

Если спин образно представить как вращение, то продольная поляризация нейтрино будет указывать на то, что направление вращения нейтрино всегда связано с направлением движения. В этом смысле движение нейтрино напоминает движение винта.

Неразрывная связь вращения и поступательного движения возможна только у объекта, который всегда движется со скоростью света. Если бы скорость нейтрино  $v$  была меньше скорости света, то в системах координат, движущихся со скоростью, большей  $v$ , связь между вращением и поступательным движением была бы у нейтрино обратной по отношению к связи в системах координат, движущихся со скоростью, меньшей  $v$ . Поскольку внутренние свойства нейтрино не должны зависеть от выбора системы координат, то нейтрино должно двигаться со скоростью света и, следовательно, должно иметь нулевую массу покоя.

Как было показано в § 39, для объяснения опытов Ву и др. необходимо положить  $C'_T = -C_T$ , если  $\beta$ -распад с правилами отбора Гамова — Теллера обусловлен только тензорным взаимодействием ( $C_A = 0$ ), или  $C'_A = C_A$ , если этот распад обусловлен только псевдоскалярным взаимодействием ( $C_T = 0$ ). Таким образом, оператор взаимодействия должен иметь вид

$$H'_T = gC_T \int (\psi_p^\dagger \beta \sigma \psi_n) (\psi_e^\dagger \beta \sigma [\psi_\nu - \gamma_5 \psi_\nu]) d\tau, \quad \text{если } C_A = 0, \quad (40,6)$$

$$H'_A = gC_A \int (\psi_p^\dagger \sigma \psi_n) (\psi_e^\dagger \sigma [\psi_\nu + \gamma_5 \psi_\nu]) d\tau, \quad \text{если } C_T = 0. \quad (40,7)$$

Поскольку (см. приложение III) действие оператора  $\gamma_5$  на нейтринную функцию эквивалентно действию оператора  $\sigma n$ , где  $n = \frac{cp}{\epsilon}$  — еди-

ничный вектор,  $\mathbf{p}$  — импульс,  $\varepsilon$  — энергия нейтрино, то можно написать:

$$\psi_{\nu} - \gamma_5 \psi_{\nu} = (1 - \sigma \mathbf{n}) \psi_{\nu} \equiv F_{\nu},$$

$$\psi_{\nu} + \gamma_5 \psi_{\nu} = (1 + \sigma \mathbf{n}) \psi_{\nu} \equiv \Phi_{\nu}.$$

Следовательно, выражения (40,6) и (40,7) будут содержать волновые функции  $F_{\nu}$  и  $\Phi_{\nu}$ , характеризующие испускание антинейтрино (поглощение нейтрино). Как показано в приложении III, § M, функции  $F_{\nu}$  и  $\Phi_{\nu}$  удовлетворяют соответственно уравнениям:

$$\sigma \mathbf{n} F_{\nu} = -F_{\nu}, \quad (40,8)$$

$$\sigma \mathbf{n} \Phi_{\nu} = \Phi_{\nu}. \quad (40,9)$$

Уравнения (40,8) и (40,9) определяют собственные значения оператора проекции спина на направление движения антинейтрино. Вылетающие антинейтрино имеют положительную энергию, поэтому функции  $F_{\nu}$  должны соответствовать случаю ориентации спина антинейтрино против импульса, а функция  $\Phi_{\nu}$  — ориентации спина антинейтрино по направлению импульса.

Если бы был известен вид взаимодействия при распаде (тензорное или псевдовекторное), то можно было бы указать, которая из двух функций  $F_{\nu}$  или  $\Phi_{\nu}$  описывает на самом деле антинейтрино. И наоборот, если бы была известна ориентация спина относительно импульса антинейтрино, то можно было бы определить тип взаимодействия, ответственного за  $\beta$ -распад с правилами отбора Гамова — Теллера. Так как ориентации спинов нейтрино и антинейтрино противоположны, то вопрос о типе взаимодействия можно было бы решить и путем измерения поляризации нейтрино по отношению к направлению импульса.

Согласно неопубликованным данным М. Гольдхаберу, Суньяру и Гродзницусу удалось измерить поляризацию нейтрино, выделяющихся из ядра  $\text{Eu}^{152}$  при захвате орбитального электрона ( $K$ -захват, см. § 41). Было установлено, что спин нейтрино направлен против импульса (спин антинейтрино направлен по импульсу). Если результаты этих опытов подтвердятся, то они будут свидетельствовать о том, что  $\beta$ -распад с правилами Гамова — Теллера обусловлен псевдовекторным взаимодействием.

Гипотеза о продольных нейтрино позволяет дать очень наглядную интерпретацию обнаруженного в опытах Ву и др. преимущественного испускания электронов в сторону, противоположную направлению спина радиоактивного ядра  $\text{Co}^{60}$ . При разрешенном  $\beta$ -распаде с правилами отбора Гамова — Теллера электрон и нейтрино испускаются с параллельными спинами. Поскольку при распаде  $\text{Co}^{60}$  спин уменьшается на единицу, то суммарный спин, уносимый электроном и нейтрино, должен совпадать с направлением спина ядра  $\text{Co}^{60}$ . Если  $\beta$ -распад  $\text{Co}^{60}$  обусловлен тензорным взаимодействием, то антинейтрино движутся в сторону, противоположную направлению своего спина. Поэтому если спин ядра  $\text{Co}^{60}$  направлен вверх, как указано на рис. 47, а, то антиней-

трино должно двигаться вниз. Вследствие угловой корреляции между направлением вылета электронов и нейтрино (см. § 37) электроны при тензорном взаимодействии также будут двигаться вниз.

Если же  $\beta$ -распад  $\text{Co}^{60}$  обусловлен псевдовекторным взаимодействием, то антинейтрино движется в сторону направления своего спина (рис. 47, б). Однако и в этом случае электроны будут двигаться преимущественно вниз, так как коэффициент, определяющий угловую корреляцию между направлениями вылета легких частиц, отличается знаком от соответствующего коэффициента при тензорном взаимодействии.

Рис. 47 дает также наглядное представление о поляризации электронов при  $\beta$ -распаде. Вследствие угловой корреляции направление движения электронов связано с направлением движения антинейтрино, спин же электронов параллелен спину антинейтрино и поэтому тоже связан с направлением движения антинейтрино. Максимальная поляризация электрона будет определяться отношением скорости электрона к скорости света\*).

Проведены также измерения [44] с ориентированными ядрами  $\text{Co}^{58}$ .  $\beta$ -распад  $\text{Co}^{58}$  происходит на первый возбужденный уровень  $\text{Fe}^{58}$  с последующим переходом в основное состояние при испускании  $\gamma$ -квантов энергии 0,805 Мэв. Анизотропия в испускании  $\gamma$ -лучей использовалась для определения степени поляризации ядер. При  $\beta$ -распаде  $\text{Co}^{58}$  испускаются позитроны и происходит переход между спиновыми состояниями ядер:  $2^+ \rightarrow 2^+$ . Такому переходу могут соответствовать как правила отбора Гамова — Теллера, так и правила отбора Ферми. В опытах обнаружена значительная асимметрия в направлении вылета позитронов: большая часть позитронов испускается в направлении спина ядра  $\text{Co}^{58}$ .

Коэффициент  $\alpha$ , определяющий анизотропию в направлениях вылета позитронов, оказался примерно в 3 раза меньше соответствующего коэффициента для случая  $\beta$ -распада ориентированных ядер  $\text{Co}^{60}$ .

\*) Алиханов, Елисеев и Любимов показали, что поляризация электронов  $\beta$ -распада  $\text{Tl}^{170}$ ,  $\text{Re}^{186}$ ,  $\text{Sm}^{153}$ ,  $\text{Lu}^{177}$ ,  $\text{Au}^{186}$ ,  $\text{Zr}^{90}$  равна  $\frac{v}{c}$  с точностью до 4—10%.

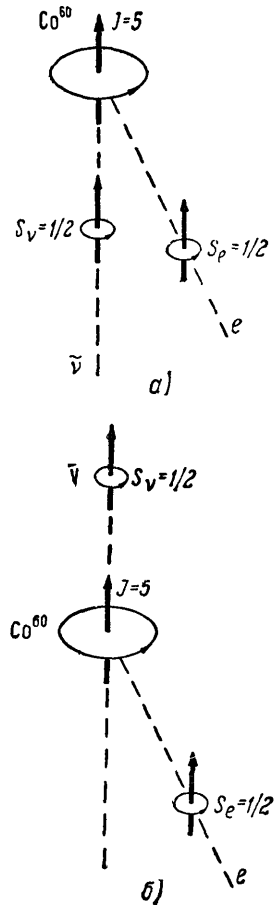


Рис. 47.  $\beta$ -распад ориентированного ядра  $\text{Co}^{60}$ : а — тензорное взаимодействие; б — псевдовекторное взаимодействие.

Преимущественное испускание позитронов в направлении спина ядра соответствует отрицательному знаку коэффициента  $\alpha$ . Такое свойство асимметрии испускания позитронов ориентированными ядрами  $\text{Co}^{58}$  легко понять согласно теории двухкомпонентных нейтрино, если допустить, что имеет место только взаимодействие с правилами отбора Гамова — Теллера. При испускании позитронов вылетают правовинтовые нейтрино, если  $\beta$ -распад вызывается тензорным взаимодействием. Такие нейтрино должны лететь в направлении спина ядра, следовательно, преимущественно в том же направлении должны вылетать и позитроны. Если  $\beta$ -распад вызывается псевдовекторным взаимодействием, то испускание позитронов должно сопровождаться вылетом левовинтовых нейтрино против направления спина ядра. Позитроны должны лететь вследствие угловой корреляции в сторону, противоположную направлению полета нейтрино, т. е. в направлении спина ядра.

В экспериментах Гарвина, Ледермана и Вейнриха [45] и Фридмана и Телегди [46] было установлено несохранение четности при распаде  $\pi$ -мезона на  $\mu$ -мезон и нейтрино и при распаде  $\mu$ -мезона на электрон и два нейтрино. Обсуждение этих экспериментов выходит за рамки нашего курса, в котором не рассматриваются процессы, происходящие с мезонами.

Легко убедиться, что теория  $\beta$ -распада с двухкомпонентными нейтрино не инвариантна относительно пространственной инверсии и, следовательно, соответствует случаю несохранения четности. В самом деле, при операции инверсии пространственных координат изменяется направление импульса (полярный вектор) и не меняется направление ориентации спина (аксиальный вектор). Таким образом, инверсия пространственных координат нарушает связь между направлением импульса и ориентацией спина нейтрино. Эта теория также не инвариантна относительно операции зарядового сопряжения, так как такая операция, заменяя частицы античастицами, не изменяет ни направления импульса, ни направления ориентации спина. Теория, однако, инвариантна относительно операции комбинированной инверсии, т. е. относительно одновременного применения операции зарядового сопряжения и операции пространственной инверсии, так как такая комбинированная инверсия, заменяя нейтрино антинейтрино, одновременно меняет направление импульса, оставляя неизменным направление спина.

### § 41. Захват орбитальных электронов

Бета-распад с испусканием электронов или позитронов может происходить в том случае, когда энергия перехода ( $E$ ) превышает энергию покоя электронов. В связи с тем, что позитрон является античастицей по отношению к электрону, процесс испускания позитрона эквивалентен процессу поглощения электронов. Поэтому наряду с позитронным  $\beta$ -распадом:

