

ОПЫТЫ С НЕЙТРИНО *)

Г. Людерс

1. ИСТОРИЯ НЕЙТРИННОЙ ГИПОТЕЗЫ

Нейтрино было введено в физику В. Паули в 1930 г. как гипотетическая частица**), с целью преодолеть трудности в понимании β -распада атомных ядер. Как известно, при β -распаде ядро атома сохраняет свое массовое число, но меняет заряд на единицу, что объясняется испусканием одного (положительно или отрицательно заряженного***) электрона. Соответствующие состояния исходного и конечного ядра обладают определенными значениями энергии; это следует как из основных положений квантовой механики, так и из опыта. Если при β -распаде справедлив закон сохранения энергии, то электроны распада должны обладать определенной энергией, которая должна быть равна разности энергий начального и конечного состояний распадающегося ядра. Известно, что на опыте имеет место непрерывное распределение энергий электронов распада между нулем и некоторой максимальной, характерной для данного распада энергией (рис. 1). Н. Бор высказал интересную, но не оправдавшуюся гипотезу о невыполнении закона сохранения энергии при β -распаде¹. Паули принадлежит оказавшееся плодотворным предположение о том, что даже при β -распаде выполняются обычные законы сохранения, но, что кроме электрона при этом испускается еще одна частица, электрически нейтральная и поэтому остающаяся незамеченной, а именно — нейтрино.

Если для краткости ядро с числом протонов Z и числом нейтронов N обозначить (Z, N) , то согласно нейтринной гипотезе реакция β -распада

*) Naturwissenschaften, 45, 456 (1958). Перевод А. О. Вайсенберга.

**) Нейтринная гипотеза была впервые высказана Паули в письме Гейгеру и Л. Мейтнер (1930 г.) и развита в его лекциях, прочитанных в Пасадене (Калифорния) и Риме весной и осенью 1931 г. Наименование нейтрино для этой частицы было предложено Ферми тогда же в Риме. (Эти замечания об истории вопроса принадлежат Паули, высказавшему их в январе 1957 г. в цюрихской лекции: автор благодарит Р. Джоста, познакомившего его с записью этой лекции. В часто цитируемых замечаниях Паули на Сольвеевском конгрессе 1933 г., представляющих собой единственный доступный автору источник тех лет Rapports et discussions du septieme Conseil de physique sous les auspices de l'Institut International de Physique Soloay (Конгресс проходил с 22 по 29 октября 1933 г.), стр. 324, Gauthier—Villars, Paris, 1934, уже утверждается, что нейтрино имеет небольшую и возможно даже исчезающе малую массу (не большую по порядку величины, чем масса электрона), спин равный $1/2$ и подчиняется статистике Ферми.

***) При естественном β -распаде, который только и был известен в начале тридцатых годов, ядро испускает отрицательные электроны. Это происходит потому, что тяжелые α стабильные ядра обладают избытком нейтронов над протонами, а при α -распаде, который является первичным процессом при естественной радиоактивности, ядро теряет одинаковое число протонов и нейтронов, что еще больше увеличивает избыток нейтронов. Последующий β -распад с испусканием отрицательных электронов восстанавливает нейтрон-протонное отношение до значений, характерных для стабильных тяжелых ядер.

имеет следующий вид:

$$(Z, N) \rightarrow (Z \pm 1, N \mp 1) + e^{\mp} + \nu,$$

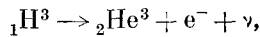
где e означает электрон или позитрон, а ν — нейтрино. Непрерывное распределение энергии у электронов распада объясняется тем, что освобождающаяся в элементарном акте распада энергия распределяется различным образом между электроном и нейтрино. β -распад с уменьшением числа



Рис. 1. Распределение энергии электронов при β -распаде (схематически).

протонов в ядре на единицу может происходить либо испусканием позитрона, либо путем захвата электрона из оболочки атома. В обоих случаях происходит испускание нейтрино.

Нейтринная гипотеза Паули и идея Иваненко и Гейзенберга² о ядре, состоящем из нейтронов и протонов, сделали возможной количественную теорию β -распада, разработанную Ферми³. Эта теория предсказала, в частности (в исключительном хорошем согласии с весьма точными измерениями, выполненными позже), распределение энергии электронов распада в так называемых разрешенных переходах. По поведению спектра электронов вблизи максимальной энергии можно судить о массе нейтрино. β -распад трития



который благодаря небольшой максимальной энергии электронов (около 18 кэв) особенно подходит для этого, дает⁴

$$\frac{\text{масса нейтрино}}{\text{масса электрона}} < \frac{1}{1000}.$$

Наиболее простое предположение о том, что масса нейтрино точно равна нулю, не противоречит опыту. Действие производимых нейтрино было обнаружено еще в 1940 г. по сохранению импульсов при захвате электрона: испускание нейтрино может быть обнаружено (если считать справедливым закон сохранения импульса) по импульсу ядра, образующегося при захвате электрона. Такие опыты, исследующие отдачу ядра, весьма сложны и не очень точны, так что практически из них нельзя извлечь никаких данных о массе нейтрино. Импульс, передаваемый нейтрино, был обнаружен и в обычном β -распаде (еще в 1950 г.) по одновременному измерению импульсов электрона распада и образовавшегося ядра отдачи. Измерения распределения углов между направлениями вылета электрона и нейтрино весьма важны, так как по этим распределениям можно восстановить некоторые детали взаимодействия при β -распаде.

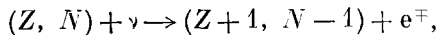
После 1950 г. сильно возросло число известных элементарных частиц⁶. Некоторые из этих нестабильных частиц испытывают распады, при которых испускаются легкие нейтральные частицы: предполагают, что среди этих частиц есть также и нейтрино.

2. ОБНАРУЖЕНИЕ СВОБОДНЫХ НЕЙТРИНО

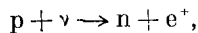
Если принять справедливость законов сохранения энергии и импульса при β -распаде, то можно сказать, что существование нейтрино доказывается непрерывным характером спектра электронов при β -распаде и опытами по отдаче ядер. Однако значительно большее удовлетворение могло дать бы обнаружение свободного нейтрино.

По гипотезе Паули с каждым β -распадом связано возникновение нейтрино. Поэтому каждое радиоактивное вещество должно испускать поток нейтрино. Среди ядерных реакций, ответственных за выделение энергии в звездах, имеются β -распады, поэтому от звезд и, в частности, от Солнца приходит нейтринное излучение. Сильнейшим и непрерывно работающим земным источником нейтрино является урановый котел, в котором при делении урана возникают β -активные вещества. Они образуются потому, что в тяжелых ядрах число нейтронов превосходит число протонов (U^{235} имеет 143 нейтрона на 92 протона), тогда как в более легких β -стабильных ядрах отношение числа нейтронов к числу протонов близко к единице. Продукты деления обладают поэтому избытком нейтронов; испуская отрицательный электрон (знак заряда испущенной частицы окажется важным в следующем разделе) и нейтрино, они становятся β -стабильными ядрами. На один акт деления в урановом котле возникает около 6,1 распада, при каждом из которых образуется нейтрино.

Проблема заключается только в том, чтобы обнаружить этот поток нейтрино. Для этого можно использовать так называемый обратный β -распад, которым является реакция



на возможное существование которой указывали Бете и Пайерлс вскоре после того, как Ферми создал теорию β -распада⁷. Если ввести подходящее вещество в поток нейтрино, то существование такой реакции можно обнаружить либо по конечным продуктам реакции, либо по возникновению электронов распада. Успешный опыт такого типа выполнили Коуэн и Райнес, использовавшие реакцию



в которой протоны (ядра водорода) облучались в потоке нейтрино⁸; при этом возникали нейтроны и положительно заряженные электроны. Пороговая энергия, т. е. минимальная энергия, которой должны обладать нейтрино, чтобы вызвать такую реакцию, равна $1,8 \text{ Мэв}$.

Вблизи реактора помещали сосуд со сцинтиллирующей жидкостью, в которой был растворен кадмий. Процесс, вызываемый нейтрино, и судьба возникающих продуктов реакции показаны на рис. 2: нейтрино встречает протон и поглощается им. При этом согласно рассмотренной реакции образуются положительно заряженный электрон и нейтрон. Пройдя путь всего лишь в несколько сантиметров, позитрон сталкивается с электроном; оба они аннигилируют, и при этом возникают два γ -кванта, испускаемых

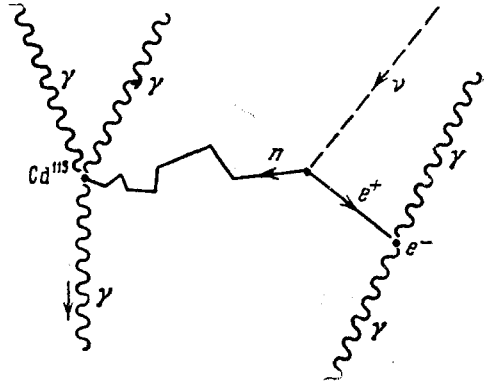


Рис. 2. Последовательность отдельных процессов в опыте Коуэна и Рейнеса.

в противоположных направлениях. Нейтрон тормозится, теряя свою энергию в столкновениях с протонами жидкости и, став медленным, захватывается ядром изотопа кадмия с массовым числом 113; при таком захвате возникают одиночные γ -кванты. γ -кванты от аннигиляции позитрона и от захвата нейтрона преобразуются сцинтиллирующей жидкостью в световые кванты малой энергии, которые в конце концов регистрируются фотоумножителями. Световые кванты малой энергии возникают также при торможении позитронов в сцинтиллирующей жидкости; по этим квантам можно сделать оценку энергии позитронов, а тем самым и энергию первичных нейтрино. Трудность опыта состоит в малом выходе рассмотренной реакции (приблизительно одно событие в час в 10 литрах жидкости). Для того чтобы получить достаточно большое число событий за измеримое время, было взято много жидкости (1400 л) и большое число фотоумножителей (110). Чтобы отделить исследуемое событие от значительно более интенсивного фона, была применена сложная электронная схема, которая давала возможность регистрировать только такие события, при которых вначале два γ -кванта от аннигиляции испускаются в почти противоположных направлениях и интервал времени между аннигиляцией позитрона и захватом нейтрона, а также энергия γ -квантов лежат в некоторых определенных пределах. Кроме того, импульсы от выделенных электронной схемой событий подавались на экран осциллографа и фотографировались, что позволяло детально рассмотреть их впоследствии. Защита установки от космического излучения и от нейтронов и γ -квантов из реактора уменьшала число нежелательных процессов. Было также исследовано поведение установки при выключенном реакторе.

Качественный результат оказался тем же, что и в первых опытах этих же авторов (они были выполнены впервые в 1953 г.): ожидаемый процесс действительно существует. Количественно он выражается величиной эффективного сечения, равной $(6,7 \pm 1,5) \times 10^{-43} \text{ см}^2$ на процесс деления. Так как в одном акте деления возникает 6,1 нейтрино, отсюда следует, что среднее эффективное сечение, отнесенное к одному нейтрино, равно $(11 \pm 2,5) \times 10^{-44} \text{ см}^2$. Дальнейшее уточнение этого экспериментального результата и более детальное сравнение с теорией оказывается трудным, так как теоретическое значение эффективного сечения сильно зависит от энергии нейтрино, а именно изменяется приблизительно обратно пропорционально квадрату его энергии. Необходимо знать энергетический спектр нейтрино, который нельзя непосредственно изменить. Для получения спектра нейтрино измеряют спектры электронов распада от продуктов деления и по ним получают спектр нейтрино из уранового котла⁹. В конце следующего раздела мы вернемся к количественному сравнению данных этого опыта с предсказаниями теории.

3. НЕЙТРИНО И АНТИНЕЙТРИНО

В физике элементарных частиц существуют различные квантовые числа, характеризующие заряд. Наиболее знакомым примером является электрический заряд: между двумя элементарными частицами возможны только такие реакции, при которых электрический заряд в левой и правой части уравнения реакции один и тот же (примером могут служить рассмотренные в этом обзоре реакции). Из наблюдаемой на опыте стабильности нуклонов (частицы, из которых построено ядро: протоны и нейтроны) следует, что существует также закон сохранения для числа барионов или барионный заряд: если нуклонам и гиперонам приписать единичный барионный заряд, то можно утверждать, что возможны лишь такие процессы, при которых барионный заряд не меняется. Повидимому, и легкие частицы

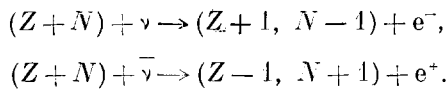
(лептоны: нейтрино, электроны, μ -мезоны) имеют свой характеристический, а именно лептонный заряд.

В физике элементарных частиц каждой частице с отличным от нуля зарядовым квантовым числом соответствует античастица, т. е. частица с одинаковыми свойствами, но противоположным значением своего заряда (зарядов). Для электрического заряда и барионного заряда это подтверждено опытом. Кроме того, для такого предположения имеются глубокие теоретические основания. Из них следует и существование лептонного заряда, и если для нейтрино он не равен нулю (он может быть равен ± 1), то в природе должны существовать два сорта нейтрино, отличающиеся знаком лептонного заряда. Их называют нейтрино и антинейтрино. За антинейтрино произвольно считают ту частицу, которая при β -распаде испускается совместно с отрицательно заряженным электроном; при этом обычному нейтрино и отрицательному электрону следует приписать одинаковый лептонный заряд. Если обычное нейтрино обозначить через ν , а антинейтрино через $\bar{\nu}$, то имеют место следующие реакции:

$$(Z, N) \rightarrow \begin{cases} (Z+1, N-1) + e^- + \bar{\nu} \\ (Z-1, N+1) + e^+ + \nu. \end{cases}$$

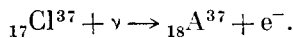
В том случае, если для нейтрино не существует квантового числа, подобного «лептонному заряду», или если это число равно нулю, то будет существовать лишь один сорт нейтрино; при этом нейтрино будет нейтральной частицей относительно всех зарядовых квантовых чисел¹⁰.

Как было отмечено в предыдущем разделе, в урановом котле происходят лишь такие β -распады, при которых испускаются отрицательные электроны, поэтому, если при β -распаде могут возникать нейтрино и антинейтрино, то урановый котел является источником антинейтрино. Антинейтрино могут вызвать отнюдь не любой обратный процесс. Это позволяет различить нейтрино и антинейтрино. Действительно, рассмотрим две реакции:



Лептоны в левой части должны иметь тот же лептонный заряд, что и электроны в правой. Если лептонный заряд как квантовое число действительно существует, то нейтрино из котла (точнее антинейтрино) могут вызвать обратный β -процесс с возникновением положительного электрона (опыты Коуэна и Райнеса), но не могут вызвать процесс, при котором возникает отрицательный электрон.

Для решения этой проблемы Р. Дэвис исследовал¹¹ реакцию



Сосуд наполняли 3800 л четыреххлористого углерода; образующийся после продолжительного облучения жидкости нейтрино β -активный Ar^{37} (период полураспада 34 дня) выделялся механическими методами и исследовался чувствительными счетчиками. Предел чувствительности этих опытов определяется тем, что Ar^{37} из Cl^{37} образуется также под действием космического излучения. Полученный результат еще не обладает полной определенностью; он является, однако, указанием на существование нейтрино одного сорта (а не нейтрино и антинейтрино).

Существование лептонного заряда может быть проверено также по времени жизни относительно так называемого двойного β -распада; эти также еще не полностью убедительные опыты лежат, однако, вне рамок нашего обзора.

Непосредственно после открытия несохранения четности при слабых взаимодействиях¹² несколько исследователей независимо предположили¹³, что спин нейтрино (собственный момент количества движения) тесно связан с направлением его движения: выражаясь точнее, у нейтрино спин направлен параллельно движению, у антинейтрино—антипараллельно*).

Связь между временем жизни при β -распаде и эффективным сечением для обратного β -процесса зависит от сохранения или несохранения четности при β -распаде. Результаты опытов Коуэна и Райнеса в соответствии с последними данными согласуются с теорией несохранения четности, предполагающей, что у нейтрино и антинейтрино имеется связь между направлением спина и направлением движения; теоретически значение эффективного сечения, для получения которого используется вычисляемый косвенным образом спектр антинейтрино, равно $(6 \pm 1) \times 10^{-43} \text{ см}^2$ на акт деления в урановом котле. Экспериментальное значение этой величины равно $(6,7 \pm 1,5) \times 10^{-43} \text{ см}^2$.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. См., например, N. B o h r, J. Chem. Soc. (London), 1932, 349 (Faraday Lecture), speziell. S. 382.
2. D. I w a n e n k o, Nature (London) 129, 312 (1932); W. H e i s e n b e r g, Z. Physik 77, 1 (1932).
3. E. F e r m i, Z. Physik 88, 161 (1934).
4. D. R. H a m i l t o n, W. P. A l f o r d u. L. G r o s s, Phys. Rev. 92, 1521 (1953).
5. L. W. A l v a r e z, A. C. H e l m h o l t z u. B. T. W r i g h t, Physic. Rev. 60, 160 (1941).
6. См. обзор: N. D e u t s c h m a n n, Naturwiss. 42, 499 (1955).
7. H. A. B e t h e u. R. P e i e r l s, Nature (London) 133, 532 (1934).
8. Старый опыт был описан с наглядными иллюстрациями в Nucl. 10, N8, 12 (1957). Автор благодарит Райнеса за сообщение о новом опыте.
9. C a r t e r, R e i n e s, W a g n e r u. W u m a n. Еще не опубликовано. Частное сообщение Райнеса автору. В этом опыте заново определено среднее число распадов на акт деления.
10. П а у л и (Nuovo Cimento 6, 204 (1957)) показал, что формально можно построить теорию β -распада с участием нейтрино и антинейтрино, но без сохранения лептонного заряда.
11. Подробное описание установки для первых опытов см. Physic. Rev. 97, 766 (1955). Автор благодарит Дэвиса за сообщение о современном положении его опытов.
12. См. также обзор G. L ü d e r s, Naturwiss. 44, 273 (1957), в котором, однако, вопрос о нейтрино не обсуждался.
13. A. S a l a m, Nuovo Cimento 5, 299 (1957); T. D. L e e u. C. N. Y a n g, Physic. Rev. 105, 1671 (1957); L. L a n d a u, Nucl. Phys. 3, 127 (1957). Исходя из математической формы теории, говорят о теории двухкомпонентного нейтрино.

*) Такое предположение совместимо с принципом относительности лишь для частицы с нулевой массой покоя. Частицу с исчезающей массой покоя можно рассматривать в системе, где она покоится. При этом утверждение о связи спина с направлением движения теряет смысл. Существовавшая вначале надежда «понять» несохранение четности в слабых взаимодействиях на основе этой гипотезы не оправдалась.