

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра теоретической физики

Нейтринные осцилляции

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 251 группы
направления (специальности) 03.04.02 Физика физического факультета

Токарева Романа Александровича

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н.



А.Г. Лазерсон

Зав. кафедрой
профессор, д. ф.-м.н.



Л.М.Бабков

Саратов 2017 год

Введение

Одной из главных задач современной физики, астрофизики и космологии является выявление массы нейтрино — величины, которая характеризует не только свойства слабых взаимодействий, но и всю эволюционную картину Вселенной. Подтверждение ненулевой массы нейтрино могло бы прояснить степень и механизм несохранения лептонного числа и, возможно, разрешить проблему скрытой материи во Вселенной. Нейтрино стало известно в физике с момента написания В. Паули письма Физическому обществу Тюбингена, в котором он постулировал существование частицы с полуцелым спином и близкой к нулю массой, для того, чтобы обеспечить сохранение энергии, импульса и углового момента в бета-распаде ядер. Спустя время Э. Ферми назвал эту частицу нейтрино. В отличие от лептонов и кварков нейтрино не имеет ни электрического, ни цветового заряда и взаимодействует с веществом только в слабых процессах за счет обмена заряженными и нейтральными промежуточными бозонами.

Целью данной работы является изучение и анализ нейтринных осцилляций.

Для достижения этих целей решались следующие **задачи**:

- Анализ нейтринных осцилляций.
- Исследование способов детектирования нейтрино.
- Анализ нейтринных экспериментов
- Исследование примеров возможных проявлений и применений нейтринных осцилляций.

Краткая характеристика материалов исследования

Эксперименты по исследованию осцилляций нейтрино с той или иной степенью достоверности показали, что у нейтрино есть масса и флэйворные состояния ν_e, ν_μ, ν_τ — это линейная суперпозиция состояний, соответствующих массивным частицам ν_1, ν_2, ν_3 .

Возникает следующий фундаментальный вопрос, является ли нейтрино частицей Дирака или Майораны. Из исследования осцилляций нейтрино ответить на этот вопрос невозможно, поэтому используют другие методы. По сути, имеется всего одна идея, и заключается она в экспериментальном поиске процессов, описываемых диаграммой на рисунке.

Рассмотрим подробнее данную диаграмму. Она соответствует обмену виртуальных нейтрино (антинейтрино) между двумя парами частиц (ℓ, W). Отметим, что такая модель не существует в концепции Стандартной модели, если нейтринно- частица Дирака. Она возможна только в случае майорановской природы. Таким образом, наблюдение процессов, описываемых этой диаграммой, будут свидетельствовать о том, что нейтрино- частица Майораны. Малость амплитуды процесса на рисунке определяется малостью массы нейтрино: $A \propto m_{eff} = \sum_i V_{ei}^2 m_i$.

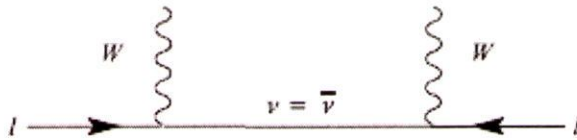
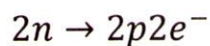


Рисунок. Класс диаграмм, которые возможны только для майорановских нейтрино.

Пропорциональность амплитуды массе нейтрино можно понять, если отметить, что она пропорциональна свертке левой и правой компонент поля нейтрино, равной нулю при нулевой массе поля. Зачастую в литературе это называют переворотом спина нейтрино. Диаграмма на рисунке 17 может описывать следующие процессы.

- Если считать W - бозоны на этой диаграмме виртуальными частицами, которые взаимодействуют с d -кварком в нейтроне, переводя его в u -кварк, а ℓ считать выходящими электронами, то диаграмма будет соответствовать реакции превращения двух нейтронов в два протона и два электрона без выходящих нейтрино или антинейтрино:



- Практически эту реакцию можно наблюдать в распадах ядер (или в нейтронных звездах), и она носит название двойной безнейтринный β -распад и обозначается $0\nu\beta\beta$. Данная реакция наиболее чувствительна к природе нейтрино, если его масса не слишком велика. Поиски таких распадов проводились и проводятся в экспериментах с различными ядрами, и таких распадов пока не найдено. Только в одном эксперименте Гейдельберга-Москва частью коллаборации было объявлено наблюдении распада $0\nu\beta\beta$. Масса майорановского нейтрино оценена в пределах 0.2-0.6 эВ. Однако этот результат подвергся критики со стороны научного сообщества. Сейчас планируется ряд новых экспериментов по поиску $0\nu\beta\beta$ распада.

- Тяжелое нейтрино Майораны (с массой в сотни ГэВ, ТэВ) можно искать на ускорителях в реакции столкновения двух лептонов одинакового заряда с рождением двух W -бозонов:

$$l^-l^- \rightarrow W^-W^-$$

Сечение такого процесса сильно зависит от массы майорановского нейтрино. Оно исчезающе мало при $m_\nu \rightarrow 0$ и $m_\nu \rightarrow \infty$ и потенциально измеримо на коллайдерах, если $m_\nu \sim \text{ТэВ}$.

Структура и объем ВКР

Магистерская работа состоит из Введения, пяти разделов основного текста:

- 1 - Осцилляции нейтрино;
- 2 - Первые детекторы нейтрино;
- 3 - Способы детектирования нейтрино;
- 4 - Эволюция во времени;
- 5 - нейтринные эксперименты: прошлое и настоящее;

Выводов;

Списка использованных источников, состоящего из 35 наименований.

Материалы работы изложены на 59 страницах.

Научная значимость работы

Работа носит теоретический характер. Прежде чем рассмотреть существующие способы детектирования нейтрино, обозначим характерные особенности и проблемы, возникающие во время этого процесса.

Особенности детектирования нейтрино

Поток нейтрино, детектируемых на Земле, характеризуется тем, что:

1) Можно выделить несколько типов нейтрино по энергии, соответственно различаются и методы детектирования, наиболее чувствительные к разным типам нейтрино;

2) Поток почти беспрепятственно проходит через вещество, включая Землю, поэтому нейтрино долетают до детектора как днем – сверху, так и ночью – со стороны Земли. Так же поток не отклоняется магнитными полями, и, как следствие, можно точно определить его источник;

3) Поток имеет относительно слабую интенсивность по сравнению с другими частицами.

Существуют 3 основных способы детектирования нейтрино:

1. Радиохимический
2. Рассеяние нейтрино на электронах
3. Поглощение нейтрино – прямой счет

В свою очередь радиохимические детекторы различаются по используемому в них активному веществу, в котором взаимодействует нейтрино:

- хлорные (эксперимент Homestake)
- галлиевые (эксперименты SAGE, GALLEX)

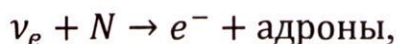
Нейтринные детекторы, основным процессом в которых является рассеяние на электронах, различаются в зависимости от основного вещества детектора, а также способа детектирования электронов рассеяния:

- черенковские (эксперименты Kamiokande-II, Super Kamiokande, SNO, BAIKAL, ANTARES, AMANDA)
- сцинтилляционные (Borexino, LVD)

-на основе временно-проекционной камеры (ICARUS, HELLAZ).

В некоторых из вышеназванных экспериментов (SNO, LVD, ICARUS) наряду с реакциями рассеяния для детектирования нейтрино используются также реакции поглощения. Особенностью реакций поглощения является то, что в зависимости от того, через какие токи идет реакция – заряженные или нейтральные – реакция может быть чувствительна либо только к электронным нейтрино, либо ко всем ароматам нейтрино. Это в свою очередь позволяет найти прямое экспериментальное подтверждение нейтринных осцилляций. Использование же реакций поглощения вместе с реакциями на рассеяние нейтрино, чувствительными ко всем ароматам нейтрино, полезно в плане сравнения полученных результатов.

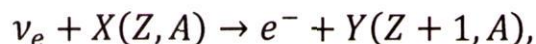
Реакции с заряженными токами можно записать в общем виде следующим образом:



реакции с нейтральными токами:



В основе любого радиохимического метода лежит реакция вида:



Где образуется нестабильное ядро Y.

Радиоактивный распад ядра Y применяется для детектирования солнечных нейтрино. Также любой радиохимический метод характеризуется невозможностью прямого подсчета регистрируемых нейтрино. Таким образом, сначала происходит накопление данных, – часть пролетающих сквозь детектор нейтрино реагирует с веществом детектора, в детекторе происходит накопление продуктов реакции. После окончания набора данных с помощью химических методов продукты реакции с нейтрино извлекаются из вещества детектора и подсчитываются. Также радиохимические методы не могут дать информации о направлении прилета нейтрино. Соответственно детекторы прямого счета, использующие реакции рассеяния и поглощения, не имеют этих недостатков.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Существование нейтринных осцилляций, изучение первых детекторов нейтрино
2. Изучение нейтринных экспериментов.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы выпускной квалификационной работы, ее новизна, определена цель работы.

В разделе 1 рассмотрены различные подходы к исследованию нейтринных осцилляций.

В разделе 2 описаны первые детекторы нейтрино, которые являются наиболее эффективными для различных способов детектирования нейтрино.

В разделе 3 представлены способы детектирования нейтрино.

В разделе 4 рассматривается эволюция во времени, а если быть точнее, то уравнение эволюции любой квантовой системы (на примере уравнения Шрёдингера).

В разделе 5 описываются нейтринные эксперименты, а именно:

5.1 Прямое определение массы нейтрино.

5.2 Солнечные, реакторные и геонейтрино.

5.2.1 Солнечные нейтрино.

5.2.2 Реакторные нейтрино.

5.2.3 Геонейтрино.

5.3 Атмосферные и ускорительные нейтрино.

5.3.1. Атмосферные нейтрино.

5.3.2. Ускорительные нейтрино.

В заключении выпускной квалификационной работы перечислены основные результаты изучения экспериментов и выводы.

Основные результаты, полученные при работе над выпускной квалификационной работой

Дан обзор литературы по исследованию нейтринных осцилляций и приведены современные теоретические и экспериментальные данные о изучении данной тематики.

При исследовании экспериментов по исследованию осцилляций нейтрино с той или иной степенью достоверности показали, что у нейтрино есть масса и флэйворные состояния ν_e, ν_μ, ν_τ - это линейная суперпозиция состояний, соответствующих массивным частицам ν_1, ν_2, ν_3 .

Возникает следующий фундаментальный вопрос, является ли нейтрино частицей Дирака или Майораны. Из исследования осцилляций нейтрино ответить на этот вопрос невозможно, поэтому используют другие методы. По сути, имеется всего одна идея, и заключается она в экспериментальном поиске процессов.

Список использованных источников

1. Arneodo F. e Клапдор-Клайнгротхаус Г.В., Штаудт А. Неускорительная физика элементарных частиц. Пер. с нем. В.А. Беднякова – М.: Наука. Физматлит, 1997 г.
2. Райдер Л. Элементарные частицы и симметрии. Пер. с англ. Под редакцией Барбашова Б.М. – М.: Наука. Физматлит, 1983 г.
3. Понтекорво Б.М. Нейтрино и его роль в астрофизике. УФН т. 79, вып. 1, 1963г.
4. Рябов В.А. Нейтринные осцилляции: на пути к экспериментам с дальними нейтрино-ЭЧАЯ, т. 34, вып. 5, 2003 г.
5. Дворников, М. С. Осцилляции нейтрино в поле линейно поляризованной электромагнитной волны / М. С. Дворников, А. И. Студеникин // Ядер- ная физика. — 2001. — Т. 64. — С. 1705.
6. Ораевский, В. Н. Электродинамика нейтрино в среде / В. Н. Ораевский, В. Б. Семикоз, Я. А. Смородинский // ЭЧАЯ. — 1994. — Т. 25. — С. 312-376.

7. Материалы по физике нейтрино на сайт НИИЯФ МГУ
8. С. М. Биленький Массы, смешивание и осцилляции нейтрино // УФН. — 2003. — Т. 173. — С. 1171—1186. — DOI:10.3367/UFNr.0173.200311b.1171.
9. Ю. Г. Куденко Исследование нейтринных осцилляций в ускорительных экспериментах с длинной базой // УФН. — 2011. — Т. 181. — С. 569—594. — DOI:10.3367/UFNr.0181.201106a.0569.
10. Ю. Г. Куденко Наблюдение осцилляций мюонных нейтрино в электронные нейтрино в эксперименте T2K // УФН. — 2013. — Т. 183. — С. 1225—1230. — DOI:10.3367/UFNr.0183.201311d.1225.
11. Юрий Куденко. Обнаружение нового типа осцилляций нейтрино. elementy.ru, «Троицкий вариант» №13(82) (5 июля 2011 года). Проверено 18 января 2013.
12. Волошин М. В., Высоцкий М. И., Окунь Л. Б. ЖЭТФ 91 754 (1986)
13. Б.А. Арбузов. Осцилляции нейтрино - "рентген" для небесных тел?
14. G. Bellini, L. Ludhova, G. Ranucci, F.L. Villante Neutrino oscillations (англ.). — 2013. — arXiv:1310.7858.
15. Boris S, Golutvin A, Laptin L, Lubimov V, Nagovizin E, Nozik V, Solshenko V, Tihomirov I, Tretyakov E Phys. Lett. B 159 217 (1985)
16. Fritschel M, Holzchun E, Kundig W, Petersen J W, Pixley R E, Stussi H Phys. Lett. B 173 458 (1986)
17. Rowley J K, Cleveland B T, Davis R (Jr.) Solar Neutrinos and Neutrino Astronomy (AIP Conf. Proc.) Vol. 126 (Eds M. L. Cherry, W. Fowler, K. Lande) (New York: AIP, 1985) p. 1
18. Bahcall J N, Ulrich R K Rev. Mod. Phys. 60 297 (1988)
19. Newman M J Physics of the Sun Vol. 3 (Eds P A Sturrock, T E Holzer, D M Mihalas, R K Ulrich) (Amsterdam: D. Reidel, 1986) p. 33