

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

БАЯЗИТОВА Алия Наилевна

ИСТОЧНИКИ НЕЙТРИНО

Кафедра физики элементарных частиц

КУРСОВАЯ РАБОТА 2 КУРСА

(Подпись студента)

Научный руководитель:

к. ф.-м. н.

Колупаева Людмила Дмитриевна

(Подпись научного руководителя)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Естественные источники	4
1.1 Реликтовые нейтрино.....	4
1.2 Солнечные нейтрино.....	6
1.3 Геонейтрино.....	7
1.4 Атмосферные.....	9
1.5 Астрофизические	10
1.6 Сверхновые.....	11
2 Искусственные источники.....	14
2.1 Ускорительные нейтрино	14
2.2 Реакторные нейтрино	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	17
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	18

ВВЕДЕНИЕ

Нейтрино – легкая, слабо взаимодействующая нейтральная частица со спином $\frac{1}{2}$. Была обнаружена на фоне интереса к наблюдаемому непрерывному спектру электронов в бета-распадах ядер, так как он выглядел противоречащим законам сохранения энергии-импульса и момента количества движения. Объяснение наблюдаемым фактам в 1930 году дал В. Паули, а спустя 26 лет после его гипотезы Ф. Райнес и К. Коуэн экспериментально обнаружили электронное антинейтрино. В 1962 году Л. М. Ледерман, Н. Шварц и М. Штейнбергер обнаружили мюонное нейтрино, рождавшееся в паре с мюоном в распадах пионов. В 2000 году в эксперименте коллаборации DONUT было доказано существование третьего типа нейтрино [1].

Нейтрино сыграло значительную роль в построении Стандартной модели, а ответ на вопрос, почему массы нейтрино такие маленькие, может дать ключ к построению теории за её рамками. Наиболее прецизионные данные по разности квадратов масс нейтрино следуют из анализа экспериментов по нейтринным осцилляциям.

Осцилляции нейтрино являются проявлением интерференции амплитуд процессов с промежуточным нейтрино разной массы. Уникальность нейтринных осцилляций заключается в крайне малой разнице масс нейтрино, приводящей к возможности их когерентного рождения и макроскопически большой длине осцилляций.

Современные исследования направлены на определение масс, продолжается поиск стерильных нейтрино, безнейтринного бета-распада. Актуален вопрос определения порядка нейтринных масс (нормальный или обратный).

Целью данного исследования является знакомство с видами нейтринных источников. Задачи включают перечисление источников нейтрино в соответствии с общепринятой классификацией и предоставление краткой характеристики каждого из них.

1 Естественные источники

1.1 Реликтовые нейтрино

Мы живем в потоке реликтовых нейтрино, оставшихся после Большого взрыва. Их энергия мала, однако их поток один из самых интенсивных на Земле (см. рисунок 1). Непосредственно зарегистрировать сигнал от реликтовых нейтрино крайне сложно.

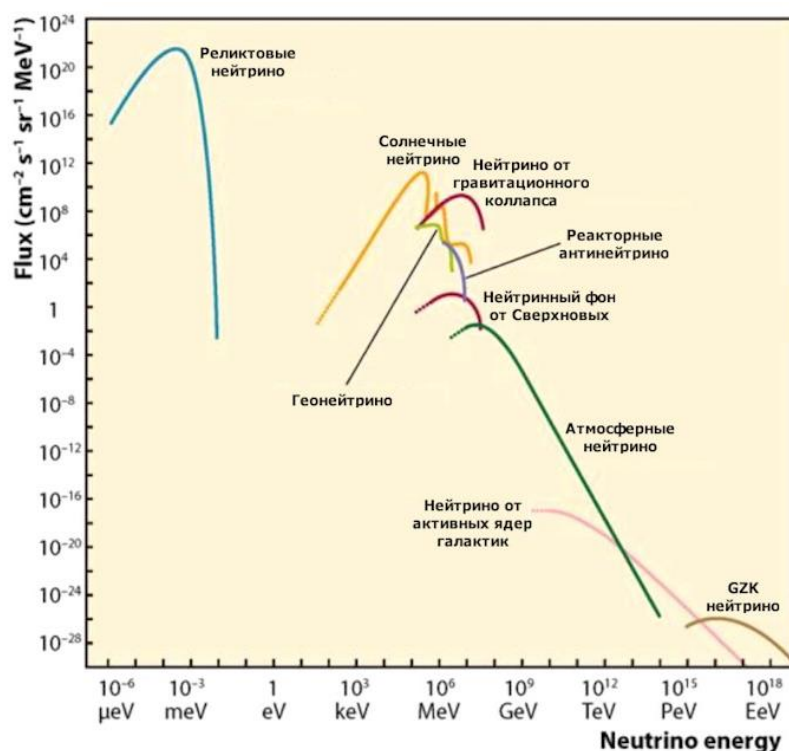


Рис.1. Характерные потоки нейтрино и антинейтрино от различных источников

Современная концентрация всех сортов нейтрино (электронных, мюонных и тау) равна 330 см^{-3} [2]. Энергия реликтовых нейтрино примерно такая же, как и у реликтовых фотонов (температура нейтринного газа $\sim 2 \text{ K}$). Нейтринный газ образует так называемую Горячую Темную Материю (Hot Dark Matter), затрудняющую формирования структур (галактик и скоплений галактик) во Вселенной. Эксперименты, изучающие флуктуации температуры

реликтового чернотельного излучения, а также данные по распределению масс на космологических масштабах позволяют получить ограничение на плотность Горячей Темной Материи и, соответственно, на массу нейтрино.

Рассмотрим механизм возникновения реликтовых нейтрино согласно модели горячей Вселенной. Через время ~ 1 с после начала расширения Вселенной её температура упала до 10^{10} К. Плотность частиц в космической плазме уменьшилась, и нейтрино стали редко сталкиваться с ними- т.е. Вселенная стала «прозрачной» для нейтрино. В результате горячий нейтринный газ, содержащий все три сорта нейтрино и антинейтрино, "оторвался" от вещества и, расширяясь вместе с Вселенной, стал остывать как не взаимодействующий с веществом компонент. Согласно модели горячей Вселенной и в случае безмассового нейтрино, в настоящее время его температура составляет всего лишь 1.9-2.1 К. В случае наличия нейтрино массы порядка $mc^2 = 30$ эВ температура реликтовых нейтрино будет равна 0.005 К. Исходя из данных о предельной наблюдаемой плотности вещества Вселенной можно сделать верхнюю оценку суммарной массы всех трех ароматов нейтрино:

$$m(\nu_e) + m(\nu_\mu) + m(\nu_\tau) < 50 \text{ эВ} \quad (1)$$

Данная оценка накладывает более строгие ограничения на массу мюонного и тау-нейтрино, чем найденные из экспериментов.

Исходя из температуры нейтрино можно показать, что в среднем в 1 см^3 космического пространства содержится 300-400 нейтрино всех сортов. Их средняя энергия рассчитывается по формуле:

$$E_\nu = 3kT_\nu, \quad (2)$$

и равна $(5 - 6) \cdot 10^{-4}$ эВ [6].

Так же различают реликтовые нейтрино от сверхновых, речь о них будет идти дальше.

1.2 Солнечные нейтрино

Солнечные нейтрино рождаются в ходе ядерных реакций в солнечной плазме. Наибольший вклад в энергетику Солнца дает pp-цикл, состоящий из четырех ветвей. Эффект этих реакций можно выразить простой формулой



из которой видно, что четыре протона превращаются в ядро гелия с испусканием двух позитронов и двух электронных нейтрино. Таким образом, в Солнце водород «перерабатывается» в гелий. Эти нейтрино самые низкоэнергичные из солнечных, но самые интенсивные с потоком около $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. За ними с интенсивностями $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ следуют бериллиевые и борные нейтрино соответственно [3] (см. рисунок 2), рождающиеся в реакциях

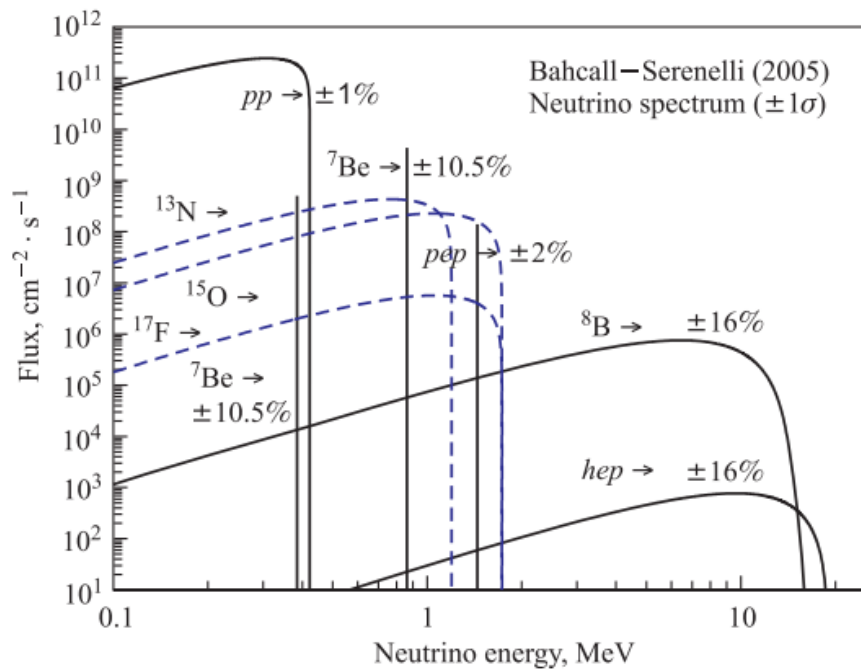


Рис. 2. Спектры солнечных нейтрино

Пионерским экспериментом по детектированию солнечных нейтрино был эксперимент HOMESTAKE, использовавший предложенную Б. Понтекорво реакцию



В результате эксперимента число нейтрино от Солнца, пересчитанное от числа атомов аргона, было примерно в три раза меньше теоретически вычисленного. Таким образом родилась «проблема солнечных нейтрино».

Следующими экспериментами были GALLEX, GNO, SAGE.

Kamiokande - первый эксперимент, наблюдавший нейтрино от Солнца в режиме реального времени. Детектор представлял собой большой водный детектор, регистрирующий черенковское излучение рассеянных электронов в реакции



Угол вылета электронов сильно коррелирует с направлением потоком нейтрино, так что этот эксперимент стал первым, в котором было доказано, что нейтрино летят от Солнца. Позднее на замену пришел новый детектор SuperKamiokande с массой воды 50 000 т. Оба эксперимента измеряли борные нейтрино. Вследствие их слабого потока детекторы имеют большой объем [1].

Все упомянутые эксперименты наблюдали дефицит потока солнечных нейтрино. Популярным объяснением были осцилляции нейтрино, в пользу которого позже указал эксперимент SNO.

Borexino – другой важный эксперимент, наблюдающий потоки солнечных нейтрино (борные и бериллиевые) в режиме реального времени.

1.3 Геонейтрино

Недра земли в ходе слабых распадов ядер излучают антинейтрино. Это электронные антинейтрино, возникающие при радиоактивном распаде ${}^{238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$, и ${}^{40}\text{K}$ в Земле. Были обнаружены в экспериментах Borexino и

KamLAND. Они служат фоном для реакторных нейтринных экспериментов, таких как KamLAND, а также могут дать информацию о составе Земли.

Несмотря на то что количество радиоактивных материалов в верхней части земной коры достаточно хорошо известно, их содержание в нижней части коры, мантии и ядре – нет. Оценки на основе геохимических аргументов показывают, что обилие радиоактивного материала в мантии примерно на три порядка меньше, чем в коре, хотя в мантии содержится примерно столько же радиоактивного материала, сколько и в коре из-за гораздо большего объема. Стандартное геофизическое предсказание заключается в том, что в ядре нет радиоактивного материала, но предполагается возможность наличия большого количества 40K [4].

Антинейтрино, рождающиеся в недрах планеты, связаны с исследованием вопроса о природе тепла внутри Земли. В литературе обсуждаются гипотезы об остаточном первоначальном тепле, которым обладала прото-Земля на стадии, когда она ещё не сформировалась как планета. Также популярна идея о том, что Земля разогревается прямо сейчас за счет слабых радиоактивных распадов, сопровождающихся испусканием антинейтрино. Основной вклад вносят ядра с достаточно большими временами полураспада (порядка миллиарда лет), чтобы разогревать Землю сегодня. Всерьез обсуждается возможность существования геореактора в центре планеты.

Наблюдение геонейтрино напрямую проверяет гипотезу о современном разогреве Земли посредством радиоактивных распадов нестабильных ядер. Точность измерений пока недостаточна для проверки различных моделей структуры Земли, но удастся поставить ограничение на максимально возможную мощность гипотетического геореактора в центре Земли. В экспериментах SNO+, LENA, NanoHano будет накоплена большая статистика геонейтрино.

Жидкостные сцинтилляционные детекторы предоставляют наилучшие средства для измерения низкоэнергетических нейтрино от этих радиоактивных распадов через обратную реакцию бета-распада

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+. \quad (8)$$

Детекторы в разных местах получают разные относительные потоки геонейтрино из коры и мантии, что может помочь изолировать вклады от каждого источника.

1.4 Атмосферные

Атмосферные нейтрино образуются при распадах нестабильных частиц, рождающихся в результате развития широкого атмосферного ливня (ШАЛ). ШАЛ вызывается космическими протонами, бомбардирующими атмосферу.

Первое убедительное доказательство существования нейтринных осцилляций было получено в результате измерения атмосферных нейтрино. При взаимодействии космических лучей с атмосферой образуются пионы и каоны, которые распадаются на мюонные нейтрино, электронные нейтрино и их антинейтрино:

$$\pi^+, K^+ \rightarrow \nu_\mu \mu^+ \rightarrow \nu_\mu e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu, \quad (9)$$

$$\pi^-, K^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu \mu^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu. \quad (10)$$

В среднем при энергиях порядка 1 ГэВ мюонных нейтрино больше чем электронных в два раза, хотя ν_e , как правило, находятся при несколько более низких энергиях, поскольку они производятся только при вторичном распаде.

Расчет потока нейтрино состоит из следующих этапов: оценки первичного потока космических лучей в верхней части атмосферы для всех направлений в месте расположения детектора, распространения и взаимодействия космических лучей в воздухе для образования мезонов, и распада мезонов и мюонов при распространении через воздух и Землю.

Потоки атмосферных мюонных и электронных (анти)нейтрино измерялись в ряде экспериментов. Наиболее важным оказался SuperKamioKande, в котором детектировались мюоно- и электроноподобные

события взаимодействия (анти)нейтрино с обменом $W^{\pm}$ -бозонами с ядрами в водном детекторе. Мюоны и электроны идентифицировались по черенковскому свету [1].

1.5 Астрофизические

В эпоху многоканальной астрономии нейтрино являются одними из самых важных астрономических мессенджеров из-за их свойств взаимодействия.

В отличие от высокоэнергетических фотонов и барионов, высокоэнергетические нейтрино путешествуют через космос без изменений (за исключением потерь энергии из-за красного смещения и осцилляций аромата) и без значительных отклонений магнитными полями. Таким образом, они дают возможность исследовать высокоэнергетические явления вселенной.

Первое обнаружение внесолнечных нейтрино относится ко взрыву сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом Облаке, и, хотя их энергия была всего лишь на уровне МэВ, их обнаружение позволило подтвердить основную теоретическую картину эволюции массивных звезд.

Затем, в 2013 году IceCube сообщил о первом обнаружении внеземных нейтрино с энергиями между 10 ТэВ и 2 ПэВ. После этого открытия IceCube обнаружил дополнительные события, угловое и энергетическое распределение которых согласуется с внегалактическим происхождением.

Чтобы ограничить возможные сценарии производства космических нейтрино используется перекрестная проверка информации, полученной в результате их обнаружения, с той, которая предоставляется экспериментами на различных космических каналах, таких как заряженные космические лучи (КЛ), фотоны или гравитационные волны (ГВ) [5].

Исторически первое внесолнечного многоканальное обнаружение произошло именно с SN1987A, потому что большой спектр электромагнитных сигналов и нейтрино был зарегистрирован Камиоканде II, экспериментом Ирвайн-Мичиган-Брукхейвен (IBM) и Баксанской нейтринной обсерваторией.

Выявлено несколько отдельных источников:

1. Двойные звёзды. Системы из двух гравитационно связанных звёзд, обращающихся по замкнутым орбитам вокруг общего центра масс.
2. Пульсары. Вращающейся нейтронные звезды.
3. Активные ядра галактик (Active Galactic Nuclei – AGN). AGN представляет собой спиральную галактику, в центре которой находится массивная чёрная дыра.
4. Вспышки гамма-излучения (Gamma Ray Bursts – GRBs). Внезапные кратковременные (от миллисекунд до нескольких секунд) и очень интенсивные вспышки гамма-излучения. Их образование связывают со слиянием двойных звёзд, либо пары нейтронная звезда – чёрная дыра, или же с коллапсом сверхмассивных звёзд.
5. Так называемые «Пузыри Ферми» (Fermi Bubbles) – явление, обнаруженное с помощью гамма-телескопа FermiLAT [2].

Общее у этих объектов то, что для них характерны механизмы ускорения ионов, которые затем тормозятся в плотной среде и рожают нейтральные и заряженные пионы. При распаде пионов образуется примерно равное число нейтрино и γ -квантов. Соответственно, поскольку от этих источников детектируется большое количество фотонов, ожидается также получать от них и такое же количество нейтрино.

Также возможны не локализованные источники нейтрино: ГЗК (эффект Грейзена, Зацепина, Кузьмина), Z-вспышки, распад Темной Материи.

1.6 Сверхновые

Звезды массивнее примерно 8 масс Солнца подвергаются гравитационному коллапсу, который приводит к образованию нейтронной звезды или черной дыры. Нейтрино играют решающую роль в эволюции этих коллапсирующих сверхновых.

Как только ядро звезды становится в основном состоящим из железа, дальнейшее сжатие ядра не запускает ядерный синтез, и звезда не может термодинамически поддерживать свою внешнюю оболочку. По мере того, как окружающее вещество падает внутрь под действием гравитации, температура ядра повышается, и железо диссоциирует на α -частицы и нуклоны. Захват электронов на протонах становится благоприятным, и электронные нейтрино производятся во время нейтронизации. Когда ядро достигает плотности выше 10^{12} г/см³, нейтрино попадают в ловушку (в так называемые нейтриносферы). Коллапс продолжается до тех пор, пока ядерная плотность не возрастет в 3-4 раза, после чего внутреннее ядро посылает ударную волну через внешнее ядро и в мантию. Эта ударная волна теряет энергию, поскольку она нагревает вещество, которое она пересекает, и провоцирует дальнейший захват электронов на свободных протонах, оставшихся после удара. В течение нескольких миллисекунд, за которые ударная волна движется от внутреннего ядра к нейтриносфере, электронные нейтрино высвобождаются в импульсе. Этот всплеск нейтронизации уносит примерно 10^{51} эрг энергии, что аналогично высвобождению оптической и кинетической энергии. Однако, 99% энергии связи $\sim 10^{53}$ эрг протонейтронной звезды (что составляет около 10% энергии покоя звезды) высвобождается в последующие ~ 10 с. Первичными процессами являются бета-распад (обеспечивающий источник электронных антинейтрино), аннигиляция $\nu_e \bar{\nu}_e$, аннигиляция $e^+ e^-$ и тормозное излучение нуклонов ($N + N \rightarrow N + N + \nu + \bar{\nu}$, которые дают все виды нейтрино), в дополнение к электронному захвату [3]. На рисунке 3 показаны компоненты светимости нейтрино.

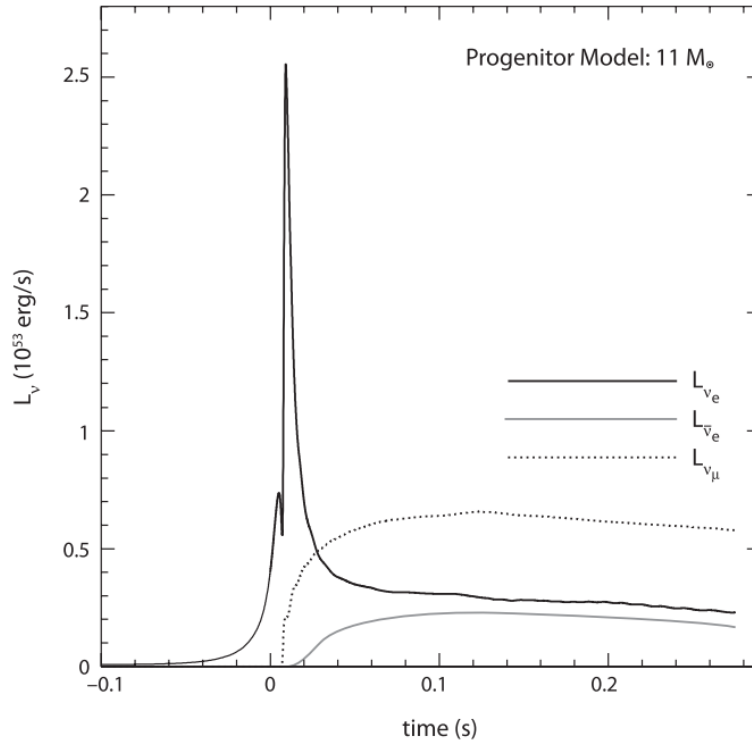


Рис. 3. Суммарная светимость в зависимости от времени для сверхновой, происходящей от звезды с массой 11 масс Солнца

Историческим событием стало наблюдение нейтрино от сверхновой SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке. Тогда было зарегистрировано всего около 20 нейтрино несколькими детекторами.

Взрывы сверхновых в нашей галактике редки, но примерно один взрыв сверхновой происходит каждую секунду во Вселенной. Основная часть энергии в этих взрывах сверхновых уносится нейтрино. Поток диффузного сверхнового нейтрино (DSNB) от всех этих реликтовых сверхновых нейтрино кодирует информацию об истории звездообразования и звездной эволюции, поэтому обнаружение этого нейтринного фона представляет значительный интерес.

2 Искусственные источники

2.1 Ускорительные нейтрино

Ускорительные нейтрино приходят в основном от распадов π и K мезонов

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad (11)$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu. \quad (12)$$

Таким образом в пучке в основном мюонное нейтрино. Спектр состоит из двух компонент: низкоэнергичного пика из-за распада пиона и высокоэнергичного вклада из распадов каона.

Для получения нейтрино обычно используется Be или Al мишень длиной 2-5 см. Мишень выбирается длиной в несколько длин взаимодействия, но как можно короче, чтобы позволить вторичным частицам вырваться до того, как они провзаимодействуют с материалом мишени.

Почти все эксперименты с нейтрино на ускорителях используют магнитный горн Ван дер Меера для усиления нейтринного пучка с давних пор. Усиление потока достигается путем фокусировки полученных частиц до их распада. Горн имеет коническую структуру с высоким электрическим током, протекающим вдоль горна, что создает тороидальное магнитное поле. Это фокусирует частицы с одним зарядом. Частицы с противоположным зарядом расфокусируются и поглощаются окружающим экраном. Высокие электрические токи, необходимые для горна, ограничивают его использование только с импульсом короткой длительности. Использование горн особенно эффективно для пучка высокой энергии и имеет решающее значение для экспериментов с длинной базой [4].

Принципиальным отличием пучков нейтрино, формируемых на ускорителях, является то, что их генерация контролируема, и, следовательно, все параметры пучка могут быть довольно строго заданы.

Нейтринные осцилляции изучаются также в экспериментах с пучками нейтрино от ускорителя.

2.2 Реакторные нейтрино

При делении ядерных материалов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu и т.д.) образуются два богатых нейтронами ядра, которые претерпевают последовательные β -распады с испусканием антинейтрино на каждом этапе. Около двух-трех нейтронов испускаются одновременно. Распределение массовых чисел продуктов деления зависит от исходного ядерного материала и энергии падающего нейтрона. Распределение продуктов деления ^{235}U обычно показывает два широких пика около $A = 135-145$ (преимущественно Br, Kr, Zr) и 90-100 (преимущественно Ba, Cs, Xe, I, Te). Для деления Pu два пика становятся немного ближе. При делении образуются большие разновидности нейтроноизбыточных ядер, и задействованы многие процессы бета-распада. Среднее число нейтрино, испускаемых при делении ^{235}U , составляет 6.1, а для ^{239}Pu 5.6 (оценивается по химическому содержанию конечного продукта).

Выделяемая энергия составляет $201,7 \pm 0,6$ МэВ для ^{235}U , $205,0 \pm 0,9$ МэВ для ^{238}U , $210,0 \pm 0,9$ МэВ для ^{239}Pu и $212,4 \pm 1,0$ МэВ для ^{241}Pu за деление. Таким образом, реактор мощностью 1 МВт (тепловая мощность) производит 2×10^{17} антинейтрино в секунду [4].

Для реакторных антинейтрино характерны энергии до 8 МэВ. При детектировании реакторных нейтрино основной проблемой является расчет спектра этих нейтрино. Спектр получают суммированием парциальных спектров от всех распадающихся изотопов. При этом на характер спектра нейтрино оказывают влияние тип реактора, схемы распадов, величина выхода отдельных изотопов и другие факторы, поэтому такие расчеты являются довольно сложными.

Эксперименты с реакторными антинейтрино, образующимися в ходе «горения» ядерного топлива, проводились уже давно и проводятся до сих пор.

Наблюдаемые потоки антинейтрино в детекторах, расположенных на расстояниях от реактора от нескольких десятков метров до километра, находились в согласии с гипотезой отсутствия осцилляций. Первым реакторным экспериментом, обнаружившим осцилляции антинейтрино, стал KamLAND, расположенный в шахте старого эксперимента Kamiokande. Детектор использует 1000 т сверхчистого жидкого сцинтиллятора и находится в среднем на расстоянии 180 км от реакторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены естественные и искусственные источники нейтрино, их свойства и механизмы образования. Нейтрино, несмотря на свою слабовзаимодействующую природу, играют ключевую роль в понимании различных процессов.

Естественные источники нейтрино, такие как солнечные, атмосферные, геонейтрино, астрофизические и реликтовые нейтрино, предоставляют ценную информацию о процессах внутри Солнца, Земли, а также о далеких космических объектах, таких как сверхновые и активные ядра галактик. Искусственные источники нейтрино используются в контролируемых условиях для изучения их взаимодействий и осцилляций. Эти эксперименты позволили уточнить параметры нейтринных осцилляций и проверить предсказания Стандартной модели.

Нейтрино остаются одной из наиболее перспективных областей исследований в физике элементарных частиц и астрофизике. Дальнейшее изучение их свойств и взаимодействий может привести к новым фундаментальным открытиям, включая возможное расширение Стандартной модели и углубление понимания природы темной материи и эволюции Вселенной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Наумов Д. В. «Введение в физику нейтрино» // Письма в ЭЧАЯ. — 2011. — Т. 8, № 7 (170). — С. 1192–1231.
2. Ядерная физика в интернете [Электронный ресурс]. — URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/index.html> (дата обращения: 06.05.2025).
3. Barger V., Marfatia D., Whisnant K. The physics of neutrinos. — Princeton : Princeton University Press, 2012.
4. Fukugita M., Yanagida T. Physics of neutrinos: and application to astrophysics. — Berlin : Springer Science & Business Media, 2003.
5. Pisanti O. Astrophysical neutrinos: theory // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Т. 1263, № 1. — С. 012004. — IOP Publishing.
6. Pastor S. Relic neutrinos: neutrino properties from cosmology [Электронный ресурс] // arXiv:hep-ph/0306233. — 2003. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0306233>.