

3. РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ НЕЙТРИНО

3.1 Нейтрино и антинейтрино

Сразу же после открытия антинейтрино возник вопрос – тождественна ли открытая частица нейтрино или нет. Поскольку нейтрино не имеет электрического заряда, теоретически не было исключено, что оно по своим свойствам тождественно антинейтрино, т. е. является истинно нейтральной частицей. Такое нейтрино впервые было рассмотрено итальянским физиком Э. Майорана и поэтому называлось «майорановским». В противоположность этому типу, нейтрино, не являющееся истинно нейтральным, было названо «дираковским». Для выяснения этого вопроса Р. Дэвисом в 1955 г. был поставлен эксперимент по регистрации реакции:

$$n + \bar{\nu}_e \rightarrow p + e^- \quad (15)$$

Если нейтрино и антинейтрино являются тождественными частицами, то эта реакция должна наблюдаться. Это следует из того, что имеют место реакция:

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+ \quad (16)$$

Обе реакции ((15) и (16)) при тождественности нейтрино и антинейтрино должны иметь одинаковые характерные для нейтрино (антинейтрино) сечения $\approx 10^{-43} \text{ см}^2$. В качестве источника антинейтрино снова использовались реакторные антинейтрино. Так как в природе нет нейтронных мишеней, эксперимент можно было поставить на нейтронах, входящих в состав атомного ядра. В 1946 г. Б. Понтекорво предложил использовать для этой цели реакцию:

$$\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar} \quad (17)$$

Если процесс (1) возможен, то под действием потока антинейтрино от реактора один из нейтронов, входящих в состав ядра ${}^{37}\text{Cl}$, будет превращаться в протон, что приводит к образованию радиоактивного изотопа ${}^{37}\text{Ar}$ с периодом полураспада 35,04 суток. Регистрируя радиоактивность изотопа, можно судить о возможности протекания реакции (1). Для регистрации процесса (3) необходимо использовать большую массу мишени, так как в случае тождественности нейтрино и антинейтрино, сечение реакции (3) мало. В качестве мишени использовалось 4000 литров раствора четыреххлористого углерода. Каждый сеанс облучения продолжался 2 месяца. Была разработана специальная методика извлечения радиоактивного изотопа ${}^{37}\text{Ar}$ из огромного объема мишени. Выделенный ${}^{37}\text{Ar}$ помещался затем в низкофоновый пропорциональный счетчик для регистрации его радиоактивности. Реакция (3) не была зарегистрирована. Для величины измеренного сечения реакции (1) была получена лишь верхняя оценка $\sigma \ll 10^{-43} \text{ см}^2$. Данное значения почти в 45 раз меньше ожидаемой величины сечения реакции, которую ожидали получить, если бы нейтрино и антинейтрино были тождественными частицами. Таким образом, эксперимент доказал, что нейтрино и антинейтрино являются разными частицами. А Р. Дэвис, создал детектор для солнечных нейтрино, используя для детектирования ту же реакцию на аргоне. Другим более точным методом проверки тождественности нейтрино и антинейтрино является исследование реакций:

$$\nu_e + N \rightarrow e^+ + X \quad (18)$$

$$\bar{\nu}_e + N \rightarrow e^- + X \quad (19)$$

под действием нейтрино, образующихся при распаде K^+ -мезонов:

$$K^+ \rightarrow \nu_e + e^+ + \pi^0 \quad (20)$$

В формулах (18, 19) N обозначает нуклоны – протоны или нейтроны, а X - совокупность всех остальных частиц, образующихся в реакциях. Если нейтрино и антинейтрино являются тождественными частицами, то при облучении нуклонов должно образовываться примерно одинаковое количество электронов и позитронов. События, вызванные реакциями (18) и (19) регистрировались с помощью пузырьковой камеры. Идентифицировались случаи реакции с электроном и позитроном в конечном состоянии. Оказалось, что при облучении пузырьковой камеры пучком нейтрино образуются только электроны. Позитроны не наблюдались. Наиболее точным методом, с помощью которого можно установить тождественность нейтрино и антинейтрино является наблюдение безнейтринного двойного бета-распада:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + e^+ + e^- \quad (21)$$

Нейтрино, образовавшееся при бета-распаде одного из нейтронов ядра (A, Z) взаимодействует с другим нейтроном образовавшегося ядра (A, Z+1). В результате такого процесса, который возможен только в случае, если нейтрино и антинейтрино тождественны, рождаются два электрона, а заряд ядра увеличивается на две единицы. Данный процесс лежит за рамками Стандартной Модели.

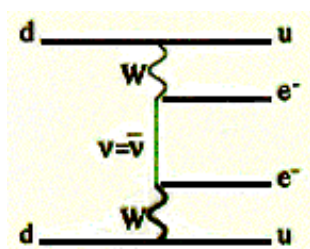


Рис. 4. Диаграмма Фейнмана для двойного безнейтринного бета-распада

Итак, электронное нейтрино всегда в конечном состоянии появляется в паре с

позитроном, а электронное антинейтрино - в паре с электроном. При облучении нуклонов в пучке нейтрино в конечном состоянии всегда наблюдаются электроны. Если реакция происходит под действием антинейтрино, среди продуктов реакции всегда присутствуют позитроны, и никогда не наблюдаются электроны. Различие в свойствах нейтрино и антинейтрино можно описать, если ввести квантовое число - электронный лептонный заряд L_e , приписав электрону и электронному нейтрино значение $L_e = +1$, а их античастицам - позитрону и электронному антинейтрино - $L_e = -1$ при законе сохранения лептонного числа. Из закона сохранения лептонного числа понятно, какие реакции с участием нейтрино возможны, а какие запрещены.

3.2 Мюонное нейтрино

Мюонное нейтрино открыто в 1961 в эксперименте на протонном синхротроне с переменным градиентом AGS (Брукхейвен, США). Это событие стало возможным после отработки методики получения пучков высокоэнергетических нейтрино на ускорителе. Поскольку были обнаружены нейтрино, образующиеся при распаде π -мезонов,



то возник вопрос - тождественны ли нейтрино, образующееся при распаде π -мезонов, и нейтрино, образующееся при β -распаде. Схема опыта по доказательству тождественности или не тождественности этих двух типов нейтрино похожа на доказательство различия нейтрино и антинейтрино. В качестве источника мюонных нейтрино использовалась реакция распада пиона. В данном процессе вероятность распада по мюонному каналу в 1000 раз больше, чем по электронному.

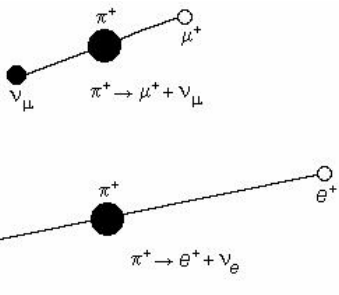


Рис. 5. Наиболее вероятные каналы распада пиона

В 1962 было показано, что нейтрино, образующиеся при распаде π -мезона, не является электронным. Оно названо мюонными нейтрино, т.к. оно всегда образуется совместно с мюоном. В результате взаимодействия пучка протонов с энергией 15 ГэВ с бериллиевой мишенью в большом количестве образуются вторичные π^+ и π^- -мезоны. Детектирование π^+ и π^- -мезонов осуществлялось с помощью черенковских счетчиков (Рис.6). Мюонные нейтрино образовывались в результате последующего распада π^+ и π^- -мезонов:

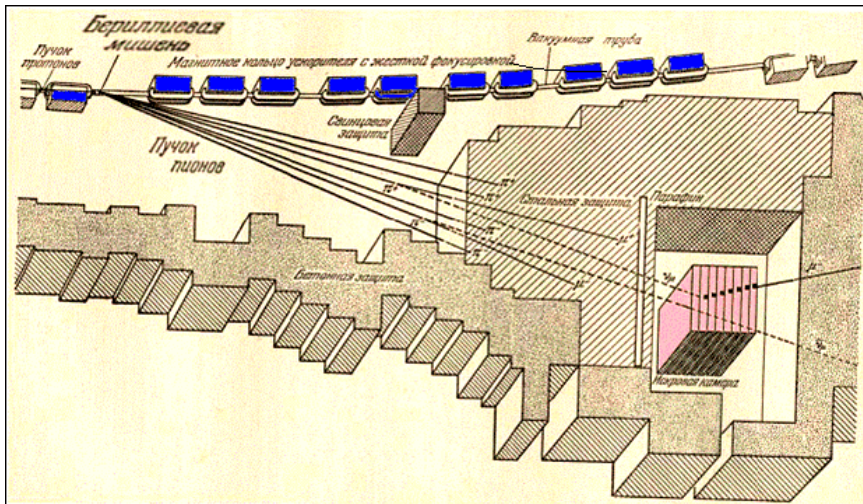


Рис. 6. Схема установки по открытию мюонного нейтрино.

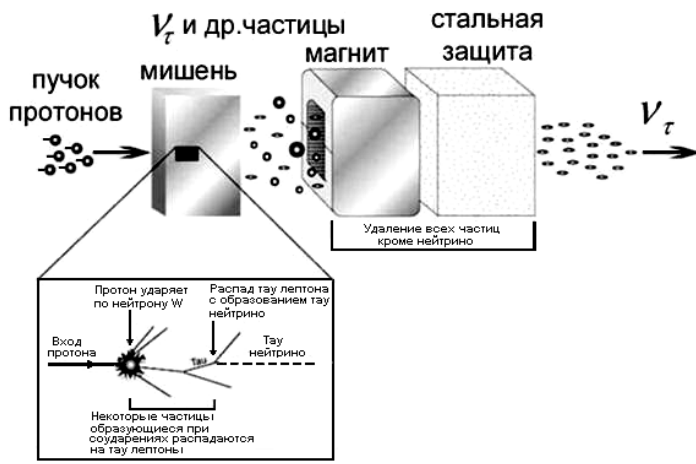


Рис. 7. Схема получения пучка тау-нейтрино в эксперименте по обнаружению тау-нейтрино на детекторе DONUT

На пролетном расстоянии 20 м между черенковским счетчиком и железной защитной стеной происходил распад π -мезонов. Все частицы, кроме нейтрино, поглощались в защитной стене. Интенсивность фона адронов при этом уменьшалась на 20 порядков. Взаимодействия с нейтронами и протонами регистрировались в детекторе, состоящем из набора искровых камер, каждая из которых состояла из 9 алюминиевых пластин размером ~ 110 см \times 110 см и толщиной 2.5 см. Зазор между пластинами составлял ~ 1 см. Между искровыми камерами располагались сцинтилляционные счетчики, регистрирующие появление заряженной частицы в детекторе. При появлении в детекторе заряженной частицы подавался импульс высокого напряжения на искровые камеры. Тип заряженной частицы (мюон или электрон) определялся по характеру искрового пробоя в искровых камерах. Общая масса нейтринного детектора составляла ~ 10 тонн.

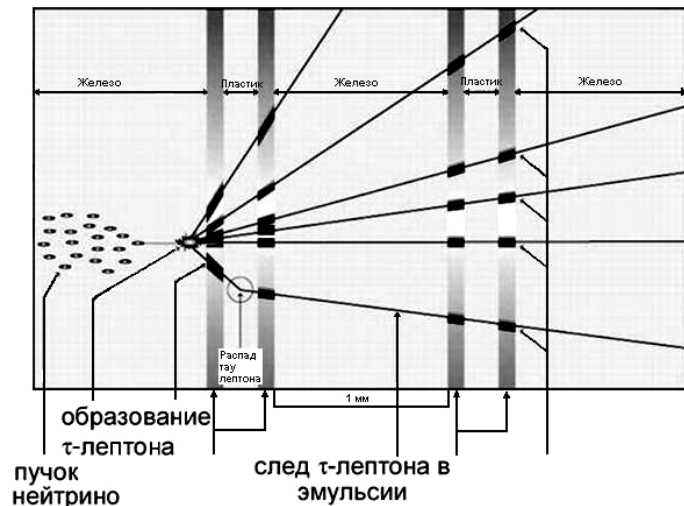
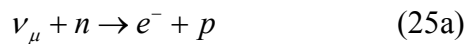
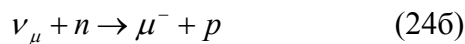


Рис. 8. Принцип детектирования тау-нейтрино в детекторе DONUT

Оказалось, что при взаимодействии нейтрино, образующихся при распаде π -мезонов, с протонами и нейтронами, наблюдаются только мюоны (24). Не обнаружено ни одного случая образования электронов или позитронов. А если бы мюонные и электронные нейтрино были тождественными частицами, то реакции (24) и (25) происходили бы с равной вероятностью. Важно, что ν_μ при столкновении с ядрами рождает μ^- и не рождает μ^+ , т. е. мюонные нейтрино и антинейтрино не тождественны. Было введено ещё одно сохраняющееся лептонное число L_τ .

3.3 Тау-нейтрино

В 1975 на коллайдере SPEAR (Стэнфорд, США) был открыт τ -лептон. Это привело к введению третьего лептонного квантового числа L_τ . Оказалось, что могут существовать только три вида нейтрино: электронное, мюонное и тау-нейтрино. Однако соответствующее таону тау-нейтрино впервые наблюдалось лишь в 2000 на детекторе DONUT. Такая временная задержка объясняется большими энергиями

сталкивающихся частиц, необходимых для образования данного типа нейтрино. Для получения тау-нейтрино пучок протонов направлялся на вольфрамовую мишень. Одним из продуктов взаимодействия протонов с ядрами вольфрама являются тау-лептоны, которые вскоре претерпевают распад с образованием тау-нейтрино. Для отсеечения всех «побочных» частиц, образующихся в мишени, использовалось магнитное поле и защитный блок.

Для детектирования использовались реакции:

$$\bar{\nu}_\tau + p \rightarrow \tau^+ + n; \quad (26)$$

$$\nu_\tau + n \rightarrow \tau^- + p \quad (27)$$

Нейтринный детектор DONUT состоял из железных пластин, между которыми располагались слои фотоэмульсии. В результате взаимодействия с железом образовывались тау-лептоны, которые оставляли в фотоэмульсии след ~ 1 мм. Всего было зарегистрировано шесть миллионов (6×10^6) потенциальных взаимодействий частиц. Проанализировав сигналы от различных элементов 15-метрового детектора, ученые отобрали лишь около тысячи событий-претендентов. И только 4 из них были признаны подлинными свидетельствами существования тау-нейтрино.