

2. ОТКРЫТИЕ НЕЙТРИНО

Открытие нейтрино связано с β -излучением. В начале XX века при изучении β -распада радиоактивных ядер появилась проблема - нарушение законов сохранения энергии, импульса и момента импульса. В 1914 Д.Чедвик обнаружил, что энергии электронов, испускаемых при β -распаде атомных ядер (в отличие от α -частиц и γ -квантов), не строго определенные, а лежат в широком диапазоне значений. В большинстве случаев энергия была меньше той, какую они должны были иметь. Создавалось впечатление, что энергия куда-то исчезает, т.е. происходит нарушение закона сохранения энергии.

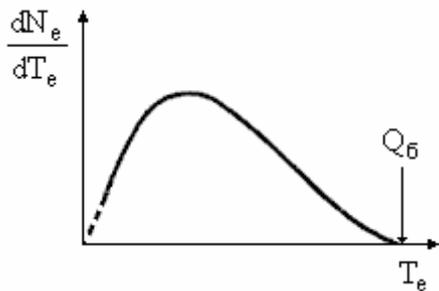
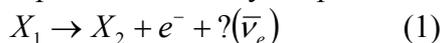


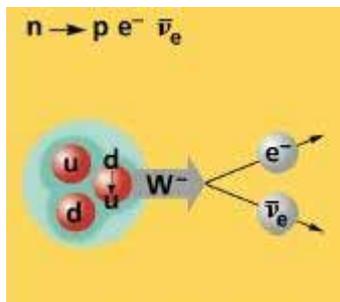
Рис.1. Спектр электронов β^- -распада

Таким образом, было выяснено, что при β -распаде электроны имеют непрерывный энергетический спектр в диапазоне от 0 до Q_β , где Q_β – энергия, выделяющаяся в реакции. А такое возможно только в случае образования трёх частиц в процессе распада. Именно непрерывность спектра электронов, образующихся при распаде, и натолкнула В.Паули в 1930 на предположение, что при β -распаде одновременно с электроном рождается какая-то частица с полуцелым спином и очень малой массой, которая и уносит недостающую часть энергии. В этом случае реакцию β -распада можно записать в виде:



Для того, чтобы проверить гипотезу Паули, необходимо было обнаружить эту частицу экспериментально. Однако ее свойства, предсказанные Паули, делали обнаружение этой частицы чрезвычайно трудной задачей из-за ее слабого взаимодействия с веществом.

Дальнейшая история нейтрино тесно связана с гипотезой о протонно-нейтринной структуре ядра и теорией β -распада. Сразу после открытия нейтрона в 1932 г. Чедвиком, Д.Иваненко и В.Гейзенберг независимо друг от друга выдвинули гипотезу, что атомное ядро состоит из нейтронов и протонов. Протоны и нейтроны в атомном ядре связаны особыми силами, для которых характерна большая величина и малый радиус действия $\sim 10^{-13}$ см. Ядерные силы существенно превосходят силы электростатического кулоновского отталкивания протонов и обуславливают большую плотность вещества ядра $\sim 10^{14}$ г/см³. Новый тип взаимодействия, связывающий нейтроны и протоны, назвали сильным взаимодействием. Однако данная модель не давала ответ на следующий вопрос: «Если в составе атомного ядра нет электронов, то откуда же берутся электроны, которые наблюдаются при радиоактивном распаде ядер?» Ответ на этот вопрос был дан в 1934 Э. Ферми в разработанной им теории β -распада. Он предложил называть частицу, охарактеризованную Паули, «нейтрино» (т.е. «нейтрончик»), по аналогии с тяжелой нейтральной частицей – нейтроном. β -распад аналогичен испусканию фотонов возбужденными атомами. Ни электронов в ядре, ни фотонов в атоме нет до момента излучения, и фотон, и электрон образуются в процессе распада. Изучение процесса β -распада показало, что испускание электронов вызвано не электромагнитным и не ядерным взаимодействием, а новым типом взаимодействия, которое было названо слабым. В своей теории Паули сформулировал основные свойства нейтрино в их современном виде. Он представил процесс ядерного β -распада как распад одного из нейтронов ядра (если, конечно, выполняются соответствующие законы сохранения) на три частицы – протон, электрон и нейтрино:



электрон и нейтрино:

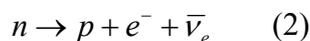
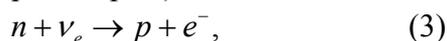


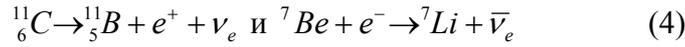
Рис. 2. Схема β -распада нейтрона через испускание виртуального W-бозона

С помощью теории Ферми была рассчитана форма спектра β -электронов, оказавшаяся вблизи верхней границы энергии β -электронов очень чувствительной к массе нейтрино. Сравнение теоретической формы спектра с экспериментальной показало, что масса нейтрино много меньше массы электрона (и, возможно, равна нулю). Теория Ферми объяснила все основные черты β -распада, и её успех привёл физиков к признанию нейтрино. Как выяснилось позже, гипотеза Паули «спасла» не только закон сохранения энергии, но и законы сохранения импульса и момента количества движения, а также основные принципы статистики частиц в квантовой механике.

Было предложено два варианта опытов для обнаружения нейтрино. Первый - наблюдение обратного β -распада - впервые рассмотрен Х. Бете и Р. Пайерлсом в 1934. Обратным β -распадом называются реакции (существование которых следует из теории Ферми):



происходящие как на свободных, так и на связанных в ядрах нуклонах. Оценка вероятности поглощения нейтрино дала поразительный результат: в твёрдом веществе нейтрино с энергией, характерной для β -распада, должно пройти расстояние порядка сотен световых лет, прежде чем будет захвачено ядром. Другой путь - наблюдение отдачи ядра в момент испускания нейтрино. Как известно, при превращениях частиц сохраняется не только энергия, но и количество движения, или импульс. Можно, например, исследовались импульсы частиц, образующихся в реакции:



Если протон, испытывающий бета-распад, неподвижен, то его импульс равен нулю. Значит, и суммарный импульс всех частиц - продуктов распада - также должен быть равен нулю. Если нейтрино не образуется, то в первой реакции импульсы ${}^5_5\text{B}$ и позитрона будут равны по модулю, а если образуется - то не равны. Опыт показал, что суммарный импульс позитрона и ядра отдачи при бета-распаде ядра ${}^6_6\text{C}$ не равен нулю. Это подтверждает гипотезу о существовании нейтрино: неизвестная частица уносит «исчезающий» импульс. Во второй реакции, если нейтрино существует, то ${}^7\text{Li}$ получает импульс, равный и противоположный по знаку импульсу нейтрино. Первый успешный опыт с этой реакцией был выполнен Дж. Алленом в 1942.

Эти эксперименты свидетельствовали лишь об образовании нейтрино в точке распада. Они лишь доказывали выполнение законов сохранения при возможном существовании нейтрино. Необходимо было детектировать нейтрино в свободном состоянии - на некотором расстоянии от места его рождения. Такое экспериментальное подтверждение существования теоретически предсказанной частицы произошло лишь спустя 23 года после предположения Паули, когда Ф. Райнесу и К. Козну удалось запечатлеть результаты взаимодействия нейтрино, используя ядерный реактор деления в качестве источника частиц, а хорошо экранированный сцинтилляционный детектор - в качестве детектора.

В 1953 ученые впервые попытались продемонстрировать существование нейтрино, до тех пор считавшейся чисто гипотетической частицей. Учитывая ее «призрачные» свойства, эксперимент был назван «Проект Полтергейст». Сложность этой задачи объяснялась колоссальной проникающей способностью, которая ожидалась для нейтрино.

Пример 1. Рассчитаем максимальную толщину свинцовой плиты, сквозь которую сможет пролететь не взаимодействуя нейтрино с энергией 1 МэВ. Пусть пучок, содержащий N_0 нейтрино, налетает на мишень с плотностью n ядер в 1 см^3 и длиной вдоль направления пучка R см. Предположим, что N частиц из пучка испытают взаимодействие в мишени. Тогда:

$$N = N_0(1 - e^{-n\sigma R}). \quad (5)$$

При значении $n\sigma L \ll 1$ (а для взаимодействия нейтрино с веществом это всегда так, кроме вещества в сверхплотном состоянии, например нейтронных звезд) формула упрощается:

$$N = N_0 n \sigma R. \quad (6)$$

Отношение числа провзаимодействовавших частиц к числу падающих на мишень есть вероятность взаимодействия:

$$W = \frac{N}{N_0} = n \sigma R \quad (7)$$

Возьмем 100% вероятность взаимодействия нейтрино - $W=1$. Тогда пройденный частицей путь R :

$$R = \frac{1}{\sigma n}. \quad (8)$$

Плотность свинца равна $11,35 \text{ г/см}^3$, молярная масса = 207 г/моль. Тогда

$$n = \frac{N_A \rho}{M} = \frac{10^{23} \cdot 11,35}{207} \approx 0,33 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}. \quad (9)$$

И соответственно

$$R = \frac{1}{\sigma n} = \frac{1}{0,33 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-43}} = 3 \cdot 10^{20} \text{ см} \approx 10^{15} \text{ км}. \quad (10)$$

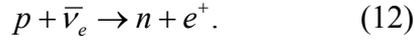
Заметим, что расстояние от Земли до Солнца равно 150 млн. км, т.е. $1,5 \cdot 10^8$ км. Нейтрино могут беспрепятственно проникать сквозь чугунную плиту, толщина которой в $10^{15}/10^8 = 10^7$ в миллионы раз превышает расстояние от Земли до Солнца. Можно вычислить интенсивность пучка N_0 , которая необходима для регистрации нейтрино. Для детектора длиной 100 м $N_0=10^{18}$ (при площади детектирования 1 см^2) Необходимую интенсивность потока можно уменьшить, если увеличить площадь детектора и пучка до величины 10 м^2 . Но и в этом случае потребуется нейтринный источник огромной силы - 10^{15} . Понятно, что пропускать одно нейтрино сквозь астрономическую толщину вещества, чтобы оно с большой вероятностью прореагировало, нереально. Был реализован другой вариант - пропускать астрономическое число нейтрино

через метровую толщину жидкого или твердого вещества. Такой эксперимент стал возможен благодаря использованию ядерных реакторов.

В каждом акте деления образуется несколько β -радиоактивных ядер. И если справедлива гипотеза о существовании нейтрино, то в распадах таких ядер нейтроны должны испытывать превращения согласно схеме:



Мощные реакторы - интенсивные источники антинейтрино. Атомный реактор мощностью 300 тысяч киловатт каждую секунду испускает $5 \cdot 10^{19}$ антинейтрино, поэтому регистрация отдельных событий, вызванных антинейтрино, возможна. Реакцией, позволяющей такую регистрацию, является обратный бета-распад. В частности, в своем эксперименте Райнес и Коэн решили использовать реакцию взаимодействия антинейтрино с протоном:



В 1949 была открыта сцинтилляция в органических жидкостях. И именно такой сцинтиллятор мог быть использован для построения большого детектора ($V=1$ л). Вторым необходимым для регистрации нейтрино компонентом был большой водородсодержащий детектор ($V=300$ л). Детекторы просматривались 90 ФЭУ, разделенные на две группы по 45 ФЭУ каждая, для регистрации совпадающего сигнала. Возникающие в результате реакции с протонами позитроны, регистрировались по аннигиляционным γ -квантам, возникшим при взаимодействии позитронов с электронами вещества мишени.

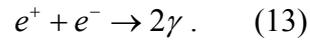
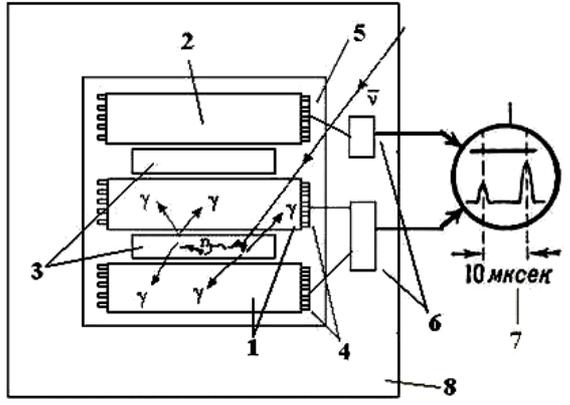


Рис.3. Схема детектора в опыте Райнеса и Коэна по регистрации антинейтрино: 1 - два жидких сцинтилляционных детектора (1400 л каждый) для регистрации антинейтрино; 2 - сцинтилляционный детектор (также 1400 л) для регистрации фона космических лучей, включенный на антисовпадения с детектором 1; 3 - две водяные мишени объемом 200 л каждая; 4 - две группы фотоумножителей, включенные на совпадение; 5 - третья группа фотоумножителей, включенная на антисовпадения; — электронная аппаратура; 6 - двухлучевой осциллограф; 7- свинцовый и 8 - парафиновый экраны для защиты от излучений реактора.

Детектирование осуществлялось с помощью сцинтиллятора, а в качестве протонной мишени использовался растворенный в сцинтилляторе пропионат кадмия $C_3H_5CdO_2$. В эксперименте использовался реактор в Хэнфорде (Вашингтон, США). На расстоянии 10 метров от реактора ожидаемый поток антинейтрино через 1 см^2 составлял 10^{13} частиц в секунду. Такой поток антинейтрино, бомбардирующий тонну водородсодержащего вещества (источник протонов), вызывает 100 реакций обратного β -распада в час. В качестве водородсодержащего вещества - протонной мишени – использовались два бака по 200 л каждый, заполненные раствором хлористого кадмия в воде ($CdCl_2 + H_2O$). Образующиеся в результате аннигиляции γ -кванты вызывали световые вспышки в жидком сцинтилляторе, который представлял собой три емкости по 1200 л каждая, расположенных по обе стороны от двух протонных мишеней. Световые вспышки регистрировали 100 ФЭУ.

В ходе эксперимента (**Рис.4**) образующиеся в реакции нейтроны замедлялись в мишени до тепловых энергий и поглощались ядрами кадмия. Кадмий имеет большое сечение реакции (n, γ) захвата тепловых нейтронов. В результате захвата нейтронов изотопы кадмия образовывались в возбужденном состоянии. Переход их в основное состояние сопровождался испусканием 3-5 γ -квантов. Идентификация антинейтрино производилась с помощью метода запаздывающих совпадений, регистрируя аннигиляционные γ -кванты и образующиеся приблизительно через 10 мкс γ -кванты из реакции радиационного захвата на ядрах кадмия.

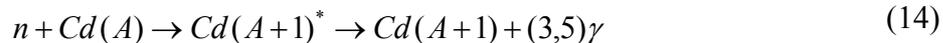


Схема совпадений сыграла большую роль в детектировании нейтрино. Она позволила значительно упростить схему эксперимента, используя реакторные нейтрино. Для отсекающих космических лучей использовался третий сцинтилляционный детектор, работающий по схеме антисовпадений – в случае попадания в него частицы извне происходило выключение установки на некоторое время. В эксперименте было установлено, что регистрируются именно реакторные антинейтрино. Сечение реакции захвата антинейтрино протоном: $\sigma \approx 12 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$, что находится в хорошем согласии с предварительными теоретическими оценками: $\sigma \approx (5 \pm 1) \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$. Год открытия нейтрино - 1956.