ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

«ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕСТАНДАРТНЫХ НЕЙТРИННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННЫХ ДЛИННОБАЗНЫХ НЕЙТРИННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ»

Выполнил студент 213м группы Каплун Сергей Вадимович

Научный руководитель: к.ф-м.н., доцент Широков Евгений Вадимович

Допущена к защите Зав.кафедрой

Москва

Содержание

| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
|--|--|
| ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ | 5 |
| 1. Вступление 1.1. Обзор литературы 1.2. Дефицит солнечных нейтрино 1.3. Теоретический формализм нейтринных осцилляций 1.4. Вероятности нейтринных осцилляций 1.5. Нестандартные механизмы взаимодействий | 5 5 8 11 15 16 |
| 2.1. Общее описание проекта | 18 |
| 3. Проект Т2К 3.1. Общее описание проекта 3.2. Ускоритель J-PARC 3.3. Ближний комплекс детекторов ND280 3.4. Дальний детектор Super-Kamiokande | 23 23 23 24 24 27 29 |
| 4. Проект Р2О 4.1. Общее описание проекта 4.2. Ускоритель в Протвино 4.3. Детектор ORCA | 31 |
| 5. Рассчет вероятностей нейтринных осцилляций 5.1. Модель PREM 5.2. Программный пакет ROOT 5.3. Программный пакет GLoBES 5.4. Расширение snu 5.5. Моделирование нейтринных осцилляций 5.6. Моделирование осцилляций с учетом 4-го аромата 5.7. Дальнейший план развития проекта P2O | 39 40 41 42 43 51 56 |

выводы

введение

Проблема изучения нейтринных осцилляций представляет собой ключевое значение в области физики нейтрино. Эксперименты в данной области физики имеют фундаментальное значение, поскольку определение значений осцилляционных параметров позволяет пролить свет на вопросы, включающие в себя массовую иерархию нейтрино (организацию массовых собственных состояний нейтрино), вносящую вклад во многочисленные изучаемые вопросы и предлагаемые эксперименты, настройку и оптимизацию текущих проектов. Наличие массы у нейтрино подтвердит наличие Новой физики, лежащей далеко за рамками стандартной модели, изменит наш взгляд на строение и эволюцию Вселенной. Также нейтрино в таком случае может быть рассмотрено как кандидат на роль массивной частицы "тёмной"материи.

Одним из современных проектов для регистрации нейтринных осцилляций является детектор KM3NeT/ORCA. Коллаборация KM3NeT представляет собой совокупность двух сооружаемых подводных нейтринных телескопов, один из которых (ARCA) используется для изучения астрофизических источников нейтрино в области энергий нейтрино порядка ТэВ; второй детектор (ORCA) предназначен для изучения атмосферных нейтрино энергий порядка нескольких ГэВ. Главными задачами для экспериментов KM3NeT являются: исследование астрофизических источников нейтрино, изучение параметров нейтринных осцилляций.

Нетривиальным вопросом в современной физике нейтрино является изучение нейтринных осцилляций, зависящих от ряда параметров: пройденного частицами расстояния, их энергии, типа массовой иерархии собственных состояний, трёх углов смешивания, фазы СР-нарушения, которые определяют вероятность перехода нейтрино из одного аромата в другое.

В данной работе рассматриваются различные параметры нейтринных осцилляций, теоретический формализм их описания, а также особенности детекторов. В рамках работы смоделированы значения для вероятностей нейтринных осцилляций в вакууме и в веществе в зависимости от ряда параметров. Была получена оценка чувствительности детектора в зависимости от значения фазы СР-нарушения, а также квадрата разницы масс. Получена оценка для количества регистрируемых событий.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Вступление

1.1. Обзор литературы

В работе [1] описывается возможность проведения эксперимента Р2О, проведено моделирование вероятности осцилляций нейтрино в зависимости от различных параметров, получены оценки чувствительности детектора, а также произведено сравнение с действующими и планирующимися экспериментами в физике осцилляций нейтрино. В работах [2][3] предложена модель ядерных реакций на Солнце, одним из продуктов которых является нейтрино. В работах [4][5] впервые высказано предположение, о возможности нейтринных осцилляций. В [6] подробно описывается формализм нейтринных осцилляций для случая двух ароматов, подробно описаны механизмы возникновения осцилляций в вакууме и при прохождении через вещество. В работе [7] подробно рассматриваются многие вопросы о массе нейтрино, двойном *β*-распаде, нейтринных осцилляциях. В [8] изучены проблемы СР-нарушения. Также обсуждаются некоторые возможные модели СР-нарушения. В работе [9] перечисляются ограничения, которые уже существуют на электрослабых симметричных моделях, и демонстрируется, что можно построить жизнеспособные модели, избегая всех этих ограничений. В конце рассматриваются методы проверки этих моделей и предлагаются подходы к преодолению вырождений при получении параметров нейтринной массы, вызванных NSI. В [10] рассматриваются преобразования массовых матриц дираковского и майорановского типа, которые связывают лево- и правокиральные компоненты одного и того же поля и сопряжённых полей соответственно, для решения уравнения Дирака для нейтрино с массовым членом.

В работах [11][12] рассматривается статус и дальнейшие преспективы эксперимента КАТRIN. Статья [13] содержит описание модели PMNS смешивания трёх ароматов нейтрино, и современное состояние развития экспериментального определения параметров смешивания. В [14] описываются процессы происзодящие при взрыве сверзновых, продукты, которые получаются в ходе взрыва, описан эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна (MSW), описано влияние массовой иерархии нейтрино на эти процессы. Моделирование процессов прохождения нейтрино сквозь адиабатические слои внутри коллапсирующей звезды с учетом MSW-эффектов рассматривается в работе [16]. В работах [17][18][19][20] обсуждается параметризацию и расчет электромагнитных формфакторов нейтрино Майораны, а также приведены общие формулы для скорости распада $\nu_2 \rightarrow \nu_1 + \gamma$, а также ведется описание процессов с нарушением сохранения количества лептонов, таких как электромагнитные моменты переходов нейтрино.

В работе [21] показано, что калибровочные теории вносят вклад в безнейтринный двойной β -распад $[(\beta\beta)_{0\nu}]$, а также ставится вопрос о том, подразумевает ли наблюдение $(\beta\beta)_{0\nu}$ существование Майорановской массы для нейтрино.

В работе [23] предлагается новый выбор углов и фаз для матрицы смешения N поколений кварков. Новый выбор, который в значительной степени основан на более ранних работах, позволяет установить простые связи между измеряемыми величинами и угловыми переменными. Используя простую схему аппроксимации, он также позволяет определить общий порядок величины многих физических величин, просто наблюдая за индексами углов, которые появляются в соответствующих выражениях. В [22] рассматривается явление осцилляций стерильных нейтрино. Поиск электронных антинейтрино, мюонных нейтрино и исчезновение мюонных антинейтрино, вызванное смешением стерильных нейтрино, были проведены лабораториями Daya-Bay и Minos. В [24] представлены объединенные результаты этих поисков, а также результаты исключения из реакторного эксперимента Bugey-3, оформленного в минимально расширенном сценарии с четырьмя нейтрино. В работе [25] рассматривается теория и феноменология легких стерильных нейтрино в масштабе масс эВ. Аномалии детектора реакторных нейтрино, галлия и жидкого сцинтиллятора кратко описаны и интерпретированы как признаки существования осцилляций в короткобазных экспериментах, которые требуют существования легких стерильных нейтрино. Обсуждаются глобальные совпадения данных короткобазных экспериментах в схемах 3 + 1 и 3 + 2, а также последствия для β-распада и безнейтринного двойного β-распада. В работах [26], [27] произведено общее описание эксперимента NOvA. В [28] описываются результаты эксперимента СНООД.

В работе [29] представлены результаты исследований взаимодействий нейтрино и антинейтрино при энергии до 30 ГэВ на пузырьковой камере СКАТ с фреоновым заполнением, экспонированной на нейтринном канале ускорителя У-70 ИФВЭ (Протвино). В работе [30] представлены экспериментальные результаты по изучению квазиупругих реакций $\nu_{\mu}n \rightarrow \mu^{-}p$ и $\bar{\nu}_{\mu}p \rightarrow \mu^{+}n$ в диапазоне энергий 3-30 ГэВ. В [31] описаны конструкция и параметры нейтринного детектора ИФВЭ–ОИЯИ, крупнейшей экспериментальной установки на ускорителе У-70 (ИФВЭ, Протвино). Подробно описаны основные компоненты детектора (дрейфовые камеры, счетчики жидкости-сцинтиллятора, детектор электромагнитных ливней, магнитная система). Описана организация онлайновой системы сбора данных и автономного программного обеспечения. Представлены основные характеристики детектора. Кратко описаны основные физические результаты, полученные на установке. В [32] описана схема двухступенчатого ускорителя протонов, предложена схема инжекции протонов, которая позволила бы увеличить интенсивность пучка до 5 × 10¹³ протонов за цикл. В работе [33] Рассмотрены схемы формирования нейтринного пучка в различных направлениях на ускорителе У-70, модернизированном в рамках проекта ОМЕГА, произведены расчеты энергетических спектров нейтрино. Дано сравнение выходов нейтринных событий в различных действующих и планируемых ускорительных экспериментах с длинной базой.

В [34] дано подробное описание детекторов KM3NeT: ARCA и ORCA. В [35] получены оценки для осцилляций нейтрино в веществе. В работе [36] проводится подробное описание модели PREM. По ссылке [37] находится документация и примеры к програмному фреймворку ROOT. По ссылке [38] располагается подробная документация с примерами програмного расширения для ROOT для моделирования длиннобазных экспериментов в физике нейтрино. В [39] описываются значения параметров осцилляций. В [40] представлены измерения суммарных сечений заряженного тока нейтрино и антинейтрино на углероде и их соотношения с помощью сцинтиллятора-трекера MINER и А. В работе [41] описываются осцилляции нейтрино в атмосфере при энергии > 15 ГэВ, и возможности их наблюдения на детекторах коллаборации KM3NeT. В [42] обсуждается длиннобазоный нейтринный эксперимент, направленный на изучение влияния вещества на Землю, используя большое исчезновение мюонов. Доказано, что для мюонных нейтрино со средней энергией 6 (8) ГэВ, распространяющихся на расстояние L = 6000 (8000) км, получены идеальные условия.

В работах [43][44] произведено предварительное исследование научного потенциала эксперимента Р2О. В [45], представленны подробное описание детектора JUNO и физические мотивации и ожидаемая производительность детектора JUNO для различных предлагаемых измерений. В работе [46] описывается единственный экспериментальный результат по сечениям нейтрино на водной мишени, полученный в эксперименте T2K. В работах [47][48] T2K, и NOvA, соответственно опубликовали экспериментальные ограничения на массовую иерархию и нарушение CP.

1.2. Дефицит солнечных нейтрино

Первые эксперименты по обнаружении элементарной частицы нейтрино были начаты в 30-х - 40-х годах двадцатого века. Однако лишь в 1956 году американским физикам Ф. Райнесу и К. Коэну удалось в результате сложного эксперимента доказать существование нейтрино (а точнее антинейтрино), зарегистрированного от ядерного реактора. Позже были открыты все три, известных на данный момент, поколения нейтрино и антинейтрино: электронное, мюонное, таонное. На настоящее время спектр по нейтрино классифицируется в зависимости от источника следующим образом:

- реликтовые (космологические) нейтрино
- солнечные нейтрино
- геонейтрино
- атмосферные нейтрино
- астрофизические нейтрино

Также отдельно выделяют искусственные нейтрино, включающие в себя реакторные нейтрино и ускорительные. Спектр распределения нейтрино в зависимости от энергии указан на рисунке 1.



Рис. 1: Энергии и потоки нейтрино от различных источников.

Ханс Бете[2] и Карл Вайцзекер[3] независимо друг от друга в 1938-1939 годах предложили теоретическое описание двух различных (но частично перекрывающихся) цепочек реакций преобразования ядер водорода в ядра гелия, которые могут обеспечить достаточную светимость звезды: СNO-цикл (рис. 2a), pp-цикл (рис. 2b).



Рис. 2: Цепочки реакций в звёздах

Какая из реакций играет наиболее существенную роль, зависит от температуры звезды. Согласно Стандартной Солнечной Модели основным рабочем циклом внутри Солнца является реакция *pp*-цепочки, в ходе которой выделяется 98% энергии Солнца, а в ходе СNO-цикла всего лишь 2%. Солнце производит порядка $2 \cdot 10^{38}$ нейтрино в секунду. Основываясь на реакции pp-цикла можно рассчитать энергетический спектр(рис. 3).

Также известны следующие теоретические значения потоков солнечных нейтрино (Таблица 1). Как можно заметить, большинство солнечных нейтрино имеют энергию ниже 1МэВ.

Первые измерения интенсивности потока солнечных нейтрино были проведены были произведены Реймондом Дэвисом в 1960х-1970х годах с помощью хлор-аргонового метода на основе реакции ${}^{37}Cl + \nu_e \rightarrow {}^{37}Ar + e^-$. Данные, полученные в течении 30 последующих лет измерений, подтвердили наличие дефицита солнечных нейтрино приблизительно в два



Рис. 3: Рассчитанный спектр солнечных нейтрино. Показаны пороги регистрации нейтрино различными методами, а также пороги регистрации для существующих нейтринных детекторов.

| Тип нейтрино | Поток, $I^{-2}c^{-1}$, |
|--------------|-------------------------|
| pp | $6.0 \cdot 10^{10}$ |
| pep | $1.43 \cdot 10^{8}$ |
| ^{7}Be | $4.89 \cdot 10^{9}$ |
| ^{8}B | $5.69\cdot 10^6$ |
| ^{13}N | $4.92 \cdot 10^{8}$ |
| ^{15}O | $4.26\cdot 10^8$ |

Таблица 1: Потоки различных типов солнечных нейтрино, измеряемые на Земле.

раза. Также такие наблюдения были подтверждены в эксперименте SAGE, использовавшего реакцию ${}^{71}Ga + \nu_e \rightarrow {}^{71}Ge + e^-$, и в том числе экспериментом Kamiokande-II, проработавшего с 1986 по 1995 год, использовавшего черенковский метод регистрации.

Одним из объяснений подобной нехватки нейтрино могут быть нейтринные осцилляции - переход нейтрино из одного аромата в другой. Предположение о таком поведении нейтрино было впервые высказано итальянским и советским физиком Бруно Понтекорво[4],[5]. Он рассмотрел переходы с максимальной амплитудой между одним известным в то время типом нейтрино и его стерильной античастицей $\nu \leftrightarrow \bar{\nu}_{ster}$.

1.3. Теоретический формализм нейтринных осцилляций

Для объяснения нейтринных осцилляций¹ рассмотрим лагранжиан свободного фермиона массой *m*:

$$\mathcal{L}_{\psi} = \bar{\psi}(x)(\gamma^{\mu}i\partial_{\mu} - m)\psi(x), \qquad (1)$$

где $\bar{\psi} = \bar{\psi}(x^0, \mathbf{x}) = \psi^H(x^0, \mathbf{x})\gamma^0$, $\psi^H(x^0, \mathbf{x})$ - эрмитово-сопряжённый биспинор, а γ^{μ} - матрицы Дирака в представлении:

$$\gamma^{0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \qquad \gamma^{i} = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_{i} \\ -\sigma_{i} & 0 \end{pmatrix}, \qquad i = 1, 2, 3,$$
$$\gamma_{5} = -i\gamma^{0}\gamma^{1}\gamma^{2}\gamma^{3} = -\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

где σ_i - матрицы Паули:

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \qquad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \qquad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Матрицы Дирака - это 4 \times 4-матрицы, записанные, как блочные 2 \times 2-матрицы с 2 \times 2 блоками, которые обязаны удовлетворять соотношению:

$$\gamma^{\mu\lambda} + \gamma^{\lambda\mu} = 2g^{\mu\lambda}, \qquad \mu, \lambda = 0, 1, 2, 3$$

Лагранжиан (1) приводит к следующему уравнению Дирака:

$$\bar{\psi}(x)(\gamma^{\mu}i\partial_{\mu}+m)\psi(x) = 0.$$
(2)

При подстановке левокиральных и правокиральных нейтринных полей²

$$\nu_{iL} = \frac{1}{2}(1+\gamma_5)\nu_i, \qquad \nu_{iR} = \frac{1}{2}(1-\gamma_5)\nu_i, \qquad (i=e,\mu,\tau)$$
(3)

в лагранжиан (1), предполагая массу нейтрино равной нулю, получим:

$$\mathcal{L}_{\nu} = \sum_{i}^{n} (\bar{\nu}_{iL} \gamma^{\mu} i \partial_{\mu} \nu_{iL}) + \sum_{i}^{n} (\bar{\nu}_{iL} \gamma^{\mu} i \partial_{\mu} \nu_{iL}).$$
(4)

В таком случае возникает киральная симметрия относительно замены волновых функций

$$\nu'(x) = \exp\left(-\frac{i\gamma_5\omega}{2}\right)\nu(x), \qquad \bar{\nu}'(x) = \exp\left(-\frac{i\gamma_5\omega}{2}\right)\bar{\nu}(x), \qquad (5)$$

¹Более подробное теоретическое описание формализма нейтринных осцилляций можно найти в работах [6][7].

²Стоит отметить, что правокиральные состояния нейтрино, соответствующие собственному состоянию спиральности $2s = \lambda = 1$, когда спин направлен по импульсу, на опыте не наблюдаются. Экспериментально были обнаружены только левокиральные нейтринные состояния.

где ω - произвольное число, при этом лагранжиан (4) является киральноинвариантным. Однако при введении массового члена $m_{\nu}(\bar{\nu}\nu)$ симметрия лагранжиана (4) нарушается, относительно киральных преобразований. При появлении массового члена уравнения Дирака заметно усложняются. При их решении для общего случая вводятся массовые матрицы дираковского и майорановского типа, которые связывают лево- и правокиральные компоненты одного и того же поля и сопряженных полей соответственно. Более подробное описание данных преобразований можно найти в работе [10]. Таким образом, можно показать, что левые компоненты нейтрино могут быть записаны в виде

$$(\nu_{lj})_L = \sum_i U_{ji}(\nu_i)_L,\tag{6}$$

где ν_i - массовые собственные состояния, $\nu_{lj}(l = e, \mu, \tau; j = 1, 2, 3)$ - собственные состояния лагранжиана электрослабого взаимодействия, а U_{ji} унитарная матрица смешивания, которую, в случае трёх поколений лептонов, левые компоненты которых участвуют в электрослабом взаимодействии, можно привести к виду аналогичному матрице Кабибо-Кобаяши-Маскавы для кварков [8]:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 & S_1 C_3 & S_1 S_3 \\ -S_1 C_2 & K_1 & K_2 \\ S_1 S_2 & K_3 & K_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix},$$
(7)

где

$$S_{i} = \sin \theta_{i}, \quad C_{i} = \cos \theta_{i},$$

$$K_{1} = C_{1}C_{2}C_{3} - S_{1}S_{3}exp(i\varphi), \quad K_{2} = C_{1}C_{2}S_{3} - S_{2}C_{3}exp(i\varphi),$$

$$K_{3} = -C_{1}S_{2}C_{3} - S_{2}S_{3}exp(i\varphi), \quad K_{4} = -C_{1}S_{2}S_{3} + C_{2}C_{3}exp(i\varphi), \quad i = 1, 2, 3$$

Унитарная матрица смешивания 3×3 также называется матрицей Понтекорво-Маки-Нагасава-Саката и может быть параметризована как продукт трёх унитарных матриц вращения[9], с помощью трёх углов смешивания $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ и комплексной СР-нарушающей фазы δ :

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $c_{ij} = \cos \theta_{ij}, \quad s_{ij} = \sin \theta_{ij}.$

Экспериментальное подтверждение нейтринных осцилляций будет означать наличие массы у нейтрино, поскольку для самих осцилляций тре-

буется наличие собственных массовых состояний нейтрино³. В представлении (8) составные элементы матрицы отражают области различного экспериментального исследования осцилляций с использованием атмосферных (а также ускорительных), реакторных и солнечных нейтрино. При этом эксперименты в области нейтринных осцилляций позволяют найти только разницу между квадратами масс $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$, (i, j = 1, 2, 3), соответствующих различным собственным массовым состояниям (ν_1, ν_2, ν_3). При рассмотрении модели с тремя ароматами нейтрино можно выделить две независимых разности квадратов масс нейтрино, первая из которых определяется по осцилляциям нейтрино в экспериментах с длинной базой ($\Delta m_{21}^2 \equiv \Delta m_{sol}^2 > 0$), а другая определяется из экспериментах, работающих с атмосферными нейтрино (Δm_{atm}^2). Соответственно, есть две возможности определить Δm_{atm}^2 – либо как $|\Delta m_{31}^2|$, либо как $|\Delta m_{32}^2|$. Поскольку $|\Delta m_{sol}^2 \ll \Delta m_{atm}^2|$ это подразумевает

$$\Delta m_{21}^2 \equiv \Delta m_{sol}^2 \ll |\Delta m_{31}^2| \simeq |\Delta m_{32}^2| \simeq \Delta m_{atm}^2. \tag{9}$$

Существуют две возможности для массовой иерархии (NMH - Neutrino Mass Hierarchy): в одном случае $m_1 < m_2 < m_3$ - подобная иерархия носит название нормальной (NH - Normal Hierarchy), во втором $m_1 < m_2 < m_3$ - подобная иерархия носит название инверсной (IH - Inversed Hierarchy). В соответствии с (9) порядок масс $m_1 < m_3 < m_2$ запрещён. На рисунке 4 изображено распределение собственных массовых состояний нейтрино $(\nu_1\nu_2\nu_3)$ внутри флэйворных состояний $(\nu_e\nu_\mu\nu_\tau)$ в случае нормальной и инверсной иерархии.

Определение массовой иерархии нейтрино позволит лучше понять механизм генерации масс, лептонного смешивания и скрытые за ним симметрии, однако из существующих экспериментальных данных нет существенных указаний в пользу одной из иерархий.

Также массовая иерархия оказывает значительное влияние на процессы происходящие внутри сверхновых[14]. При моделировании процессов прохождения нейтрино сквозь адиабатические слои внутри коллапсирующей звезды важно учитывать MSW-эффекты[16]. Результат моделирования во многом определяется теоретическими предсказаниями об иерархии масс нейтрино.

Осцилляции нейтрино могут дать ответ на вопрос о том является нейтрино Дираковской или Майорановской частицей. Безнейтринный

³При этом для подтверждения отсутствия масс нейтрино необходимо экспериментально показать это хотя бы для двух флэйворных ароматов нейтрино. Одним из подобных экспериментов является эксперимент Katrin[11][12].



Рис. 4: Два возможных вида массовой иерархии. Слева изображена NH, справа IH.

двойной β -распад и прочие процессы с нарушением сохранения количества лептонов, такие как электромагнитные моменты переходов нейтрино[17][18][19][20] способны пролить свет на глубинную природу нейтрино. Важность безнейтринного двойного бета-распада связана с тем, что в калибровочной теории, независимо от механизма, индуцирующего $0\nu\beta\beta$, он обязательно подразумевает массу майорановского нейтрино[21], как показано на рис.5.



Рис. 5: Эквивалентность безнейтринного двойного бета-распада и Майорановской массы нейтрино[21]

Также ненулевое значение δ_{cp} могло бы стать указанием на нарушение СР-симметрии и послужить объяснением барионной асимметрии Вселенной. Исследования δ_{cp} возможны благодаря ненулевому значению угла θ_{13} , измеренному Daya Bay. Благодаря этому существует возможность

измерения δ_{cp} .

Окном в Новую физику также может стать открытие стерильных нейтрино. Наличие этого типа нейтрино имеет значение для объяснения космологических эффектов[22], а также стерильные нейтрино могут быть кандидатами на роль лёгкой тёмной материи.

1.4. Вероятности нейтринных осцилляций

Чтобы изучать эффекты материи при осцилляциях $\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu}$ необходимы эксперименты с длинной базой (~1000км). В частности электронные нейтрино могут испытывать упругое когерентное рассеяние на элементарных частицах среды (Таблица 2).

| Реакция | Эффективный потенциал |
|---|--|
| $\nu(\bar{\nu})e^- \to \nu(\bar{\nu})e^-$ | $V_W^e = \pm \sqrt{2} G_F N_e$ |
| $\nu(\bar{\nu})p \to \nu(\bar{\nu})p$ | $V_Z^p = \pm \frac{G_F}{\sqrt{2}} (1 - 4\sin^2\theta_W) N_p$ |
| $\nu(\bar{\nu})e^- \rightarrow \nu(\bar{\nu})e^-$ | $V_Z^e = \mp \frac{\dot{G}_F}{\sqrt{2}} (1 - 4\sin^2\theta_W) N_e$ |
| $\nu(\bar{\nu})n \to \nu(\bar{\nu})n$ | $\dot{V}_Z^n = \mp \frac{G_F N_n}{\sqrt{2}}$ |

Таблица 2: Эффективные потенциалы материи (для электронейтральной, немагнитной, нерелятивисткой среды), верхний знак относится к случаю нейтрино, нижний к антинейтрино

где θ_W - угол Вайнберга, N_a - концентрация a частиц в среде, G_F - константа слабого взаимодействия.

В случае постоянной плотности материи, внутри которой распространяется нейтринный пучок вероятность осцилляций можно оценить следующим образом [15]:

$$P^m(\nu_\mu \to \nu_e) \approx \sin^2(\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}^m) \sin^2\left(\frac{\Delta^m m^2 L}{4E_\nu}\right) \tag{10}$$

$$P^{m}(\nu_{\mu} \to \nu_{\mu}) \approx 1 - \sin^{2}(2\theta_{23}) \cos^{2}(\theta_{13}^{m}) \sin^{2}\left(\frac{(\Delta m_{31}^{2} + \Delta^{m}m^{2})L}{8E_{\nu}} + \frac{VL}{4}\right) - \\ - \sin^{2}(2\theta_{23}) \sin^{2}(\theta_{13}^{m}) \sin^{2}\left(\frac{(\Delta m_{31}^{2} - \Delta^{m}m^{2})L}{8E_{\nu}} + \frac{VL}{4}\right) - \\ - \sin^{4}(\theta_{23}) \sin^{2}(2\theta_{13}^{m}) \sin^{2}\left(\frac{\Delta^{m}m^{2}L}{4E_{\nu}}\right),$$
(11)

где V - упомянутый выше эффективный потенциал, а $\Delta^m m^2$ и θ_{13}^m - эффективные значения осцилляторных параметров материи, которые определя-

$$\sin^2(2\theta_{13}^m) \equiv \sin^2(2\theta_{13} \left(\frac{\Delta m_{31}^2}{\Delta^m m^2}\right)^2$$
$$\Delta^m m^2 \equiv \sqrt{(\Delta m_{31}^2 \cos(2\theta_{13}) + 2E_\nu V)^2 + (\Delta m_{31}^2 \sin(2\theta_{13}))^2}$$

Из выражений для $P^m(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu})$ и $\sin^2(2\theta_{13}^m)$ следует, что вероятность проосциллировать в частицу другого аромата у нейтрино максимальна при минимальном значении $\Delta^m m^2$, что соответствует энергии резонанса, которая (для нормальной иерархии) определяется соотношением [15]:

$$E_{res} \equiv \frac{\Delta m_{31}^2 \cos(2\theta_{13})}{2\sqrt{2}G_F N_E} \simeq 7\Gamma \Im B\left(\frac{4.5\Gamma/cM^3}{\rho}\right) \left(\frac{\Delta m_{31}^2}{2.4 \times 10^{-3} \Im B^2}\right) \cos(2\theta_{13}),$$
(12)

где ρ - плотность материи. Плотность вещества Земли обычно описывается с помощью модели PREM (Preliminari Reference Earth Model). При наличии моделировании обычно весь рассматриваемый участок разбивается на отрезки, на которых плотность вещества считается постоянной, а затем производится вычисление необходимых величин на каждом из участков, с последующим объединением результата.

1.5. Нестандартные механизмы взаимодействий

Стандартное представление можно расширить наличием четвертого аромата лептона, что выходит за рамки Стандартной Модели. В этом случае матрица смешивания будет иметь размерность 4×4 , и будет определяться 3-мя фазами $\delta_{13} = \delta_{cp}, \delta_{24}, \delta_{14}$ и 6 углами смешивания $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{23}, \theta_{24}, \theta_{34}$. Тогда унитарная матрица может быть представлена через матрицы поворота $R_{12}, R_{13}, R_{14}, R_{23}, R_{24}, R_{34}$ [23]

$$R_{12} = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R_{13} = \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$
$$R_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} & 0 \\ 0 & -s_{23} & c_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R_{14} = \begin{pmatrix} c_{14} & 0 & 0 & s_{14}e^{-i\delta_{14}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_{14}e^{i\delta_{14}} & 0 & 0 & c_{14} \end{pmatrix},$$
$$R_{24} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{24} & 0 & s_{24}e^{-i\delta_{24}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -s_{24}e^{i\delta_{24}} & 0 & c_{24} \end{pmatrix}, \quad R_{34} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{34} & s_{34} \\ 0 & 0 & -s_{34} & c_{34} \end{pmatrix}$$

следующим образом:

$$U = R_{34}R_{24}R_{23}R_{14}R_{13}R_{12}$$

В предположении инвариантности нейтрино-антинейтрино в приближении $\Delta m_{24}^2 \gg \Delta m_{31}^2$ для Daya Bay и Bugey-3 вероятность выживания электронных антинейтрино с энергией *E* после прохождения расстояния *L* примерно равняется [24]:

$$P_{i_e \to \bar{\nu}_e} \approx 1 \quad 1 - 4 |U_{e4}|^2 (1 - |U_{e4}|)^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E}\right) -4 |U_{e3}|^2 \left(1 - |U_{e3}|^2\right) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right)$$

что даёт следующее $\sin^2 \theta_{14}$ -зависимое выражение:

$$P_{D_e \to \bar{\nu}_e} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E}\right) \\ - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right)$$

Долгосрочные эксперименты, такие как MINOS и MINOS+ ограничивают $\sin^2 2\theta_{14}$, точно измеряют исчезновение мюонных нейтрино и антинейтрино, для которых мы можем оценить вероятность выживания как:

$$P_{(-)_e \to U_e} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \cos 2\theta_{24} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) - \sin^2 2\theta_{24} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{41} L}{4E}\right)$$

Кроме того, длиннобазные эксперименты также могут выявить дефицит взаимодействия нейтрино с нейтральным током (NC) на ближних и дальних детекторах, приблизительно описанный как

$$P_{\rm NC} = 1 - P\left(\nu_{\mu} \to v_{s}\right)$$

$$\approx 1 - \cos^{4}\theta_{14}\cos^{2}\theta_{34}\sin^{2}2\theta_{24}\sin^{2}\left(\frac{\Delta m_{41}^{2}L}{4E}\right)$$

$$-\sin^{2}\theta_{34}\sin^{2}2\theta_{23}\sin^{2}\left(\frac{\Delta m_{31}^{2}L}{4E}\right)$$

$$+ \frac{1}{2}\sin\delta_{24}\sin\theta_{24}\sin2\theta_{34}\sin2\theta_{23}\sin\left(\frac{\Delta m_{31}^{2}L}{2E}\right)$$

Помимо чувствительности как к θ_{24} , так и к Δm_{41}^2 , канал NC обеспечивает чувствительность к θ_{14} , θ_{14} и Δm_{24}^2 . Превращение из мюонное (анти)нейтринно в электронное (анти)нейтринно, обусловленному четвертым массовым состоянием, был выдвинут в качестве возможного объяснения результатов LSND и MiniBooNE. Для короткобазных нейтринных экспериментов эта вероятность описывается

$$P_{\substack{(-)\\\nu\mu\to\nu_e}}^{SBL} = 4 |U_{e4}|^2 |U_{\mu4}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E}\right)$$

, где

$$4 |U_{e4}|^2 |U_{\mu4}|^2 = \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \theta_{24} \equiv \sin^2 2\theta_{\mu4}$$

Таким образом, ограничения на исчезновение электронных антинейтрино из реакторов на $\sin^2 2\theta_{14}$ в сочетании с ограничениями на исчезновение мюонных нейтрино и антинейтрино из экспериментов с длинной базой $\sin^2 2\theta_{24}$ могут накладывать сильные ограничения на квадратично подавленное появление электронного нейтрино или антинейтрино, описанное $\sin^2 2\theta_{\mu e}$ в рамках модели 3+1 [25].

2. Проект NOvA

2.1. Общее описание проекта

Эксперимент NuMI Off-Axis ν_e Appearance Experiment (NOvA)-это эксперимент с 2 детекторами нейтринных осцилляций, который оптимизирован для идентификации ν_e . NOvA использует пучок мюоных нейтрино NuMI в Fermilab в качестве источника нейтрино [26] и жидкостный сцинтиллятор массой 14 кт как дальный детектор на расстоянии 810 км (Эш-Ривер, Миннесота) для обнаружения осциллирующего пучка. Он имеет самую длинную возможную базовую линию для лучевой линии NuMI в Соединенных Штатах, которая максимизирует эффект материи и позволяет измерять упорядочение массы нейтрино. NOvA оснащает функционально идентичный ближний детектор весом 300 тонн, расположенный в Fermilab, для измерения еще не проосциллирующих нейтрино из пучка для оценки фона в дальнем детекторе. Траектория для луча NOvA и расположение детекторов показаны на рис. 6. Дальний детектор расположен на расстоянии 14 мрад от оси для получения узкополосного луча вокруг области максимума колебаний (≈2 ГэВ), как показано на рис. 7. В сочетании с поперечными сечениями взаимодействия конечных состояний установка вне оси обеспечивает оптимизированное разделение сигнала и фона.



Рис. 6: Траектория нейтринного пучка из Фермилаб (снизу) до Эш-Ривер в Миннесоте (сверху).

NOvA измеряет вероятность появления $\nu_e(\bar{\nu_e})$ и вероятность исчезновения $\nu_\mu(\bar{\nu_\mu})$ с помощью пучков нейтрино и антинейтрино. Эксперимент по появлению $\nu_e(\bar{\nu_e})$ исследует:

- иерархию масс нейтрино (массовое упорядочение ν_3 и других двух)
- фазу нарушения δ^{cp} в нейтринном секторе
- угол смешения PMNS θ_{13}
- θ_{23} октант (будь то $\theta_{23} > или < 45^{\circ}$).

Для эксперимента по исчезновению $\nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu} \text{ NOvA}$ выполнит точные измерения на параметрах атмосферных колебаний $|\Delta m_{32}^2|$ и θ_{23} . Поскольку NOvA имеет большие детекторы, ее также можно использовать для изучения других физических явлений, таких как поперечные сечения нейтрино, магнитный момент нейтрино, сверхновые, монополи, стерильные нейтрино и нестандартные нейтринные взаимодействия.



Рис. 7: Смоделированые энергетические спектры нейтрино для взаимодействий заряженного тока ν_{ν} в детекторах, расположенных на расстоянии 0, 7, 14 и 21 мрад от оси пучка NuMI. NOvA использует 14 мрад. Вероятность $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ в зависимости от энергии показана внизу [26].

Детекторы NOvA-это мелкозернистые и высокоактивные отслеживающие калориметры. Они состоят из пластиковых (PVC) экструзий, заполненных жидким сцинтиллятором, с волокнами сдвига длины волны (WLS), подключенными к лавинным фотодиодам (APDs). Размер поперечного сечения ячеек детектора составляет около 6 см×4 см. Каждая ячейка расширяет полную ширину или высоту детектора, 15,6 м в дальнем детекторе и 4,1 м в ближнем. Дальний детектор весом 14 кт имеет 344 064 ячейки, а ближний детектор весом 0,3 кт имеет 18 000 ячеек. Каждая плоскость (ширина ячейки) детектора размером всего 0,15 длины волны. Этот уровень детализации значительно помогает отделить электроны от фона π^0 . Каждая ячейка детектора имеет волокно, изменяющее длину волны, подключенное к лавинному фотодиоду (APD). Сцинтилляционный свет, излучаемый изотропно, улавливается в волокнах, изменяющих длину волны, которые преобразуют длину волны в чувствительную область APDs. APD имеют два существенных преимущества по сравнению с другими фотоприемниками: высокая квантовая эффективность и равномерная спектральная квантовая эффективность. Высокая квантовая эффективность APD позволяет использовать очень длинные сцинтилляторные модули, что зна-

2.2. Пучок нейтрино NuMI

NOvA будет изучать колебания $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ в пучке нейтрино NuMI. Пучок создается из столкновений протонов с энергией 120 ГэВ, ускоряемых главной инжекторной установкой в Фермилабе, с графитовой мишенью. Каждые 1,33 должен производиться пучок размером 10 мкм [27]. Из кинематики распада пиона мы знаем, что энергия нейтрино будет зависеть от характерного угла распада θ между нейтрино и родительским пионом. Как показано на рис. 8, при $\theta = 14$ мрад большинство распадов пионов приводят к нейтрино с E = 2 ГэВ, при этом некоторая энергия находится около этого значения. Таким образом, детекторы NOvA, расположенные на расстоянии 14 мрад от оси луча NuMI, будут измерять узкополосный луч, достигший максимума очень близко к максимуму осцилляции $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ на расстоянии 810 км ($E \approx 1,6$ ГэВ), как показано на рис. 8. Спектр энергии узкого пучка сильно уменьшает фон от подавления нейтринных событий с нейтральным током более высокой энергии (NC), доминирующий фон для поиска осцилляций $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ с детекторами, расположенными на оси.



Рис. 8: Слева: Энергии нейтрино в зависимости от энергии родительского пиона и угла распада пиона θ. Справа: ожидаемые энергетические спектры пучка нейтрино для различных внеосевых местоположений детектора в средней энергетической настройке NuMI по сравнению с энергетическим спектром на оси.

2.3. Ближний и дальний детекторы

Система детекторов NOvA состоит из ближнего и дальнего детекторов, построенных на расстоянии 14 мрад от оси источника пучка NuMI. Детекторы функционально идентичны, что позволяет устранить систематические неопределенности, связанные с потоком нейтрино и

моделированием поперечного сечения. Оба детектора представляют собой высокосегментированные отслеживающие калориметры, построенные непосредственно из низкоуглеродистых ($\approx 0,15$ длины излучения на слой), высоко отражающих (15% TiO2) PVC-ячеек с 65% активным объемом. Ячейки PVC заполнены жидким сцинтиллятором. Каждая ячейка имеет поперечное сечение 3,8 см на 5,9 см с 90% - ной отражательной способностью для света при 430 нм. Шестнадцать ячеек выдавливаются вместе как одна деталь. Две экструзии соединяются вместе торцевым уплотнением и крышкой коллектора для получения модуля из 32 ячеек. Ориентация ячеек чередуется между вертикальной и горизонтальной, чтобы обеспечить реконструкцию событий. Сцинтилляционный свет собирается петлей смещающего длину волны волокна в каждой ячейке и считывается 32пиксельными лавинными фотодиодами (APDs). APDs имеют квантовую эффективность 85%, работают с коэффициентом усиления 100 и охлаждаются до -15° С, чтобы уменьшить шум до менее чем 2 фотоэлектронов.



Рис. 9: Относительные размеры ближнего и дальнего детекторов эксперимента NOvA

Детекторы 9 оптимизированы для обнаружения взаимодействий с заряженным током (CC) с тонкой выборкой характерных электромагнитных потоков. Ближний детектор имеет массу 222 тонны и помещен под землю, в новую пещеру, которая вырыта рядом с экспериментальным залом MINOS, в 1 км от цели производства луча. Ближний детектор будет наблюдать космическую частоту 50 Гц и будет видеть примерно 30 событий нейтрино на пучкок. Здание дальнего детектора в Эш-Ривер включает в себя насыпь из баритовой породы высотой 3 м, чтобы уменьшить космический фон. Блоки из PVC дальнего детектора будут иметь высоту 15,6 м и ширину 15,6 м. Общая длина детектора превысит 63 м.

3. Проект Т2К

3.1. Общее описание проекта

Эксперимент T2K (Tokai-to-Kamioka) представляет собой длинный базовый эксперимент, изучающий осцилляции нейтрино, предназначенный для исследования смешения мюонного нейтрино с другими видами и проливает свет на масштаб массы нейтрино. Это первый эксперимент по осцилляциям нейтрино с длинной базовой линией, предложенный и одобренный для того, чтобы явно посмотреть на появление электронного нейтрино из мюонного нейтрино, тем самым измерив θ_{13} , последний неизвестный угол смешивания в лептонном секторе.

Физические цели Т2К включают измерение параметров нейтриных осцилляций с точностью $\delta(\Delta m_{23}^2) \ 10^{-4} eV^2$ и $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \ 0,01$ через исследование исчезновения ν_{ν} в пучке, и достижение примерно в 20 раз лучшей чувствительности по сравнению с текущим лучшим пределом θ_{13} из эксперимента СНООZ [28] путем поиска появления электронных нейтрино в процессе $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ (со значениями $\sin^2(2\theta_{\mu e} \approx \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{13} > 0,004$ при 90% СL для фазы СР нарушения $\delta^{cp} = 0$). В дополнение к исследованиям нейтринных колебаний нейтриный пучок T2K(с энергией ≈ 1 ГэВ) позволит создать богатую физическую программу с фиксированной мишенью для исследований взаимодействия нейтрино при энергиях, охватывающих переход между резонансным производством и режимами глубокого неупругого рассеяния.

Т2К использует Super-Kamiokande в качестве дальнего детектора для измерения нейтрино на расстоянии 295 км от ускорителя, а ближние детекторы для отбора проб пучка сразу после его создания. Эксперимент включает в себя ускоритель для производства нейтринного пучка и ближний комплекс детекторов на высоте 280м (ND280), оба из которых были недавно сконструированы. Super-Kamiokande был модернизирован и восстановлен до 40% покрытия фотокатодов (так же, как и оригинальный детектор Super-Kamiokande) с помощью новых фотоумножителей в 2005-06 годах, после аварии 2001 года. На рис. 10 показана схема эксперимента T2K в целом.

В ближнем детекторе, расположенном на расстоянии 280 м от про-



Рис. 10: Схема прохождения нейтрино от возникновения в J-PARC через ближние детекторы (зеленая точка), которые используются для определения свойств нейтринного пучка, а затем спустя 295 км под главным островом Японии до Супер-Камиоканде (синяя точка).

изводства пучка, расположены как осевые, так и внеосевые детекторы. Осевой детектор (INGRID), состоящий из массива блоков из железа/сцинтиллятора, измеряет направление и профиль пучка нейтрино. Детектор с осью вращения, погруженный в магнитное поле, измеряет поток нейтрино и энергетический спектр, а также внутреннее загрязнение электроного нейтрино в пучке в направлении дальнего детектора. Эти измерения необходимы для того, чтобы охарактеризовать сигналы и фон, которые наблюдаются в дальнем детекторе Super-Kamiokande.

Дальний детектор, Super-Kamiokande, расположен в шахте Мозуми Горно-металлургической компании Катioka, недалеко от деревни Хигаси-Мозуми, Гифу, Япония. Полость детектора находится под пиком горы Икэнояма, с 1000 м породы, что эквивалентно 2700 метрам воды. Это водный Черенковский детектор, состоящий из сварного резервуара из нержавеюцей стали диаметром 39 м и высотой 42 м, общей вместимостью 50 000 тонн. Детектор содержит около 13 000 фотоумножительных трубок (ФЭУ), которые отображают нейтринные взаимодействия в чистой воде. Супер-Камиоканде работает с 1996 года и имеет четыре отличительных периода бега. Последний период, SKIVE, работает стабильно и оснащен модернизированной электроникой считывания РМТ.

3.2. Ускоритель J-PARC

Ускоритель J-PARC, недавно построенный в Токае, Ибараки, состоит из трех ускорителей: линейного ускорителя (LINAC), синхротрона с быстрым циклом (RCS) и синхротрона с основным кольцом (MR). H^- пучок ускоряется до 400 МэВ с помощью LINAC и преобразуется в пучок H^+ с помощью фольги для снятия заряда при впрыске RCS. Пучок ускоряется до 3 ГэВ с помощью RCS с частотой 25 Гц. Гармоническое число RCS равно двум, и в цикле есть два скачка. Пучок протонов, вводимый в MR, ускоряется до 30 ГэВ. Гармоническое число MR-девять, а количество сгибаний в MR – восемь (шесть до июня 2010 года). В MR есть две

точки извлечения: медленное извлечение для адронного луча и быстрое извлечение для нейтринного луча. В режиме быстрой экстракции восемь циркулирующих протонных пучков извлекаются в течение одного оборота набором из пяти кикермагнитов. Временная структура извлеченного протонного пучка является ключом к различению различных фонов, включая космические лучи, в различных детекторах нейтрино.

Каждый луч протонного пучка состоит из восьми пучков протонов, проходящих от MR до линии пучка нейтрино T2K, которая производит пучок нейтрино.Нейтринная линия пучка состоит из двух последовательных секций: первичной и вторичной линий пучка. В первичной линии луча извлеченный протонный пучок транспортируется в направлении Камиоки. Во вторичной линии луча протонный пучок сталкивается с мишенью, образуя вторичные пионы, которые фокусируются магнитными рогами и распадаются на нейтрино. Обзор пучка нейтрино показан на рис. 11.



Рис. 11: Обзор нейтринного луча Т2К.

Основная линия луча состоит из секции подготовки(длиной 54 м), секции дуги (147 м) и секции окончательной фокусировки (37 м). В подготовительной секции извлеченный протонный пучок настраивается с помощью серии из 11 нормальных проводящих магнитов (четырехстепенных, двух дипольных и пяти квадрупольных магнитов), чтобы луч мог быть принят дуговой секцией. В дуговом сечении луч изгибается в направлении Камиоки на 80, 7° с радиусом кривизны 104 м с использованием 14 дублетов сверхпроводящих комбинированных функциональных магнитов (SCFMs). Есть также три пары горизонтальных и вертикальных сверхпроводящих магнитов для коррекции орбиты луча. В заключительной секции фокусировки десять нормальных проводящих магнитов (четыре рулевых, двухполюсных и четыре квадрупольных магнита) направляют и фокусируют луч на цель,направляя луч вниз на 3,637° по отношению к горизонтали. Хорошо настроенный протонный пучок необходим для стабильного производства нейтринного пучка и минимизации потерь пучка для достижения работы пучка высокой мощности. Таким образом, интенсивность, положение,профиль и потери протонного пучка в первичных секциях точно контролируются пятью трансформаторами тока (CTs), 21 электростатическим монитором (ESMs), 19 сегментированными вторичными эмиссионными мониторами (SSEMs) и 50 мониторами потерь пучка (BLMs) соответственно. Фотографии мониторов показаны на рис. 12. Полиимидные кабели и керамические проходы используются для лучевых мониторов из-за их радиационной стойкости.

Балочная труба поддерживается при 3×10^{-6} Па с помощью ионных насосов, чтобы быть соединенной с балочной трубой MR и уменьшить тепловую нагрузку на SCFMs. Нисходящий конец лучевой трубки соединен со "стеком мониторов": вакуумным сосудом высотой 5 м, встроенным в стенку толщиной 70 см между первичной и вторичной лучевой линией. Большинство ESM и SSEM установлены в стеке мониторов. Из-за высокого уровня остаточного излучения стек мониторов оснащен системой дистанционного управления для мониторов.



Рис. 12: Фотографии основных мониторов линии луча. Верхний левый: СТ. Верхний правый: ESM. Нижний левый: SSEM. Нижний правый: BLM.

Протоны от первичной линии луча направляются к цели через окно луча. Вторичная линия луча состоит из трех секций: целевой станции, объема затухания и сброса луча. Установка мишени содержит: дефлектор, который является коллиматором для защиты магнитных рожков; монитор оптического переходного излучения (OTR), контролирующий профиль протонного пучка непосредственно перед мишенью; устройство для генерации вторичных пионов; и три магнитных рожка, возбуждаемых импульсом тока 250 кА (рассчитанным на до 320 кА), чтобы сфокусировать пионы. Образующиеся пионы попадают в объем распада и распадаются в основном на мюоны и мюонные нейтрино. Все адроны, а также мюоны ниже 5 ГэВ/с останавливаются сбросом луча. Нейтрино проходят через свалку пучка и используются для физических экспериментов. Любые мюоны выше 5 ГэВ/с, которые также проходят через дамп пучка, контролируются для характеристики пучка нейтрино.

3.3. Ближний комплекс детекторов ND280

Как указывалось ранее, эксперимент T2K изучает колебания внеосевого пучка мюонных нейтрино между комплексом ускорителей J-PARC и детектором Super-Kamiokande, уделяя особое внимание измерению неизвестного угла смещения θ_{13} при наблюдении субдоминантных $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ осцилляций. Спектр нейтринных энергий энергии, содержание различных ароматов измеряются набором детекторов, расположенных на расстоянии 280 м от производственной мишени, и используются для прогнозирования взаимодействия нейтрино в Super-Kamiokande.

Основным детектором на участке 280 м является намагниченный внеосевой детектор слежения. Внеосевые детекторные элементы находятся внутри магнита, переработанного из эксперимента UA1 в ЦЕРНЕ. Внутри верхнего конца этого магнита расположен детектор pi-zero (POD), состоящий из отслеживающих плоскостей сцинтилляционных стержней, чередующихся с водной мишенью/латунной фольгой или свинцовым листом. Ниже по потоку от POD располагается трекер, состоящий из трех временных проекционных камер (ТРС) и двух мелкозернистых детекторов (FGDs), состоящих из слоев тонко сегментированных сцинтилляционных стержней, предназначен для измерения взаимодействия заряженных токов в FGDs. POD, TPC и FGDs окружены электромагнитным калориметром (ECal) для обнаружения рентгеновских лучей, которые не преобразуются во внутренних детекторах, в то время как возвратное ярмо магнита оснащено сцинтиллятором для измерения диапазонов мюонов, выходящих из сторон внеосевого детектора. В дополнение к внеосевому детектору отдельная матрица детекторов железа/сцинтиллятора, называемая INGRID, измеряет профиль пучка нейтрино на оси на участке 280 м, в то время как набор детекторов мюонного монитора, расположенный ниже по потоку контролирует направление и профиль пучка, обнаруживая мюоны высокой энергии из пиондекая. Все детекторы используют одно и то же соглашение о координатах: z вдоль номинальной оси нейтринного пучка, а х и у являются горизонтальными и вертикальными соответственно.



Рис. 13: Комплекс детекторов ND280. Внеосевой детектор и магнит расположены на верхнем уровне; горизонтальные модули INGRID расположены на уровне ниже; а вертикальные модули INGRID охватывают два нижних уровня.

Эти детекторы размещены в яме внутри зала ND280 (см. рис. 13). Яма имеет диаметр 17,5 м и глубину 37 м и имеет три этажа. На этаже В1, примерно на 24 м ниже поверхности, находится внеосевой детектор, который расположен на линии между целевой точкой и позицией Супер-Камиоканде. На служебной ступени глубиной около 33 м расположены горизонтальные модули детектора INGRID. Он также содержит электронику и часть аппаратного обеспечения для внеосевых детекторов. На этаже В2, глубиной около 37 м, расположены нижние модули вертикального детектора INGRID. Текущий угол отклонения от оси составляет 2, 5°, что соответствует экстраполированному лучу, проходящему на высоте около 1 м над уровнем обслуживания. Эта конструкция установки может выдерживать углы отклонения от оси в диапазоне от 2, 0 до $2, 5^{\circ}$, ограниченные требованием, чтобы ось луча проходила через центральную область детектора на оси. За пределами этой области измерение направления оси луча ухудшилось бы. Здание с внутренней площадью 21м × 28м покрывает яму и имеет 10-тонный кран.

3.4. Дальний детектор Super-Kamiokande

Самый большой в мире наземный детектор воды Черенкова, Super-Катіокапde, служит дальним детектором в эксперименте T2K. Детектор расположен в 295 км к западу от источника луча, где он используется для определения состава луча и поиска пояления нейтрино $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ и исчезновеняи мюонных нейтрино. Построенный в 1 км в центре горы Икэнояма, Супер-Камиоканде – это цилиндрическая пещера, заполненная 50-килотонной чистой водой, в которой примерно 13 000 фотоумножительных трубок детектора (PMT) отображают нейтринные взаимодействия. Super-Kamiokande работает с 1996 года и получил данные для ряда хорошо известных результатов, которые включают в себя ведущие в мире ограничения на время жизни протонов и измерение осцилляций в атмосферных, солнечных и ускорительных нейтрино.

Из-за длительной работы детектора поведение Супер-Камиоканде хорошо изучено. Калибровка энергетической шкалы известна на процентном уровне, и программное обеспечение для моделирования событий в детекторе также соответствует калибровочной выборке на процентном уровне.

Геометрия детектора Super-Kamiokande состоит из двух основных объемов, внутреннего и внешнего детектора, которые разделены цилиндрической конструкцией из нержавеющей стали. На рис. 14 приведена схема геометрии детектора Super-Kamiokande. Внутренний детектор (ID) представляет собой цилиндрическое пространство диаметром 33,8 м и высотой 36,2 м, в котором в настоящее время вдоль его внутренних стенок расположены 11 129 обращенных внутрь РМТ диаметром 50 см. Окружающий IDs внешний детектор (OD), представляющий собой цилиндрическое пространство толщиной около 2 м. Стенки OD диаметром 1885 мм состоят из обращенных наружу РМТ диаметром 20 см. Границы ID и OD определяются цилиндрической структурой шириной около 50 см. Эта конструкция состоит из бесстального стального каркаса, покрытого пластиковыми листами, которые служат для разделения ID и OD. Стена, обращенная к ID, облицована черным листом пластика, предназначенным для поглощения света и минимизации количества фотонов, которые либо рассеиваются от стены ID обратно в объем ID, либо проходят от ID к ОD. Однако стены, обращенные к ОD, облицованы высокоотражающим материалом Tyvek, чтобы компенсировать разреженные приборы OD. С помощью Tyvek фотоны отражаются от поверхности стенок OD и имеют более высокие шансы найти свой путь к одному из PM в OD. Наконец, внутри бесстального стального каркаса есть 50-сантиметровое "мертвое пространство" которое сочетает ID и OD, чтобы сделать СуперКамиоканде 39 м в диаметре и 42 м в высоту.



Рис. 14: Схема детектора Super-Kamiokande. Детектор в основном состоит из двух сегментов, внутреннего и внешнего детекторов. Граница между двумя сегментами определяется цилиндрическим каркасом, используемым для установки фотоумножительных трубок и оптического разделения сегментов.

ID хорошо инструментирован, с 40% - ным покрытием поверхности катода РМТ, так что имеется достаточное пространственное разрешение, чтобы вывести количество физических величин из изображенных взаимодействий нейтрино. ID выровнен с полусферическими РМТ Hamamatsu R3600, которые имеют комбинированную квантовую и коллекционную эффективность около 20%. Нейтринные взаимодействия часто порождают заряженные частицы, которые, если они превышают энергетический порог, создают конус черенковских фотонов, когда они пересекают воду. Когда фотоны достигают РМТ на стенках детектора, они создают кольцеобразный паттерн попадания, который используется для извлечения информации о взаимодействии, такой как положение вершины события и движение частиц продукта.

Основная стратегия T2K – измерения состава пучка нейтрино по ароматом в Супер-Камиоканде и, таким образом, получение осцилляции ν_{μ} в ν_{e} либо в ν_{τ} заключается в подсчете квазиупругих взаимодействий заряженного тока (ССQЕ) для мюонных и электронных нейтрино, оба из которых производят лептоны соответствующего аромата. Мюоны, подсчитанные для измерения их появления, чувствительны к изменениям их импульса из-за их относительно большой массы. В результате мюоны, проходящие через детектор, создают четко очерченный конус черенковского излучения, который приводит к четкому, резкому кольцу попаданий РМТ, видимых на стенке детектора. Напротив, электроны, используемые для поиска появления, рассеиваются легче из-за их меньшей массы и почти

всегда вызывают электромагнитные ливни при энергиях, соответствующих Суперкамиоканде. Результатом электронно-индуцированного ливня является "нечеткий" кольцевой узор, наблюдаемый РМТ, который можно рассматривать как сумму многих перекрывающихся световых лучей Черенкова. Процедуры в программном обеспечении для реконструкции событий Super-Kamiokande используют это различие между четким и нечетким, чтобы определить, являются ли кольца, изображенные в детекторе, производными от мюоноподобных или электронноподобных частиц.

В отличие от ID, OD лишь скудно используется в соответствии со своим первоначальным назначением в качестве активного источника мюонов космических лучей и других фонов. Массив РМТ в OD, состоящий из 611 Hamamatsu R1408 РМТ и 1274 R5912 РМТ, обеспечивает почти 100%-ную эффективность отбраковки мюонов космических лучей. Однако, выбирая события, совпадающие с пучком Т2К, нейтринно-индуцированные события, освещающие OD, могут быть эффективно выбраны из фоновых событий. Из одних только соображений объема ожидается, что количество событий OD примерно равно количеству событий в идентификаторе. Однако из-за узкой геометрии OD и разреженного инструментария OD не имеет пространственного и временного разрешения, что предотвращает реконструкцию событий в OD. Тем не менее, OD предоставляет выборку событий, которые могут быть классифицированы на три типа: события, которые произвели свет только в OD; события, в которых освещены сегменты детектора и частицы, по-видимому, происходят из вершины взаимодействия внутри ID; и события, где оба сегмента освещены, но частицы, похоже, происходят из вершины взаимодействия за пределами идентификатора. Детектор калибруется с помощью ряда источников, как от введенного лазерного излучения, так и от частиц космических лучей.

4. Проект Р2О

4.1. Общее описание проекта

Наиболее амбициозным проектом, предложенным на сегодняшний день, является проект P2O (Protvino to ORCA). В нем планируется направить пучок нейтрино из ускорительного комплекса в Протвино (Московская Область) на детектор KM3NeT/ORCA, который расположен в Средиземном море в 40км от побережья Франции (рис. 15).

Длинна составит ≈ 2595 километров, а самая глубокая точка находится на глубине 135 километров ниже уровня моря. Благодаря своей базовой линии в 2595 км такой эксперимент дал бы беспрецедентную



Рис. 15: Расстояние, которое пройдёт нейтринный пучок из Протвино (справа сверху) до ORCA(слева снизу).

чувствительность к эффекту материи, что позволило бы с высокой степенью достоверности определить порядок масс нейтрино после всего лишь нескольких лет работы при скромной интенсивности пучка ≈ 90 кВт. В то же время может быть получена достаточная чувствительность к нарушению δ_{cp} -фазы. Второй этап эксперимента, включающий дальнейшее повышение интенсивности ускорительного комплекса и значительное уплотнение детектора ORCA, позволит проводить высокоточные измерения фазы СР, конкурентоспособные и дополняющие другие запланированные и проводящиеся на данный момент эксперименты. Научный потенциал эксперимента Р2О представлен с акцентом на чувствительность к СР-нарушающей фазе Дирака δ_{cp} и иерархии масс. Утверждается, что благодаря длинной базовой линии (2595 км) и 8-мегатонному чувствительному объёму дальнего детектора Р2О будет дополнять и конкурировать с такими экспериментами, как Т2К в Японии (базовая линия 295км), NOvA в США (базовая линия 810км) и DUNE (базовая линия 1300км), также в CIIIA.

Предлагается видение долгосрочного будущего P2O, включая модернизацию ускорительного комплекса Протвино и детектора ORCA. Кроме того, предлагается программа исследований нейтрино с короткой базой, которая включает в себя исследования нейтрино-нуклонных взаимодействий, а также поиск явлений за пределами Стандартной модели. Вероятно, потребуется провести несколько экспериментов с различными исходными линиями, чтобы чётко отделить эффекты от различных слабо ограниченных параметров, таких как фаза СР-нарушения, массовая иерархия и октант угла смешивания θ_{23} . Кроме того, любое новое значительное экспериментальное открытие должно быть независимо проверено, в идеале с помощью эксперимента, который не разделяет те же систематические неопределённости измерений. В связи с этим построение нескольких экспериментов с различными исходными линиями, как правило, хорошо мотивировано.

4.2. Ускоритель в Протвино



Рис. 16: Схематический вид ускорительного комплекса в Протвино.

Ускорительный комплекс Протвино (рис. 16) располагается по координатам $54^{\circ}52'N37^{\circ}11'E$, примерно в 100 км к югу от Москвы, Россия. Его основным компонентом является синхротрон U-70, радиусом 1.5 км, который разгоняет протоны до 70 ГэВ. U-70 был построен в 1960-х годах и с тех пор регулярно эксплуатируется. Цепь инжекции протонов включает в себя источник ионов, линейный ускоритель на 30 МэВ и ускоритель на 1.5 ГэВ. Цепь ускорителя эксплуатируется на энергии луча от 50 ГэВ до 70 ГэВ, с интенсивностью протона до 1.5×10^{13} протонов за цикл. Выделенный нейтринный луч подавал пучок нейтрино в пузырьковую камеру SKAT (1974-1992)[29], спектрометр искровой камеры ITEP-IHEP[30], нейтринный детектор IHEP-JINR (1989-1995, 2002-2006)[31] и другие эксперименты. Результаты этих экспериментов включают измерения поперечного сечения нейтрино-нуклонов и ограничения на параметры колебаний $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$. Благодаря стальным мюонным поглотителям, предотвращающим распад мюонов в полете, и перестраиваемому спектру пучка с помощью активных линз можно обеспечить пучок мюонных нейтрино высокой чистоты. В настоящее время нейтринный канал не функционирует, и его активные компоненты, если они будут использоваться вновь, потребуют ремонта. Между тем остальная часть ускорительного комплекса U-70 находится в хорошем рабочем состоянии. Комплекс эксплуатируется Институтом физики высоких энергий (ИФВЭ), входящим в состав Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". Синхротрон U-70 по заведённому порядку работает с усреднённой по времени мощностью луча



Рис. 17: Вид сверху и вид в разрезе предполагаемого прохода пучка

до 15 кВт.

В 1990-х годах на IHEP рассматривалась новая схема введения протонов, которая позволила бы увеличить интенсивность пучка до 5 × 10¹³ протонов за цикл[32]. Вместе с сокращением цикла до 7 секунд это обеспечит мощность луча 75кВт. После некоторых более точечных улучшений, мощность пучка в 90 кВт может быть достигнута. Если предположить, что ускоритель работает по нейтринной программе с эффективностью 60% в течение 6 месяцев в году, то один год пучка мощностью 90 кВт соответствует $\simeq 0.8 \times 10^{20}$ протонов на мишени.

Начальный состав и энергетический спектр нейтринного пучка должен контролироваться ближним детектором, который должен быть построен в нескольких сотнях метров ниже по течению от цели протонного пучка(рис. 17). Тот же самый пучок нейтрино и установка вблизи детектора также позволят проводить исследования в области нейтрино-нуклонных сечений. Также возможен эксперимент по поиску стерильных нейтрино с короткой базой.

Для проведения эксперимента с длинной базой Р2О луч должен быть выровнен по направлению к расположению ORCA, под углом наклона 11.8°



Рис. 18: Смоделированный спектр нейтринных пучков направленных на ORCA в режиме работы нейтрино (слева) и антинейтрино (справа). Нормированно на значение 4 × 10²⁰ протонов на мишень, что соответствует 1 году работы пучка мощностью 450кВт, или 5 годам работы с мощностью пучка 90кВт[1].

(206 мрад) к уровню горизонта. Самым длинным участком линии луча является труба распада. В базовой конструкции мишень расположена на глубине $\simeq 30$ м под уровнем земли, длина распадной трубы $\simeq 180$ м (при условии оптимизации), зал поглотителя $\simeq 63$ м ниже уровня земли, а ближний зал детектора $\simeq 90$ м ниже уровня земли. Магнитные рожки позволят с помощью изменения полярности электрического тока выбрать между режимом нейтрино и антинейтрино. Имитационное исследование предложенного пучка предполагает, что пучок мюонных нейтрино с 98% - ной чистотой может быть получен с использованием протонного пучка 70 ГэВ, с плато в распределении энергии нейтрино между 2 ГэВ и 7 ГэВ (рис. 18)[1]. В режиме антинейтрино может быть получен пучок антинейтрино с чистотой 94%[33]. По сравнению со старым нейтринным излучателем, ранее работавшим в Протвино, новая конструкция излучателя представляет следующие новые задачи:

- необходимость более высокой интенсивности излучения;
- построение излучателя в наклонном туннеле.

Эти проблемы должны быть рассмотрены в специальном исследовании.

4.3. Детектор ORCA

ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) - один из двух нейтринных детекторов, строящихся в сотрудничестве с KM3NeT[34]. Он



Рис. 19: Схематический вид детектора KM3NET/ORCA

расположен в 42°48′N06°02'E, примерно в 40 км от побережья Тулона, Франция, на глубине между 2450 м (глубина морского дна) и 2250 м. По завершении ORCA будет состоять из 2070 цифровых оптических модулей (DOMs), установленных на 115 вертикальных струнах (блоки обнаружения, DUs) (рис. 192221). С 9м по вертикали расстояние между DOMs и \simeq 20 м горизонтальное расстояние между DUs, детектор "вмещает в себя"в общей сложности 8 мегатонн морской воды.



Рис. 20: Фотография распределительной коробки KM3NeT-France (слева). Схема подключения к распределительной коробке (справа).

Питание/данные передаются в/из инфраструктуры по двум основным оптико-электрическим кабелям, состоящим из 36/48 оптических волокон и одного проводника питания (возврат осуществляется через море). Струны соединены с пятью распределительными коробками (рис. 20, слева), расположенный на периферии массива. Каждая распределительная коробка имеет восемь разъёмов, каждый из которых может питать четыре последовательные цепочки (рис. 20, справа). Некоторые цепи включают блоки калибровки, которые включают лазер и/или акустические излучатели гидрофона. В базовой конструкции пять разъёмов на распределительной коробке предназначены для нейтринной решётки, один - для датчиков науки о Земле и Море, а два - запасные. Подводное соединение струн с распределительной коробкой осуществляется через соединительные кабели, идущие вдоль морского дна. Для конфигурации ORCA среднее горизонтальное расстояние между строками обнаружения составляет около 20 м.



Рис. 21: Схема струны детектора ORCA (слева) и оптический модуль, закреплённый на струне (справа).

Из-за более короткого расстояния передачи, участвующего в конфигурации ORCA, мощность передаётся переменным током. Электроподстанция, рассчитанная на один строительный блок (92 KB переменного тока), расположена на берегу главного кабеля недалеко от пляжа "Les Sablettes". Питание передаётся через 3500 В переменного тока. Оффшорные распределительные коробки используют трансформатор переменного тока, чтобы преобразовать это число до 400 В переменного тока для передачи по кабелю на струны. Диспетчерский пункт расположен в Институте Мишель Паша, Ла-Сейн-сюр-Мер, и принимает электронику сбора данных и вычислительную ферму, используемую для фильтрации данных. В декабре 2014 года Orange Marine успешно развернула первый основной оптико-электрический кабель. Первая распределительная коробка была подключена весной 2015 года.



Рис. 22: Среднее расстояние между отдельными струнами детектора ORCA составляет 20 метров в горизонтальной плоскости и 9 метров по вертикали. Эффективный объём детектора составляет $3.6 \times 10^6 \text{м}^3$.

Нейтринный детектор ORCA расположен на глубине около 3км. Подобная глубина расположения нейтринных детекторов обусловлена необходимостью избавиться от фона атмосферных мюонов и нейтрино. Несмотря на подобный подход часть фона все равно остаётся, и для отсеивания подобных фоновых событий используется специальное программное обеспечение.

ORCA оптимизирована для исследования осцилляций атмосферных нейтрино в диапазоне энергий от 2 ГэВ до 30 ГэВ с основной целью определения упорядочения нейтринной массы. Большинство нейтринных событий, наблюдаемых ORCA, будет происходить от взаимодействия электронного и мюонного нейтрино и антинейтринного заряженного тока (CC), в то время как взаимодействия тау-нейтрино и нейтрального тока (NC) составляют незначительные фоны (7% и 11% от общей количества нейтрино, соответственно, для ν_{τ} CC и всех ароматов NC).

Исследования, проведённые KM3NeT Collaboration, показывают, что при $E_{\nu} = 5\Gamma$ эВ большинство (> 50%) событий мюонного нейтрино CC, обнаруженных ORCA, могут быть правильно идентифицированы как мюонные нейтрино, в то время как менее 15% событий электронного нейтрино CC ошибочно идентифицированы как мюонные нейтрино. ORCA обеспечит разрешение энергии нейтрино $\simeq 30\%$ и разрешение зенитного угла $\simeq 7$ градусов при $E_{\nu} = 5\Gamma$ эВ. Результат со статистической значимостью 3σ по массовой иерархии ожидается после трёх лет сбора данных[34]. ORCA также обеспечит улучшенные измерения параметров атмосферных нейтринных осцилляций Δm_{32}^2 , θ_{23} и будет пытаться оценить унитарное смешивание трёх нейтрино, измеряя нормализацию потока ν_{τ} . Также будут изучены нестандартные нейтринные взаимодействия, а также астрофизические источники нейтрино, тёмная материя и другие физические явления. Строительство детектора недавно началось и, как ожидается, будет завершено в течение 4 лет.

5. Рассчет вероятностей нейтринных осцилляций

5.1. Модель PREM

Как уже было отмечено выше, вероятность нейтринных осцилляций зависит от плотности вещества, в котором распространяется пучок, и расстояния, которое проходит пучок. Поскольку рассматривается прохождение пучка через Землю, то в качестве меры длинны пути можно использовать азимутальный угол θ_z . В таком случае длину базовой линии можно рассчитать как $L = 2R_{Earth} \cos(\theta_z)$. В таком случае параметр $\cos(\theta_z)$ варьируется от -1 (пучок проходит через центр Земли насквозь по диаметру) до 0 (луч проходит касательно поверхности Земли).



Рис. 23: Распределение плотности вещества Земли в зависимости от радиуса, согласно модели PREM[35]

The Preliminary reference Earth model(PREM)[36] представляет собой одномерную модель, представляющую средние свойства Земли в зависимости от радиуса планеты. Она включает в себя таблицу свойств Земли, включая упругие свойства, затухание, плотность, давление и гравитацию, как функции от радиуса планеты. Для дальнейших расчётов будет использоваться именно PREM (рис. 23), с помощью неё определяя плотность каждого слоя, на котором будут рассчитываться вероятности осцилляций.

5.2. Программный пакет ROOT

ROOT[37] - это свободный модульный научный программный инструментарий. Он предоставляет все функциональные возможности, необходимые для обработки больших данных, статистического анализа, визуализации и хранения. Он в основном написан на C++, но интегрирован с другими языками, такими как Python и R. Частями абстрактной платформы являются:

- графический интерфейс пользователя,
- графический интерфейс разработки,
- скриптовый язык на основе C++,
- командный интерпретатор (CINT),
- система долговременного сохранения данных (persistence).

Пакеты, включённые в ROOT, содержат:

• средства для создания гистограмм и графиков функций для визуализации и анализа вероятностных распределений и функций;

- средства для четырёхвекторных вычислений (четырёхмерное пространство Минковского удобно применяется в физике высоких энергий);
- средства обработки изображений, используемые, например, для анализа астрономических снимков;
- инструменты распределённых вычислений, параллелизации обработки данных;
- средства геометрической 3D-визуализации;
- инструменты для создания файлов в различных графических форматах, таких как PostScript, JPEG, SVG;
- двусторонние интерфейсы к языкам Python и Ruby (возможности использования средств ROOT из кода на Python или Ruby и использование модулей, написанных на Python или Ruby, из ROOT);
- интерфейсы к Монте-Карло-генераторам событий физики элементарных частиц.

Все графики построены именно с помощью этого программного обеспечения.

5.3. Программный пакет GLoBES

GLoBES[38] - это свободный программный пакет для моделирования длиннобазных экспериментов по нейтринным осцилляциям. Этот программный пакет включает в себя:

- полное включение корреляций и вырождений в пространство параметров колебаний
- усовершенствованные процедуры для обработки произвольных систематических ошибок
- AEDL, абстрактный язык определения эксперимента обеспечивает простой способ определения экспериментальных установок
- определяемые пользователем приоритеты позволяют включать произвольную внешнюю физическую информацию
- интерфейс для моделирования нестандартной физики
- предопределённые установки имеющиеся для много экспериментов: бета лучи, фабрики нейтрино, реакторы, различные технологии детектора и т.д.

Также существует набор инструментов и дополнений, встраиваемых в GLoBES, которые решают общие проблемы, такие как поиск вырождения, моделирование новой физики и т.д.. Все моделирование произведено именно с помощью этого пакета.

5.4. Расширение snu

Расширение в виде независимого модуля для GLoBES, которое включает в себя до 6 видов стерильных нейтрино и нестандартные взаимодействия, влияющие на процессы производства, распространения и обнаружения как активных, так и стерильных нейтрино.

Этот програмный пакет предоставляет возможность задать собственный бекэнд для моделирования нестандартной физики. При этом нужно указать следующие параметры:

- количество нейтринных ароматов (должно быть ≥ 3)
- порядок превращений
- порядок фаз

Последние два параметра определяют как матрица смешения нейтрино U состоит из отдельных матриц вращения и какие из матриц вращения несут сложные фазы. Так

$$rotation_order = \{\{i_1, j_1\}, \{i_2, j_2\}, \dots\}$$
$$phase_order = \{k_1, k_2, \dots\}$$

означают

$$U = R(\theta i_2 j_2, \delta_{k_2}) R(\theta i_2 j_2, \delta_{k_2}) \cdots$$

, где

$$R(\theta i j, \delta_k) = \begin{pmatrix} , 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cos \theta_{ij} & \cdots & e^{i\delta_k} \sin \theta_{ij} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{-i\delta_k} \sin \theta_{ij} & \cdots & \cos \theta_{ij} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix},$$

– матрица поворота ij-сектора с комплексной фазой δ_k . Значения индексов i, j ограничены количеством ароматов нейтрино в рассматриваемой модели.

5.5. Моделирование нейтринных осцилляций

Для дальнейших расчётов использовались параметры осцилляций, полученные в [39], которые приведены в таблице 3. Тип иерархии собственных массовых состояний нейтрино может быть, как уже говорилось выше, нормальным (NH) или инверсным (IH). Значение Δm_{large}^2 связано с Δm_{ij}^2 следующим образом: $\Delta m_{large}^2 = \Delta m_{31}^2 - \Delta m_{21}^2/2$. Тогда для нормальной иерархии выбирается положительное значение Δm_{large}^2 , а для инверсной отрицательное.

| Величина | Тип иерархии | Значение |
|-----------------------|--------------|-------------------------------------|
| $\sin^2(\theta_{12})$ | NH/IH | 0.308 |
| $\sin^2(\theta_{13})$ | NH | 0.0234 |
| $\sin^2(\theta_{13})$ | IH | 0.024 |
| $\sin^2(\theta_{23})$ | NH | 0.437 |
| $\sin^2(\theta_{23})$ | IH | 0.455 |
| δ_{cp} | NH | 1.39π |
| δ_{cp} | IH | 1.31π |
| Δm_{21}^2 | $\rm NH/IH$ | $7.54 \times 10^{-5} \mathrm{sB}^2$ |
| Δm_{large}^2 | NH | $2.43 \times 10^{-3} \mathrm{sB}^2$ |
| Δm_{large}^2 | IH | $2.38\times10^{-3}\mathrm{sB}^2$ |

Таблица 3: Значения параметров нейтринных осцилляций[39].

Для моделирования осцилляций с четырьмя ароматами использовались параметры, оценненные в работе [24]. Они приведены в таблице 4. Моделирование производилось, как для нормальной, так и для инверсной иерархии. В раоте будет рассматриваться влияние нвоого аромата на исчезновение мюонного нейтрино, поэтому параметры отвественные за взаимодействия с другими ароматами считаются равными 0.

| Величина | Тип иерархии | Значение |
|-----------------------|--------------|-------------------------|
| $\sin^2(\theta_{14})$ | NH/IH | 0 |
| $\sin^2(\theta_{24})$ | NH/IH | 0.04 |
| $\sin^2(\theta_{34})$ | NH/IH | 0 |
| δ_{14} | NH/IH | 0 |
| δ_{24} | NH/IH | 0 |
| Δm_{14}^2 | NH/IH | 0.05 ə B^2 |

Таблица 4: Значения параметров нейтринных осцилляций для 4-ароматного взаимодействия [24].

Далее рассматриваются вероятности осцилляций в вакууме и веществе с пролётной базой в 295км, 810км и 2595км, для экспериментов T2K, NOvA и P2O соответсвенно, в зависимости от энергии. На каждом из восьми рисунков (26, 24, 25, 27, 29, 28, 30, 31) красным цветом изображена нормальная иерархия, а синим цветом изображена инверсная иерархия. Тонкой сплошной, тонкой пунктирной, жирной сплошной и жирной пунктирной обозначены случаи фазы СР-нарушения 0, 90, 180 и 270 градусов соответственно.

Прохождение нейтринного пучка от Протвино к детектору ORCA обеспечивает базовую линию в 2595 км, больше, чем любой нейтринный эксперимент ускорителя, который в настоящее время работает или планируется в другом месте. Это обеспечивает особенно ярко выраженное проявление эффектов материи 24с26с, которые не так заметны для эксперимента NOvA, и практически отсутсвуют для T2K. Первый максимум вероятности колебаний $P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e})$ находится при энергии нейтрино $E_{\nu} \simeq 5\Gamma$ эB, в диапазоне энергий, легко доступных для синхротрона U-70 и в номинальном диапазоне энергий ORCA.

В этом энергетическом режиме в поперечном сечении взаимодействия нейтрино преобладает глубокое неупругое рассеяние, которое относительно хорошо описано теоретически (по сравнению с резонансными взаимодействиями, которые доминируют при энергиях $E_{\nu} \simeq 2 - 3\Gamma$ эВ), что облегчает высокоточные измерения нейтринных осцилляций. При этом, недавнее исследование MINER ν A сообщило о 10% неопределённости для общего сечения нейтрино при 2,5 ГэВ и 5% неопределённости при 5 ГэВ [40]. При этом длинна базовой линии в 2595 км хорошо подходит для исследования CP-нарушения фазы Дирака δ_{cp} , а также для измерения резонансного эффекта вещества ($E_{res} = 4\Gamma$ эВ для земной коры)[41][42].

Стоит отметить, что численно различия между вероятностью осцилляций $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ и $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (рис. 2625 проявляются лишь для значения δ_{cp} в 90 и 270 градусов. При этом значения, которые наблюдаются для осцилляций из мюонного аромата в электронный при 90 градусах δ_{cp} , соответствуют 270 градусам δ_{cp} для осцилляций из электронного аромата в мюонный. Это объясняется пропорциональностью вероятности данных осцилляций $\sin(\delta_{cp})$.

Эффекты вещества, массовой иерархии и δ_{cp} наиболее выражены в канале появления ν_e (рис. 26). Большой измеряемый объем ORCA, 8 миллионов кубических метров, позволит обнаруживать тысячи нейтринных событий в год, даже при относительно скромной мощности пучка ускорителя. Предварительное исследование научного потенциала эксперимента P2O[43][44] предполагает, что порядок масс нейтрино может быть определён со статистической значимостью 4-8 σ после одного года работы с пучком мощностью 450 кВт или через пять лет с пучком мощностью 90 кВт. Это обеспечило бы твёрдое подтверждение результата $\simeq 3 - 5\sigma$, который, как ожидается, будет достигнут в ближайшие годы ORCA с использованием



Рис. 24: Вероятность осцилляций $\mu \to e$ в вакууме

атмосферных нейтрино, NO
 $\nu{\rm A}$ с использованием ускорительных нейтрино и JUNO
[45] с использованием реакторных нейтрино.



Рис. 25: Вероятность осцилляций $e \to \mu$ внутри вещества



Рис. 26: Вероятность осцилляций $\mu \to e$ внутри вещества



Рис. 27: Вероятность осцилляций $e \to \mu$ в вакууме

Благодаря различным знакам V - слагаемым, связанным с эффектом вещества в 1011 вероятность осцилляций (и как следствие - число сигналь-



(c) P2O

Рис. 28: Вероятность осцилляций $e \to e$ в вакууме

ных событий) увеличивается для нейтрино и уменьшается для антинейтрино в при данных энергиях в случае нормальной иерархии. При рас-



Рис. 29: Вероятность осцилляций $e \to e$ внутри вещества

смотрении инверсной иерархии картина радикально меняется - увеличивается вероятность осцилляций для антинейтринного пучка и уменьшается для нейтринного. Возможность работы синхротрона U-70 в двух режимах работы - нейтринном и антинейтринном позволяет проводить измерения при энергии нейтрино $E_{\nu} \simeq 4\Gamma$ эВ, при попытке наблюдения нормальной иерархии нейтрино, а также на энергии антинейтрино $E_{\bar{\nu}} \simeq 5 - 6\Gamma$ эВ для случая инверсной иерархии. После предполагаемых модификаций детектора ORCA появится возможность осуществлять детектирование нейтрино с энергией, соответствующей второму максимуму вероятности осцилляций $E_{\nu} \simeq 1.8\Gamma$ эВ.

Диапазон энергий эксперимента NOvA позволяет с высокой точностью определить значение угла смешивания θ_{23} , который ответсвенен за исчезновение мюонных нейтрино в области энергий около 1.8 ГэВ.

Заметим, что при осцилляциях мюонных нейтрино в тот же аромат мы практически не наблюдаем различий между осцилляциями в вакууме и осцилляциями в веществе из-за того, что, если расписывать вероятность осцилляций, то видно, что одно слагаемое содержащее зависимость от вещества умножается на $\sin(2\theta_{13})$ и в этом случае θ_{13} близко к 0 градусам, поэтому влиянием этого слагаемого можно практически пренебречь.

Мы не видим на рис. 2931 зависимости от δ_{cp} , потому что при осцилляциях вероятность подавляется малыми $\sin(2\theta_{13})$ и отношением квадратов масс.

После 3 лет деятельности с мощностью пучка 450кВт, эксперимент P2O смог бы также обеспечить чувствительность до 3σ для того, чтобы обнаружить нарушение СР. В зависимости от истинного значения δ_{cp} точность 1σ для значения δ_{cp} составляет $20^{\circ} - 40^{\circ}$.

В то же время в зависимости от истинного значения Δm^2_{23} позволяет получить точность в 1σ для значений Δm^2_{23} порядка $\simeq 0.5 \times 10^{-3}$ в B^2 для 3 лет работы с мощностью пучка 450кВт.

5.6. Моделирование осцилляций с учетом 4-го аромата

Далее рассматриваются вероятности осцилляций в вакууме и веществе с пролётной базой в 295км, 810км и 2595км, для экспериментов T2K, NOvA и P2O соответсвенно, в зависимости от энергии, с учетом 4-го аромата. На каждом из рисунков (34, 35, 36) красным цветом изображена модель с 4-мя ароматами, а синим цветом изображена модель с 3-мя ароматами. Пунктирной и сплошной линиями обозначены инверсная и прямая иерар-



Рис. 30: Вероятность осцилляций $\mu \to \mu$ в вакууме

хии соотвественно. Для расчетов фаза нарушения δ_{cp} полагалась равной 180 градусам.



Рис. 31: Вероятность осцилляций $\mu \to \mu$ внутри вещества



(a) Чувствительность детектора ORCA после 3 лет работы в случае нормальной иерархии



(b) Чувствительность детектора ORCA после 3 лет работы в случае инверсной иерархии



Рис. 33: Чувствительность детектора после 3 лет работы в случае нормальной иерархии

Видно, что наличие 4-го аромата, может помешать правильной интерпретации полученного результата, поскольку вероятности для прямой модели с 4-мя ароматами совпадают с трёхароматной моделью для инверсной иерархии для эксперимента T2K 34.

В случае эксперимента NOvA наличие четвертого аромата может сместить пик наибольшей вероятности осцилляций приблезительно на 0.4 ГэВ



Рис. 34: Вероятности осцилляций для 4-х ароматов для эксперимента Т2К



Рис. 35: Вероятности осцилляций для 4-х ароматов для эксперимента NOvA

35, как для прямой так и для обратной иерархии, что приводит к меньшему количеству регстрируемых событий, чем ожидалось. Учитывая, что параметры осцилляций для 3-х ароматной модели все еще требуют уточнения, получение результатов эксперимента подходящих для 4-х ароматной модели могут также означать соответствие 3-х ароматной модели, но с другими значениями фазы δ_{cp} и углов смешивания.

В моделировании, полученном для эксперимента P2O, 4-й аромат может приводить к качественному изменению зависимости вероятности 36 от энергии и так же "пересекается"с 3-х ароматной моделью для значений $\delta_{cp} \simeq 90^{\circ}$. Это говорит о необходимости совокупного рассмотрения нескольких экспериментов, изучение светимости детекторов для различных энергий нейтринных пучков, а также различной линии пролета пучка, для оценки эффекта материи.



Рис. 36: Вероятности осцилляций для 4-х ароматов для эксперимента Р2О

5.7. Дальнейший план развития проекта Р2О

Высокоточные измерения с помощью Р2О потребуют точного знания поперечных сечений (анти)нейтрино в воде. До сих пор единственный экспериментальный результат по сечениям нейтрино на водной мишени был получен с экспериментом T2K[46] при средней энергии нейтрино ≃ 1 ГэВ. Дополнительные измерения, как представляется, необходимы как для улучшения моделей нейтрино-ядерных взаимодействий, так и для облегчения высокоточных исследований нейтринных осцилляций в Р2О. Ближний детектор Р2О может обеспечить измерение сечений нейтрино и антинейтрино с нуклонами на водной мишени при энергиях нейтрино от ~ 2 до 20 ГэВ.

Полученные данные поперечного сечения также помогут повысить точность измерений ORCA с использованием атмосферных нейтрино. Ближний детектор P2O может быть сконструирован таким образом, чтобы обеспечить возможность одновременных измерений поперечных сечений на двух или более различных ядерных объектах, например воде и углеродистом сцинтилляторе. Это позволило бы объективно сравнить различные материалы и, в конечном счёте, лучше понять физику рассеяния нейтрино на связанных в ядрах нуклонах. Программа измерения поперечного сечения могла бы быть дополнительно усовершенствована за счет проведения дополнительных специализированных экспериментов. В этом контексте стоит отметить, что существует сильная мотивация для создания нового эксперимента с использованием простейших мишеней, а именно водорода и/или дейтерия, в этом случае исследование нуклонов обособленно от соединений, которые возникают из-за ядерных эффектов в среде.

| Experiment | T2ł | K | T2HK | $NO\nu A$ | DUNE | P2O | |
|--|---------------|------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|----------------|
| Location | Japan | | Japan | USA | USA | Russia/Europe | |
| Status | operating | | proposed | operating | construction | proposed | |
| Accelerator facility | J-PARC | | J-PARC | Fermilab | Fermilab | Protvino | |
| Baseline | 295 km | | 295 km | 810 km | 1300 km | 2595 km | |
| Off-axis angle | 2.5° | | 2.5° | 0.8° | 0° | 0° | |
| 1-st max $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ | 0.6 G | eV | $0.6~{\rm GeV}$ | $1.6~{\rm GeV}$ | $2.4 {\rm GeV}$ | $4 {\rm GeV}$ | |
| Detector | Super | rK | HyperK | NOνA | DUNE | ORCA Super-ORCA | |
| Target material | pure water | | pure water | LS | liquid Ar | sea water | |
| Detector technology | Cherenkov | | Cherenkov | LS | TPC | Cł | nerenkov |
| Fiducial mass | 22 kt | | 186 kt | 14 kt | 40 kt | $8000 \ \mathrm{kt}$ | 4000 kt |
| Beam power | 500 kW | | 1300 kW | 700 kW | 2400 kW | $450~\mathrm{kW}$ | 450 kW |
| ν_e events per year (NO) | ~ 20 | | 230 | ~ 20 | 230 | 3500 | 3400 |
| $\bar{\nu}_e$ events per year (IO) | ~ 6 | | 165 | ~ 7 | 60 | 1200 | 1100 |
| NMO sensitivity ($\delta_{CP} = \pi/2$) | - | - | 4σ | 1 σ | 7σ | $>7~\sigma$ | $\gg 7 \sigma$ |
| CPV sensitivity ($\delta_{CP} = \pi/2$) | 1.5σ | 3σ | 8σ | 2σ | 7σ | 3σ | 9σ |
| 1σ error on δ_{CP} ($\delta_{CP} = \pi/2$) | | | 22° | | 11° | 30° | 8° |
| 1σ error on δ_{CP} ($\delta_{CP} = 0$) | | | 7° | | 6° | 15° | 10° |
| Year / data taking years | 2018 | 2026 | 10 yr | 2024 | 10 yr | 6 yr | 10 yr |

Рис. 37: Чувствительность нынешних и будущих длиннобазных ускорительных нейтринных экспериментов по поиску массовой иерархии нейтрино и лептонного СР нарушения. Все чувствительности приведены для случая нормального массового упорядочения. Для случая нормального массового упорядочения с использованием пучка положительной (отрицательной) полярности приведено ожидаемое число событий $\nu_{\mathbf{e}}(\bar{\nu}_{\mathbf{e}})$ в год[1].

Оценённая чувствительность Р2О к массовому упорядочению и нарушению СР сравнивается в [1] с чувствительностью некоторых предложенных и действующих в настоящее время экспериментов с длинной базой на рисунке 37. Стоит отметить, что как Т2К, так и NOvA опубликовали экспериментальные ограничения на массовую иерархию и нарушение СР[47][48], которые находятся в пределах статистической погрешности от значений чувствительности, приведённых на рисунке 37. Можно отметить, что чувствительность Р2О к массовой иерархии превышает чувствительность NOvA и конкурирует с чувствительностью DUNE. Стоит также обратить внимание, что Т2К имеет предельную чувствительность к массовому упорядочению из-за недостаточно длинной базовой линии. Чувствительность Р2О к нарушениям СР конкурирует с Т2К и NOvA и, в меньшей степени, с будущими экспериментами DUNE и T2HK. Оба T2K и NOvA чередуются между использованием положительной и отрицательной полярности пучка (ν и $\bar{\nu}$ мод), обе полярности обеспечивают чувствительность к δ_{cp} .

На базовой линии P2O, составляющей 2595 км, большая часть чувствительности к δ_{cp} исходит из одной полярности пучка: положительной

для случая нормальной массовой иерархии и отрицательной для случая инверсной массовой иерархии. По этой причине чувствительность Р2О к δ_{cp} была получена при условии фиксированной полярности пучка, выбранной в соответствии с массовым порядком. Стоит отметить, что луч положительной полярности мощностью 90 кВт будет производить ~ 4000 нейтринных событий в ORCA в год. В случае нормального массовой иерархии $\simeq 700$ из этих событий будет ν_e события. Для сравнения, эксперимент с DUNE, используя пучок 1,3 МВт в сочетании с детектором жидкого аргона 40 КТ на базовой линии 1300 км, обнаружит 230 ν_e событий в год. Комбинированный анализ атмосферных и ускорительных нейтринных данных, собранных ORCA, будет возможен, улучшая систематические неопределённости и вырождения параметров.

Порог низкой энергии KM3NeT/ORCA особенно хорошо подходит для ограничения моделей тёмной материи с низкой массой WIMP(слабо взаимодействующих массивных частиц). Все нейтринные ароматы могут быть использованы для таких исследований.

выводы

Подводя итоги данной работы, можно сказать, что были получены предварительные оценки для вероятностей нейтринных осцилляций и рассмотрены различные следствия из полученных распределений вероятностей, а также произведена оценка светимости детектора ORCA в эксперименте P2O. Дальнейшее развитие работы предполагает изучение состава пучка после взаимодействия с мишенью для двух различных различных режимов работы (с помощью программного пакета GEANT), а также получить оценку состава нейтринного пучка на выходе.

Из полученных в данной работе результатов можно получить следствия, иллюстрирующие особенности нейтринных осцилляций, но для получения практически значимых параметров чувствительности, числа событий, точности измерений, корреляций и вырождения осцилляционных параметров, требуется использование более сложных методов моделирования, включающих в себя параметры, связанные с интенсивностью и энергетическим спектром источника нейтрино, сечениями взаимодействия нейтрино с веществом для различных вариантов взаимодействия, кинематики реакций взаимодействия. Несомненно, вероятности осцилляций имеют вклад в практически интересные результаты, но в связи с вышеупомянутым рядом факторов, для значительно точного описания результатов экспериментов требуется дальнейшая деятельность в области моделирования, особенно учитывая такие принципиально не изученные области физики нейтрино, как нестандартные взаимодействия (NSI), стерильные нейтрино и нарушение когерентности, которые можно рассматривать с помощью инструментов моделирования осцилляционных нейтринных экспериментов.

Основываясь на сравнении результатов для различных моделей, можно сделать вывод, что одного эксперимента по изучению осцилляций может быть недостаточно, чтобы определить параметры осцилляций и иерархию масс, поскольку вероятности осцилляций для моделей с различным числом ароматов могут "накладываться" друг на друга, при различных осцилляционных парметров. Это говорит о необходимости совокупного рассмотрения нескольких экспериментов, изучение светимости детектора для различных энергий нейтринных пучков, а также различной линии пролета пучка.

Определение осцилляционных параметров имеет большое значение не только для дальнейших экспериментов, направленных на изучение астро-

физических объектов и нейтринных осцилляций, но и является ключевым требованием для проверки ряда закономерностей, не описываемых используемыми на настоящий момент моделями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] "Letter of Interest for a Neutrino Beam from Protvino to KM3NeT/ORCA 16 Feb 2019, arXiv:1902.06083
- [2] H. A. Bethe: Energy Production in Stars. Physical Review 55 (1939) 434–456
- [3] C. F. von Weizsäcker: Uber Elementumwandlungen im Innern der Sterne. Physikalische Zeitschrift 38 (1937) 176–191 und 39 (1938) 633–646.
- [4] Б. Понтекорво. Мезоний и антимезоний. Журнал экспериментальной и теоретической физики, Т.33, С.549—551 (1957)
- [5] Б. Понтекорво. Обратные β-процессы и несохранение лептонного заряда. Журнал экспериментальной и теоретической физики, Т.34, C.247—249 (1958)
- [6] Герштейн С С, Кузнецов Е П, Рябов В А "Природа массы нейтрино и нейтринные осцилляции "УФН 167 811–848 (1997).
- [7] Козлов Ю В, Мартемьянов В П, Мухин К Н "Проблема массы нейтрино в современной нейтринной физике"УФН 167 849–885 (1997).
- [8] Kobayashi M, Maskawa T Progr. Theoret. Phys. 49 652 (1973)
- [9] Neutrino oscillations and Non-Standard Interactions, 28th January 2018, arXiv:1710.09360v2 [hep-ph]
- [10] Герштейн С. С., Кузнецов Е. П., Рябов В. А., УФН, 167 (1997), 811
- [11] Mertens, S.; et al. (KATRIN Collaboration) (2015). "Status of the KATRIN Experiment and Prospects to Search for keV-mass Sterile Neutrinos in Tritium β -decay". Physics Procedia. 62: 267–273.
- Thümmler, T.; et al. (KATRIN collaboration) (2010). "Introduction to direct neutrino mass measurements and KATRIN". Nuclear Physics B: Proceedings Supplements. 229-232: 146.
- [13] C. Giganti, S. Lavignac, and M. Zito, "Neutrino oscillations: The rise of the PMNS paradigm, Progress in Particle and Nuclear Physics"98 (2018), arXiv:1710.00715 [hep-ph]

- [14] Heamin Ko, Myung-Ki Cheoun, Eunja Ha, Motohiko Kusakabe, Takehito Hayakawa, Hirokazu Sasaki, Toshitaka Kajino, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Mark D. Usang, Satoshi Chiba, Ko Nakamura, Alexey Tolstov, Ken'ichi Nomoto, Toshihiko Kawano, Grant J. Mathews "Neutrino self-interaction and MSW effects on the supernova neutrino-process" (2019) arXiv:1903.02086
- [15] Материалы семинар НИИЯФ МГУ 19 декабря 2017, Дмитрий Заборов, http://nuclphys.sinp.msu.ru/nseminar/19.12.17.pdf
- [16] A. Yu. Smirnov "The MSW effect and Matter Effects in Neutrino Oscillations"Phys.Scripta T121 (2005) 57-64, arXiv:hep-ph/0412391
- [17] J. Schechter and J. W. F. Valle, Phys. Rev. D24, 1883 (1981), Err. D25, 283 (1982).
- [18] L. Wolfenstein, Phys. Lett. **B107**, 77 (1981).
- [19] P. B. Pal and L. Wolfenstein, Phys. Rev. **D25**, 766 (1982).
- [20] B. Kayser, Phys. Rev. **D26**, 1662 (1982).
- [21] J. Schechter and J. W. F. Valle, Phys. Rev. **D25**, 2951 (1982).
- [22] "Sterile Neutrino Oscillations: The Global Picture" Joachim Kopp, Pedro A.N. Machado, Michele Maltoni, Thomas Schwetz JHEP 1305:050, 2013, arXiv:1303.3011
- [23] Harari, H., & Leurer, M. (1986). "Recommending a standard choice of Cabibbo angles and KM phases for any number of generations."Physics Letters B, 181(1-2), 123–128. doi:10.1016/0370-2693(86)91268-2
- [24] Daya Bay Collaboration, MINOS Collaboration, "Improved Constraints on Sterile Neutrino Mixing from DisappearanceSearches in the MINOS,MINOS+, Daya Bay, and Bugey-3 Experiments"physical review letters 125,071801 (2020)
- [25] S. Gariazzo, C. Giunti, M. Laveder, Y. F. Li, and E. M.Zavanin, J. Phys. G 43, 033001 (2016).
- [26] Jianming Bian, "The NOvA Experiment: Overview and Status 2013, arXiv:1309.7898
- [27] Gavin S. Davies, "NOvA: Present and Future 2011, arXiv:1110.0112
- [28] M. Apollonio, et al., Eur.Phys.J. C27 (2003) 331–374

- [29] V. V. Ammosov et al., "Study of neutrino interaction on bubble chamber SKAT"Phys. Elem. Part. Atom. Nucl. 23, 648 (1992) [Phys. Part. Nucl. 23, 283 (1992)].
- [30] A. P. Bougorsky et al., "Total cross sections for neutrino and antineutrino interactions in the energy range 3 30 GeV"Yad. Fiz. 28, 424 (1978) [Sov. J. Nucl. Phys. 28, 214 (1978)].
- [31] L. S. Barabash et al., "The IHEP–JINR neutrino detector at neutrino beams of the U–70 accelerator"Prib. Tekh. Eksp. 46, 20 (2003) [Instrum. Exp. Tech. 46, 300 (2003)].
- [32] V. I. Balbekov et al. (ed.), Acceleration-accumulative complex for energy of 3000 GeV (physics justification)"IHEP Preprint 93-27 (1993).
- [33] V. I. Garkusha, F. N. Novoskoltsev, and A. A. Sokolov, "Neutrino oscillation research using the U-70 accelerator complex"IHEP Preprint 2015-5 (2015).
- [34] S. Adri an-Mart inez et al. (KM3NeT Collaboration), "KM3NeT 2.0 -Letter of intent for ARCA and ORCA"J. Phys. G 43, 084001 (2016).
- [35] Е. А. Куров Магистерская диссертация "Возможности нейтринного телескопа KM3NeT по изучению осцилляций ускорительных нейтрино"(2018)
- [36] Dziewonski, Adam M.; Anderson, Don L. (June 1981). "Preliminary reference Earth model". Physics of the Earth and Planetary Interiors. 25 (4): 297–356. doi:10.1016/0031-9201(81)90046-7
- [37] https://root.cern/doc/master/index.html
- [38] https://www.mpi-hd.mpg.de/personalhomes/globes/ documentation.html
- [39] F. Capozzi et al., "Status of three-neutrino oscillation parameters, circa"2013. Phys. Rev. D 89, 093018 (2014), [arXiv:1312.2878 [hep-ph]]
- [40] L. Ren et al. (The MINERνA Collaboration), "Measurement of the antineutrino to neutrino charged-current interaction cross section ratio in MINERνA"Phys. Rev. D 95, 072009 (2017), Phys. Rev. D 97, 019902(E) (2018).
- [41] J. Brunner, "Measurement of neutrino oscillations with neutrino telescopes"Adv. High Energy Phys. 2013, 782538 (2013).

- [42] C. Lujan-Peschard, G. Pagliaroli, and F. Vissani, "Counting muons to probe the neutrino mass spectrum Eur. Phys. J. C 73, 2439 (2013).
- [43] D. Zaborov (for the KM3NeT Collaboration), "The KM3NeT Neutrino Telescope and the potential of a neutrino beam from Russia to the Mediterranean Sea"in Proc. of 18th Lomonosov conference on elementary particle physics, Moscow, Russia, August 24–30, 2017, arXiv:1803.08017 [hep-ex].
- [44] J. Brunner, "The physics potential of a neutrino beam from Protvino to ORCA in Proc. of XXVIII Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics ("Neutrino 2018"), June 4-9, 2018, Heidelberg, Germany, https://doi. org/10.5281/zenodo.1300743
- [45] F. An et al. (JUNO Collaboration), "Neutrino Physics with JUNO"J. Phys. G 43, 030401 (2016)
- [46] K. Abe et al. (The T2K Collaboration), "First measurement of the ν_{μ} charged-current cross section on a water target without pions in the final state"Phys. Rev. D **97**, 012001 (2018).
- [47] K. Abe et al. (The T2K Collaboration), "Search for CP violation in neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment with 2.2×10^{21} protons on target"Phys. Rev. Lett. **121**, 171802 (2018)
- [48] M. A. Acero et al. (The NO ν A Collaboration), "New constraints on oscillation parameters from ν_e appearance and ν_{μ} disappearance in the NO ν A experiment"Phys. Rev. D 98, 032012 (2018).