

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

Кафедра физики элементарных частиц

Измерение параметров осцилляций нейтрино

Курсовая работа
студента 207 группы
Галлямова Марата Ринатовича

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
Колупаева Людмила Дмитриевна

Москва 2026

Содержание

1	Введение. Стандартная модель.	2
2	Осцилляции нейтрино	4
2.1	Краткая история открытия	4
2.2	Параметры нейтринных осцилляций	4
2.3	PMNS матрица	4
2.4	Вероятность осцилляций нейтрино	5
2.5	Осцилляции нейтрино в среде	6
3	Нейтринные эксперименты	8
3.1	Оценка параметров осцилляций в настоящее время	8
3.2	Типы нейтрино	8
3.3	Ускорительные нейтрино	8
3.4	Солнечные нейтрино	10
3.5	Геонейтрино	11
3.6	Реакторные нейтрино	11
3.7	Атмосферные нейтрино	11
3.8	Нейтрино от сверхновых	12
3.9	JUNO	12
4	Проблемы, с которыми сталкиваются нейтринные эксперименты	14
4.1	Информация	14
4.2	Проблема детектирования	14
4.3	Фоновые сигналы	15
4.4	Иерархия масс нейтрино	15
4.5	Систематические ошибки	15
5	Будущие эксперименты	17
5.1	Hyper-K	17
5.2	DUNE	17
5.3	ESS ν SB	17
6	Заключение	18
7	Список литературы	19

1. Введение. Стандартная модель.

Стандартная модель (СМ) — это теоретическая конструкция, описывающая три из четырех фундаментальных взаимодействий: электромагнитное, слабое и сильное. В 1960 году физик Шелдон Глэшоу сделал первые шаги к формированию Стандартной модели — он попытался объединить электромагнитное и слабое взаимодействия, но появление массы это никак не объясняло, но уже через 7 лет, в 1967 году Стивеном Вайнбергом и Абдус Саламом был предложен механизм Хиггса, что позволило объяснить наличие массы у калибровочных бозонов и фермионов. В 1970-х годах, после включения квантовой хромодинамики (теория сильного взаимодействия), СМ приобрела свой современный вид, став эталоном описания микромира.

Нейтрино — это элементарная частица, относящаяся к классу лептонов (обладает полуцелым спином). Оно существует в трех типах (флейворах): электронном, мюонном и тау-нейтрино, соответствующих трем поколениям заряженных лептонов.

Нейтрино нарушает р-четность в слабых взаимодействиях, этот факт помог развить теорию слабых взаимодействий, а также определить группу симметрии СМ.

В рамках Стандартной модели нейтрино считается безмассовой частицей, это обусловлено спиральностью. Спиральность — проекция спина на направление движения ($h = \frac{\vec{S} \cdot \vec{p}}{|\vec{S}| \cdot |\vec{p}|}$). Если спин по направлению движения (импульса), то принято говорить о правой спиральности ($h=1$), если же против направления движения, то о левой ($h=-1$). Считается, что нейтрино обладает только левой спиральностью (а антинейтрино правой), из чего постулируется безмассовость нейтрино, т.к. в ином случае из преобразований Лоренца следовало бы, что существует СО (система отсчета), в которой направление импульса сменилось бы на противоположное, а направление спина осталось прежним. Это привело бы к тому, что в новой СО нейтрино стало бы правоспиральным и совпало с антинейтрино, а значит к нарушению закона сохранения лептонного заряда. Но есть предположение, что нейтрино является Майорановским фермионом, то есть совпадает со своей античастицей. Также есть гипотеза, что помимо 3 флейворов нейтрино существуют еще стерильные нейтрино с правой спиральностью. В механизме see-saw считается, что стерильные нейтрино являются сверхтяжелыми частицами, которые не участвуют в стандартных взаимодействиях, но участвуют в гравитационном (что значит, что они могут претендовать на роль темной материи). Существование нейтринных осцилляций — процесса превращения нейтрино одного флейвора в другой при распространении в пространстве — указывает на наличие у них ненулевой

массы и смешивания состояний.

Целью данной работы является знакомство с теорией нейтринных осцилляций, описание параметров данного явления и экспериментов по их измерению.

2. Осцилляции нейтрино

2.1. Краткая история открытия

Нейтринные осцилляции были предсказаны еще Б. Понтекорво в конце 50-х, но это явление получило широкую огласку из-за «Проблемы дефицита солнечных нейтрино», которая состояла в различии между теоретически предсказанным и наблюдаемым количеством нейтрино, излучаемых Солнцем, а именно в том, что в процессе полета от Солнца электронные нейтрино превращаются в тауонные и мюонные. Окончательно осцилляции атмосферных нейтрино были доказаны при помощи эксперимента Super-K в 1998 году (а солнечных результатами SNO (2001)), который показал, что прямой поток мюонных нейтрино сверху детектора оказался значительно выше потока мюонных нейтрино, прошедших сквозь землю, но хочется отметить, что были и эксперименты, не показывающие осцилляций (к примеру, CHOOZ (1996-1998 и Palo Verde (1998-2000)). Данные результаты связаны с неправильной конфигурацией детекторов (малая база и энергия нейтрино), так что существование нейтринных осцилляций считается надежно установленным экспериментальным фактом.

2.2. Параметры нейтринных осцилляций

Углы смешивания ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) — определяют, насколько сильно перемешаны разные типы нейтрино между собой.

Разности квадратов масс ($\Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2$ и $|\Delta m_{32}^2|$) — определяют как быстро (на каком расстоянии L при энергии E) происходит переход.

Фаза нарушения CP-четности δ_{CP} — показывает, есть ли разница в том, как осциллируют нейтрино и антинейтрино. Если $\delta_{CP} \neq 0$, то вероятности осцилляции нейтрино и антинейтрино не равны.

2.3. PMNS матрица

PMNS-матрица (или матрица Понтекорво–Маки–Накагавы–Сакаты) — это унитарная матрица, описывающая параметры осцилляций нейтрино и имеющая вид:

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1)$$

где $c_{ij} = \cos(\theta_{ij})$ $s_{ij} = \sin(\theta_{ij})$

2.4. Вероятность осцилляций нейтрино

Приведем вывод формулы для вероятности осцилляций трех типов нейтрино в вакууме.

В квантовой теории поля зависимость типов по времени задается формулой Шрёдингера

$$i \frac{\partial |\Psi(t)\rangle}{\partial t} = H |\Psi(t)\rangle \quad (2)$$

где H — Гамильтониан (свободный, т.к. мы имеем дело с вакуумом).

Общее решение (2) имеет вид

$$|\Psi(t)\rangle = e^{-iHt} |\Psi(0)\rangle \quad (3)$$

Предполагаем, что в момент рождения ($t=0$) есть «чистое» нейтрино определенного флейвора, не забывая при этом, что флейвор нейтрино это лишь смесь массовых состояний

$$|\nu_l\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{li}^* |\nu_i\rangle \quad (4)$$

где ν_l — тип нейтрино, а ν_i — массовое состояние. Получаем

$$|\Psi(0)\rangle = |\nu_l\rangle. \quad (5)$$

Беря во внимание, что

$$H |\nu_i\rangle = E_i |\nu_i\rangle, \quad (6)$$

где

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \quad (7)$$

Из (3) и (4) получаем выражение для типа нейтрино в момент $t \geq 0$

$$|\nu_l\rangle_t = e^{-iHt} |\nu_l\rangle = \sum_{i=1}^3 e^{-iE_i t} U_{li}^* |\nu_i\rangle. \quad (8)$$

Нейтрино могут быть задетектированы при помощи слабых и заряженных токов (подробнее о них будет ниже). Рассмотрим появление лептона l в процессе:

$$\nu_i + N \rightarrow l' + X \quad (9)$$

Массы нейтрино малы, поэтому мы можем считать, что вероятность того, что массовое состояние ν_i провзаимодействует и породит лептон l' , прямо пропорцио-

нальна коэффициенту смешивания

$$\langle l' X | S | \nu_i N \rangle \simeq \langle l' X | S | \nu_l N \rangle_{SM} U_{l'i}^*, \quad (10)$$

где $\langle l' X | S | \nu_l N \rangle_{SM} U_{l'i}^*$ — матричный элемент СМ

Из (8) и (10) мы получаем выражение для амплитуды в процессе $\nu_l \rightarrow \nu_{l'}$

$$A(\nu_l \rightarrow \nu_{l'}) = \sum_{i=1}^3 U_{l'i} e^{-iE_i t} U_{li}^*. \quad (11)$$

Возведя амплитуду в квадрат, получим вероятность перехода

$$P(\nu_l \rightarrow \nu_{l'}) = \left| \sum_{i=1}^3 U_{l'i} e^{-iE_i t} U_{li}^* \right|^2 \quad (12)$$

Если же мы аккуратно распишем сумму (возведем сумму в квадрат, воспользуемся формулой Эйлера и сгруппируем слагаемые), а также воспользуемся приближением $E_i \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$, откуда $(E_i - E_j)L \approx \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}$ то получим

$$\begin{aligned} P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = & \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re[U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}] \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \\ & + 2 \sum_{i>j} \Im[U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}] \sin \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

В этой формуле слагаемое с \Re отвечает за основной вклад в осцилляции, а слагаемое с \Im — отвечает за СР-нарушение, оно меняет знак при переходе от нейтрино к антинейтрино.

2.5. Осцилляции нейтрино в среде

В среде добавляется также эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна — появляется он из-за того, что нейтрино разных типов по-разному взаимодействуют с веществом. При движении в среде у электронного нейтрино появляется эффективная масса (потенциал), зависящая от плотности электронов, и возникает новая

величина L_0 — длина рефракции:

$$L_0 = \frac{\sqrt{2}\pi}{G_F n_e} \quad (14)$$

где G_F — константа Ферми, n_e — плотность электронов

Длина рефракции показывает, через сколько километров изменится картина осцилляций.

1. Если $L_{vac} \ll L_0$: вещество не влияет и нейтрино осциллирует, как в вакууме.
2. Если $L_{vac} \gg L_0$: вещество подавляет осцилляции.
3. Если $L_{vac} \approx L_0$ (резонанс): угол смешивания становится максимальным, вероятность осцилляции стремится к 1.

3. Нейтринные эксперименты

3.1. Оценка параметров осцилляций в настоящее время

Текущие экспериментальные значения параметров нейтринных осцилляций можно увидеть в Таблице 1.

Параметр	Значение	Погрешность (%)
$\sin^2 \theta_{12}$	≈ 0.3	$\pm 3.9\%$
$\sin^2 \theta_{13}$	≈ 0.02	$\pm 3.3\%$
$\sin^2 \theta_{23}$	≈ 0.5	$\pm 4.5\%$
δ_{CP}	$\approx 1.2\pi$	$\pm 20\%$
Δm_{21}^2	$\approx 7.5 \times 10^{-5} \text{ эВ}^2$	$\pm 2.5\%$
Δm_{32}^2	$\approx 2.45 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$	$\pm 1.1\%$

Таблица 1: текущие значения параметров осцилляций

Главными задачами в изучении нейтринных осцилляций остаются:

- Упорядоченность нейтринных масс;
- Октант угла смешивания θ_{23} ;
- Нарушение CP симметрии.

Этим в настоящее время занимаются нейтринные эксперименты

3.2. Типы нейтрино

Нейтрино различаются по типам, названным по способу их получения: солнечные, реакторные, ускорительные, атмосферные, реликтовые, астрофизические, геонейтрино и нейтрино от сверхновых. Зачастую эксперименты проводятся с несколькими определенными типами нейтрино. Ниже разберем эксперименты с каждым из типов нейтрино, с примерами и краткой сводкой о методе детектирования.

3.3. Ускорительные нейтрино

Ускорительных экспериментов в данный момент довольно много (а именно 8), а все потому, что потоки нейтрино, получаемые от них, являются интенсивными, отчего точность эксперимента повышается. Также из-за того, что потоки

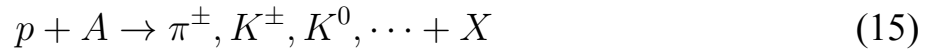
нейтрино очень слабо взаимодействуют с веществом, они пролетают большие расстояния через земную кору.

Процесс получения нейтринного пучка в таких экспериментах выглядит так:

1. Ускорение протонов. Кольцевой или линейный ускоритель разгоняет протоны до релятивистских энергий.

2. Удар по мишени: Эти энергичные протоны врезаются в мишень (графитовую).

3. Рождение мезонов: При ударе рождается каскад вторичных частиц — в основном пионов (π) и каонов (K).



X — другие продукты распада ядра.

4. Распад в полете: Эти частицы влетают в длинную вакуумную трубу (распадный канал), где на лету распадаются. Именно в этот момент рождаются нейтрино.



5. Поглотитель: В конце трубы ставят мощную стальную или бетонную «стену». Она останавливает все остальные частицы (протоны, пионы, мюоны), а нейтрино, как мы уже знаем, пролетают сквозь неё и отправляются в путь сквозь Землю.

Как пример: Super-K — это нейтринный эксперимент в Японии, использующий черенковский детектор в качестве метода детектирования. Детектор состоит из ультрачистой воды, в которую входит заряженная частица, движущаяся быстрее скорости света в данной среде; после этого она образует так называемое черенковское излучение (представляющее собой голубовато-белый свет). Из этого мы получаем характеристики частицы. Нейтрино детектируется при помощи заряженных и нейтральных токов.

Зачастую, в экспериментах, свойства и состав потока нейтрино сначала измеряются системой ближних детекторов, а после системой дальних детекторов, чтобы понять, во что превратился пучок после осцилляций.

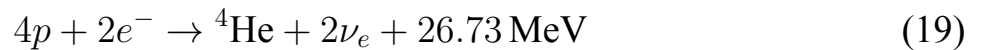
Заряженный ток — это реакция для электронных нейтрино $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ (для мюонных $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^- + p$, в которой полученный электрон является носителем большей части энергии нейтрино и позволяет воспроизвести его спектр.

Нейтральный ток — это реакция произвольного флейвора нейтрино вида $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$. Электрон отдачи дает черенковское кольцо, но оно очень похоже на кольцо от электрона в реакции $\text{CC } \nu_e$, поэтому для разделения используют кинематические критерии (энергия, угол).

Также мы можем объединять анализ двух экспериментов, чтобы получить более точные данные; недавно так сделали с экспериментами T2K и NOvA (планируют остановить набор данных в 2028). Эксперименты довольно схожи: они используют пучки нейтрино и антинейтрино, рождающиеся при взаимодействии протонов с неподвижной мишенью, а измерение параметров происходит с помощью двух детекторов: ближнего и дальнего, позволяющих отслеживать вызванные осцилляциями изменения в потоках нейтрино. Именно эта коллаборация дала наиболее точную оценку Δm_{32}^2 , а также были получены улучшенные данные относительно нарушения CP-фазы.

3.4. Солнечные нейтрино

Солнце, как и любая другая звезда, является источником нейтрино: оно излучает их за счет термоядерной реакции горения водорода с образованием гелия.



Для их детектирования используются черенковские детекторы и жидкостные сцинтилляторы. Сцинтилляционные детекторы, в отличие от черенковских, могут также детектировать частицы со скоростью меньшей скорости света в среде. Делают они это при помощи явления сцинтилляции — преобразования энергии падающего заряженного или нейтрального излучения в свет. После прохождения частицы через особый материал (неорганические кристаллы, пластики, жидкие растворы) испускаются фотоны в видимом диапазоне. Количество фотонов намного больше, чем в черенковских детекторах, что позволяет нам с большой точностью измерить энергию.

Одним из важных солнечных экспериментов является Borexino, работающий с 2007 года. Borexino представляет собой жидкосцинтилляционный детектор массой 278 т, установленный в лаборатории Гран-Сассо (Италия). Он способен регистрировать в реальном времени низкоэнергетические нейтрино с порогом 200 кэВ благодаря высокому световыходу 10^4 фотонов на МэВ, а также благодаря экстремально высокой радиологической чистоте, достигнутой внутри сцинтилляционного бака.

Эксперименты с солнечными нейтрино позволяют понять, как именно идут термоядерные реакции в ядре Солнца

3.5. Геонейтрино

Геонейтрино — это антинейтрино, возникающие при бета-распаде радионуклидов (урана-238, тория-232, калий-40) в недрах Земли. В осцилляционных экспериментах они не являются первичным источником измерения параметров. Но создают фон, который нужно учитывать в других экспериментах (JUNO) Borexino может детектировать и геонейтрино

Геонейтрино позволяют понять, сколько урана и тория осталось в мантии Земли, а также являются важным фактором в объяснении почему земля нагревается ближе к центру (гипотеза о разогреве Земли посредством радиоактивных развалов нестабильных ядер)

3.6. Реакторные нейтрино

Реакторные нейтрино (а точнее антинейтрино) получаются вследствие β -распада (в ходе "горения" ядерного топлива). Они детектируются при помощи обратного β -распада



Реакторные эксперименты используются для уточнения параметра $\sin^2(\theta_{12})$, $\sin^2(\theta_{13})$, Δm_{21}^2 .

Одним из экспериментов с этим типом является KamLAND, он проводится в шахте Камиока (Япония) на глубине около 1 км. В детекторе KamLAND используется 1 килотонна сверхчистого жидкого сцинтиллятора. Сцинтиллятор содержится в прозрачном нейлоновом баллоне диаметром 13 м, подвешенном в 1800 м³ несцинтиллирующего буферного масла. Баллон и буферное масло заключены в резервуар из нержавеющей стали диаметром 18 м. На внутренней поверхности резервуара установлено 1879 фотоумножителей.

Снаружи стального контейнера находится бак с 3,2 килотоннами воды и 225 фотоумножителями. Этот водный черенковский детектор позволяет исключать мюоны космического происхождения. В эксперименте KamLAND регистрируются электронные антинейтрино от 55 японских реакторов, расположенных на среднем расстоянии 180 км от шахты Камиока.

3.7. Атмосферные нейтрино

Атмосферные нейтрино образуются при распадах нестабильных частиц, рождающихся в результате развития широкого атмосферного ливня, вызванного космическими протонами, бомбардирующими атмосферу. Потоки таких нейтрино из-

мерялись в экспериментах Kamiokande и Super-Kamiokande.

Детектор Super-Kamiokande состоит из двух оптически разделенных водных черенковских цилиндрических детекторов общей массой 50 килотонн воды. Внутренний детектор с 11 146 фотоумножителями имеет радиус 16,9 м и высоту 36,2 м. Внешний детектор является вето-детектором. Он позволяет отклонять мюоны космических лучей. Эффективная масса детектора составляет 22,5 килотонны.

В эксперименте Super-Kamiokande по изучению атмосферных нейтрино нейтрино регистрируются в широком диапазоне энергий от примерно 100 МэВ до примерно 10 ТэВ. При меньших энергиях, от 100 МэВ до 10 ГэВ, нейтрино регистрируются посредством наблюдения электронов и мюонов, образующихся в процессе взаимодействия нейтрино и антинейтрино с ядрами в детекторе:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow l^-(l^+) + X \quad (l = e, \mu). \quad (21)$$

Также атмосферные нейтрино изучаются в нейтринной обсерватории IceCube.

3.8. Нейтрино от сверхновых

Нейтрино играют огромную роль во взрыве сверхновой(разрушение звезды в конце ее эволюции). Во время этого процесса выделяется колоссальное количество энергии($3 * 10^{46}$ Дж) и 99% этой энергии переносится потоками нейтрино, которые несут в себе ценную информацию о процессе взрыва звезды. На данный момент, единственным случаем детектирования нейтрино от сверхновой было в 1987 году от SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке были зарегистрированы сразу тремя детекторами:

- Kamiokande II — 11 событий
- IMB — 8 событий
- Baksan — 5 событий

The SuperNova Early Warning System (SNEWS)-сеть нейтринных детекторов, созданная для предупреждения астрофизиков о взрывах сверхновых. В эту сеть входят такие детекторы, как: Borexino, Daya Bay, KamLAND, HALO, IceCube, LVD и Super-Kamiokande.

3.9. JUNO

Отдельно хочется выделить эксперимент JUNO(Jiangmen Underground Neutrino Observatory)-нейтринная обсерватория в Китае, а также первый среди нового поколения нейтринных экспериментов. Он был предложен в 2008 году, как самый

точный и крупнейший детектор нейтрино, строительство началось в 2015 году, а уже в августе 2025 года детектор был наполнен 20000 тонн жидкого сцинтиллятора и принялся набирать данные. JUNO использует около 45000 ФЭУ, что позволит определить порядок масс нейтрино: тяжелее ли третье состояние (ν_3), чем второе (ν_2). Также для повышения точности было выбрано место, где горная порода защищает детектор от космических мюонов. JUNO будет использоваться для изучения нейтрино от сверхновых, солнечных, а также реакторных нейтрино. Эксперимент рассчитан на научную эксплуатацию сроком до 30 лет с возможностью модернизации до ведущего в мире эксперимента по поиску безнейтринного двойного бета-распада. ОИЯИ также участвует в JUNO, путем хранения, моделирования, реконструкции и анализа данных на специально созданном для этого вычислительном центре.

4. Проблемы, с которыми сталкиваются нейтринные эксперименты

4.1. Информация

В описанных выше экспериментах было описано некоторое количество проблем, с которыми сталкивается каждый эксперимент по осцилляциям. В этом разделе будет уделено чуть больше внимания каждой из проблем в отдельности.

4.2. Проблема детектирования

Нейтрино является частицей, которая практически не взаимодействует с материей, из-за чего появляются значительные проблемы с её детектированием. Эта проблема частично решается путем реакций заряженных и нейтральных токов, но этот метод имеет проблему: он работает лишь для нейтрино энергиями выше 2.22 МэВ (реакция развала дейтрона через нейтральные токи становится невозможной, так как энергии частицы просто не хватает, чтобы преодолеть энергию связи ядра дейтерия). Поэтому для нейтрино энергиями ниже этого порога используются:

1. Упругое рассеяние на электронах (ES)

Это реакция вида



В этой реакции порог ограничен лишь чувствительностью детекторов к энергии отдачи электрона (в Super-K 3.5–5 МэВ, в Borexino до 0.16 МэВ)

2. Заряженные токи (CC) на ядрах Реакция вида:



Порог энергии для данного типа реакции достигает десятых МэВ, но справедлива только лишь для электронного нейтрино.

3. Обратный бета-распад



Это основная реакция для реакторных нейтрино. Пример применения данной реакции можно увидеть в Super-K: нейтрино сталкивается с протоном в воде, в результате чего образуются позитрон и нейтрон. Позитрон испускает черенковское излучение, по спектру которого и определяют параметры осцилляций.

Порог энергии данного метода 1.8 МэВ.

4.3. Фоновые сигналы

На ранних экспериментах эта проблема была одной из самых основных. Вызвана она космическим излучением (космические мюоны и другие частицы), природной радиоактивностью и нейтронами, гамма-квантами, порождаемыми реакторами и ускорителями. Решениями могут являться:

1. Расположение экспериментов на большом расстоянии под землей, чтобы космические лучи не мешали детектированию (в JUNO этому способствуют также горные породы).
2. Выбор материалов с низкой радиоактивностью .
3. Временная и пространственная селекция, для которой используются специальные алгоритмы, а также уже начинается применение искусственного интеллекта для этих целей.
4. Активные методы подавления фонового излучения (к примеру, слои водных замедлителей поглощают нейтроны еще до активной зоны детектора).

4.4. Иерархия масс нейтрино

До сих пор неизвестно, является ли массовое состояние ν_3 самым тяжелым или самым легким, из-за чего интерпретация экспериментов может быть разной. Выяснить иерархию масс поможет будущий эксперимент DUNE, который будет основываться на том, что при прямом порядке масс вероятность превращения электронных нейтрино выше в веществе, чем при обратном.

4.5. Систематические ошибки

Систематические ошибки обусловлены несовершенством оборудования, моделей и методов измерения. Источниками таких проблем зачастую являются:

1. Неточность энергетического спектра. Распределение энергий у нейтрино известно с ограниченной точностью, из-за чего в экспериментах эта ошибка может достигать нескольких процентов.
2. Неправильный (неэффективный) метод детектирования.
3. Ошибки в определении энергии регистрируемых событий.
4. Ядерные эффекты.
5. Flux uncertainty. Моделирование потока нейтрино идет при помощи сложных симуляций, и ошибки в этих моделях приводят к смещению ожидаемых событий.

Эти ошибки нужно включить в анализ, для этого используются: 1. Параметризации через мешающие параметры — попытка построить теоретический график максимально близкий к полученному в эксперименте при помощи добавления в него неизвестных членов.

2. Ковариационные матрицы. В сложных экспериментах, где сразу множество факторов влияют на погрешность недостаточно знать, что погрешность составляет $n\%$, нужно также понимать, как связаны ошибки в одном и другом энергетическом интервале. К примеру, если наша модель потока завышает количество нейтрино при энергии 2 МэВ, она завысит его и при больших энергиях, поэтому мы строим матрицу, в которой каждый член состоит из:

$$E^{total} = E^{flux} + E^{xsec} + E^{cosmic} + E^{B.I.T.E} + E^{det} + E^{stat} \quad (25)$$

Где E^{flux} — flux uncertainty, E^{xsec} — ошибка сечений взаимодействия, E^{cosmic} — ошибка, связанная с фоном от космических лучей, $E^{B.I.T.E}$ — фоновые события, рожденные пучком, E^{det} — неопределенность детектора E^{stat} — статистическая ошибка.

Внутри матрицы стоят числа от -1 до 1, которые показывают вероятность того, что наша ошибка связана с неточно проведенным экспериментом (близко к 1 — проблема в эксперименте, ближе к 0 — шум).

5. Будущие эксперименты

Как уже писалось выше многие из экспериментов собираются прекращать наборы данных уже в 2028 году, но уже сейчас на их место готовится ряд разных экспериментов учеными разных стран.

5.1. Hyper-K

Одним из них является логическое продолжение Super-Kamiokande-эксперимент Hyper-Kamiokande (Hyper-K), который будет обладать большим количеством детекторов(ФЭУ), иметь большой объем, а также большую мощность, что позволит нам регистрировать нейтрино от вспышек сверхновых, ну и также с еще большей чувствительностью измерять редкие события такие как распад протона. Если же говорить об нейтринных осцилляциях, то мы можем уточнить параметры PMNS матрицы, а конкретно фазу нарушения CP-симметрии, а также иерархию масс. Полная научная программа: детектирование ускорительных, атмосферных, солнечных и геонейтрино, распада протона, регистрация нейтринного сигнала от сверхновых и др.

5.2. DUNE

DUNE(Deep Underground Neutrino Experiment)-эксперимент в Fermilab, его отличием от других является подход к измерению δ_{cp} (если оно имеется), он использует аргон вместо воды(LArTPC вместо черенкового детектора) А также имеет более длинную базу (пучок 1300 км вместо 300 км у T2K), что позволяет нам наблюдать эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна, этот эффект усиливает или подавляет осцилляции в зависимости от: энергий нейтрино, плотности земли, и знака Δm_{32}^2 (то есть от иерархии масс), то есть эксперимент DUNE направлен на определение иерархии масс и на измерение δ_{cp} . Но также будет чувствительность и к другим параметрам осцилляций

5.3. ESS ν SB

ESS ν SB(European Spallation Source based neutrino Super Beam Experiment)-планирующийся европейский эксперимент по изучению нейтрино от протонного ускорителя, по целям он схож с Hyper-K. Основным преимуществом этого эксперимента является очень интенсивный поток нейтрино за счёт протонного пучка с мощностью 5 МВт и энергией 2 ГэВ. Данный эксперимент поможет нам измерить δ_{cp} с наибольшей точностью.

6. Заключение

В данной работе были рассмотрены теоретические аспекты нейтринных осцилляций, разобраны основные типы экспериментов по ним. Также были разобраны основные методы изучения нейтринных осцилляций (черенковские и сцинтиляционные детекторы), а также трудности, с которыми сталкиваются ученые при изучении данного явления. Также была затронута тема будущих экспериментов в этой области.

7. Список литературы

1. C. Giganti, S. Lavignac, M. Zito. Neutrino oscillations: the rise of the PMNS paradigm
2. S.Bilenky. Introduction to the Physics of Massive and Mixed Neutrinos
3. T.Tolba. The ESS based neutrino Super Beam Experiment
4. Ядерная физика в интернете [Электронный ресурс].-URL:<http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
5. Corey Adams. Systematic Uncertainties in the Short Baseline Neutrino Program at Fermilab
6. Д.В.Наумов. Введение в физику нейтрино
7. Л.Д.Колупаева, М.О.Гончар, А.Г.Ольшевский, О.Б.Самойлов. Осцилляции нейтрино: статус и перспективы определения порядка нейтринных масс и фазы нарушения лептонной CP-инвариантности