

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧЕРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет
Кафедра общей ядерной физики

КУРСОВАЯ РАБОТА

«Физические возможности современных нейтринных
длиннобазных экспериментов.»

Выполнил курсовую работу
_____ Шаяхметов Г. Э.
« ____ » _____ 2020 г.

Руководитель курсовой работы
_____ Широков Е. В.
« ____ » _____ 2020 г.

г.Москва 2020 г.

Оглавление

1. Введение	2
2. Что такое осцилляции нейтрино?.....	3
3. Эксперименты.....	6
3.1 Длиннобазные эксперименты первого поколения.....	6
3.2 Длиннобазные эксперименты второго поколения.....	6
3.3 Длиннобазные эксперименты третьего поколения.....	7
4. Эксперимент OPERA.....	10
4.1 Описание установки.....	10
4.2 Первый кандидат в ν_τ	12
4.3 Второй кандидат в ν_τ	13
5. Будущие эксперименты.....	15
5.1 Эксперимент DUNE.....	15
5.2 Эксперимент Hyper-Kamiokande	16
Список литературы.....	18

Глава 1

Введение

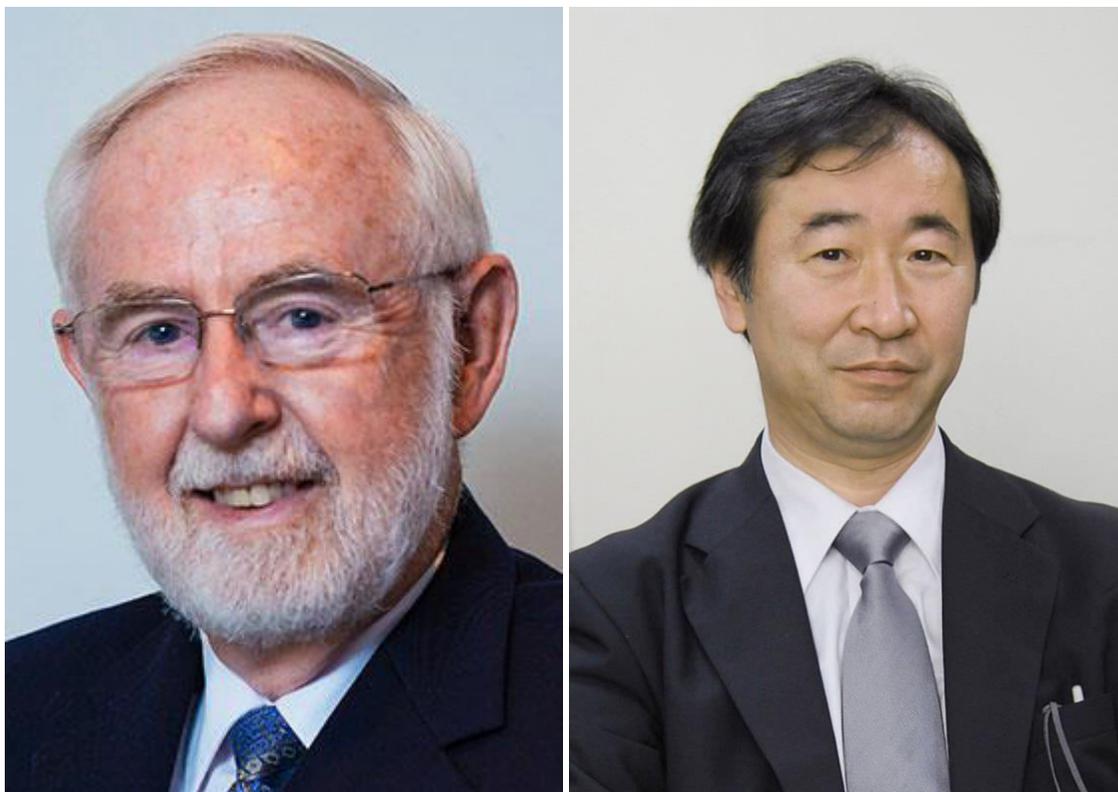
Эксперименты по изучению осцилляций нейтрино обычно делятся на короткобазные и длиннбазные. Для экспериментов с использованием ускорительных нейтрино в качестве источника, длинная базовая линия означает, что $E / L \simeq \Delta m^2 \sim 2,5 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$, где E и L - энергия нейтрино и дальность полета соответственно. В этой работе рассмотрены эксперименты по осцилляции нейтрино на ускорителях с длинной базой (LBL). Преимуществами таких экспериментов является прежде всего то, что можно чётко представлять содержание нейтрино определённого типа (как правило, мюонных) в первичном пучке и что за счёт длинной базы вероятность осцилляций становится довольно значительной.

Нейтринные пучки для LBL-экспериментов получены в «обычном» методе, когда высокоэнергетический протонный луч попадает в мишень, а образующиеся пионы затем распадаются в полете, давая мюонные нейтрино. Типичная энергия нейтрино, полученная таким образом, составляет 0,5–10 ГэВ, и это устанавливает необходимое расстояние до нейтринного детектора в несколько сотен километров, так что может быть исследовано влияние нейтринных осцилляций, обусловленное $\Delta m^2 \sim 2,5 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$.

Глава 2

Что такое осцилляции нейтрино?

Нобелевская премия по физике 2015 г. была присуждена А. Мак-Дональду и Т. Каджита «за открытие нейтринных осцилляций, демонстрирующих наличие у нейтрино массы». Чем так важно это явление, о котором говорят уже более полувека?



Артур Мак-Дональд и Такааки Каджита – нобелевские лауреаты 2015 г.

Нейтринные осцилляции – один из основных вопросов современной физики слабых взаимодействий. Нейтрино – незаряженные лептоны, т.е. частицы Стандартной Модели, не участвующие в сильном взаимодействии,

могут быть разделены на три типа (или, как говорят, три аромата), в соответствии с классификацией заряженных лептонов. Это электронные, мюонные и таонные нейтрино. Осцилляциями называются процессы превращения одного типа нейтрино в другое. Несмотря на то, что осцилляции были предсказаны Б.М. Понтекорво ещё в конце 50-х годов прошлого века, интерес к ним возник после экспериментов Р. Дэвиса по регистрации солнечных нейтрино, когда был обнаружен так называемый «дефицит солнечных нейтрино». Он состоит в том, что наблюдаемый поток солнечных нейтрино примерно вдвое меньше ожидаемого.

В самом деле, на Солнце, в соответствии со стандартной солнечной моделью, нейтрино в основном возникают в результате реакции протон-протонного цикла

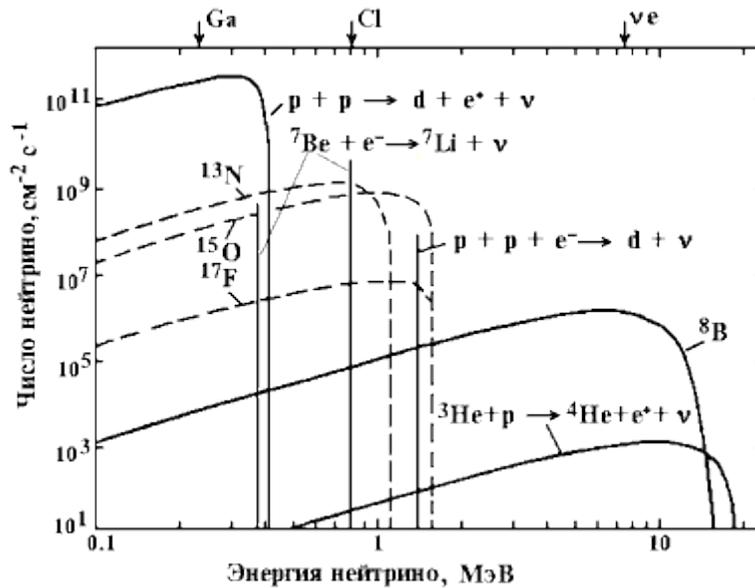
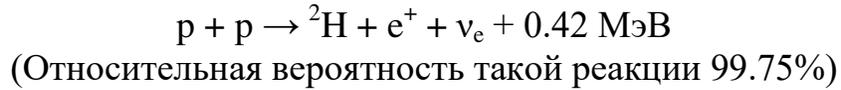
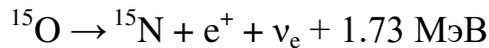
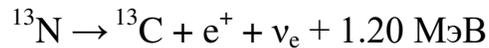


Рис.1 Спектр солнечных нейтрино

Главным источником высокоэнергетичных нейтрино на Солнце служат распады изотопов ${}^8\text{B}$, которые возникают в реакции ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ (редкой ветви протон - протонного цикла):



Далее по вероятности образования идут нейтрино CNO – цикла:



В настоящее время имеется несколько типов экспериментальных данных по регистрации различных групп солнечных нейтрино. В течение 30 лет ведутся радиохимические эксперименты на основе реакции ${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$. Согласно теории, основной вклад в эту реакцию должны внести нейтрино от распада ${}^8\text{B}$. Исследования по прямой регистрации нейтрино от распада ${}^8\text{B}$ с измерением энергии нейтрино выполняются с 1987 года. Во всех экспериментах наблюдается дефицит в потоках солнечных нейтрино по сравнению с предсказаниями стандартной солнечной модели.

Возможным решением проблемы дефицита солнечных нейтрино и являются нейтринные осцилляции – превращение электронных нейтрино в мюонные и тау-нейтрино. Связь с массой нейтрино заключается как раз в том, что в моделях нейтринных осцилляций изменяющейся (осциллирующей) компонентой является как раз масса нейтрино. Следовательно, если есть осцилляции, есть и ненулевая масса нейтрино.

Глава 3

Эксперименты.

3.1 Длиннобазные эксперименты первого поколения

Для этой цели были проведены три длительных базовых эксперимента на трех разных континентах: K2K в Японии и Minos в Штатах улучшили точность определения параметров атмосферного нейтрино, в то время как OPERA в CNGS установил процесс появления таонного нейтрино, что непосредственно помогло улучшить индикацию нейтрино у Super-Kamiokande. Тем временем улучшенный анализ Super-Kamiokande событий появления атмосферного нейтрино позволил обнаружить характерную черту осцилляций в распределении атмосферного нейтрино, что исключило такие экзотические варианты, как объяснение нейтринного дефицита в атмосфере.

3.2 Длиннобазные эксперименты второго поколения

После успеха первых проектов с длинной базой начались разработки так называемого “второго поколения” экспериментов. Оборудование на таких экспериментах было оптимизировано для обнаружения переходов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, что позволило проводить мощный поиск ненулевых значений θ_{13} и измерять порядок масс нейтрино. Эксперимент T2K в Японии начал сбор данных в 2009 году. Он впервые дал представление о ненулевом значении θ_{13} , обнаруженном в процессе появления нейтринных осцилляций. Было

опубликовано свидетельство о переходах $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и также повысилась точность измерения параметров атмосферного нейтрино. (Три угла смешивания θ_{12} , θ_{13} и θ_{23} лежат в диапазоне от 0 до $\pi / 2$ и описывают смешивание между тремя массовыми компонентами нейтрино) Значение θ_{13} впоследствии было точно измерено в реакторных экспериментах Daya Bay, Double Chooz и Reno. Прогресс за годы точности измерений по параметрам атмосферного нейтрино и θ_{13} показан на рис. 1. Эксперимент NOvA в Соединенных Штатах начал сбор данных в 2015 году и недавно сообщил об интересных результатах как в отношении появления $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ так и в исчезновении мюонного нейтрино.

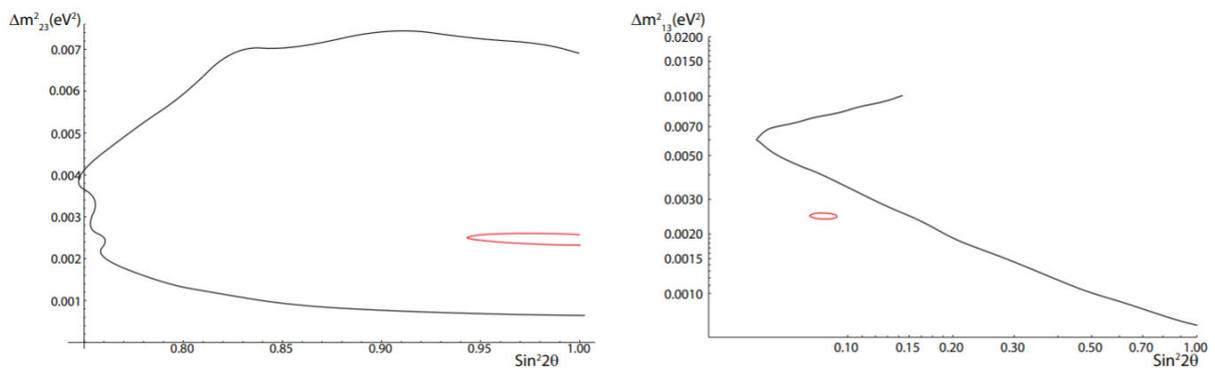


Рис. 1 Измерения параметров осцилляций атмосферного нейтрино. Слева - Super-Kamiokande. Справа - Double Chooz.

3.3 Длиннобазные эксперименты третьего поколения

В то время как Европа, следуя решениям ЦЕРНа и результатам исследования по разработке проекта Laguna, отказалась от любого плана строительства интенсивного источника нейтрино и гигантского подземного

детектора нейтрино (но некоторая активность все еще сохраняется), очень амбициозные планы существуют в Штатах (DUNE) и в Японии (Hyper-Kamiokande). Два предложения следуют очень различным экспериментальным стратегиям. В эксперименте DUNE используется очень длинная база в 1300 км и широкополосный осевой пучок нейтрино. В этой конфигурации он обладает хорошей чувствительностью к упорядочению масс нейтрино и может обнаруживать нейтринные события в диапазоне от второго осцилляционного максимума до энергий области выше порога массы тау-лептона. Технология с использованием жидкого аргона выглядит подходящей для обнаружения нейтринных событий в диапазоне от квазиупругого до крайне неупругого сечения, создавая события с различными топологиями.

Широкополосный пучок в любом случае “страдает” от больших фоновых скоростей от внутреннего загрязнения пучка ν_e и больших частот неосциллирующих событий, которые ставят под сомнение эффективность восстановления энергии детектора из жидкого аргона. Конфигурация Hyper-Kamiokande идентична конфигурации T2K: неосвеая, длинная база с пониженной чувствительностью к упорядочению масс нейтрино. Эта конфигурация оптимизирована для выявления нарушения CP симметрий (сохраняя как можно более низкую внутреннюю конфигурацию ν_e) и для водного черенковского детектора. Фактически, эти два подхода действительно дополняют друг друга, также учитывая потенциал физики астрочастиц в двух экспериментах, далее две экспериментальные установки будут обсуждаться более подробно.

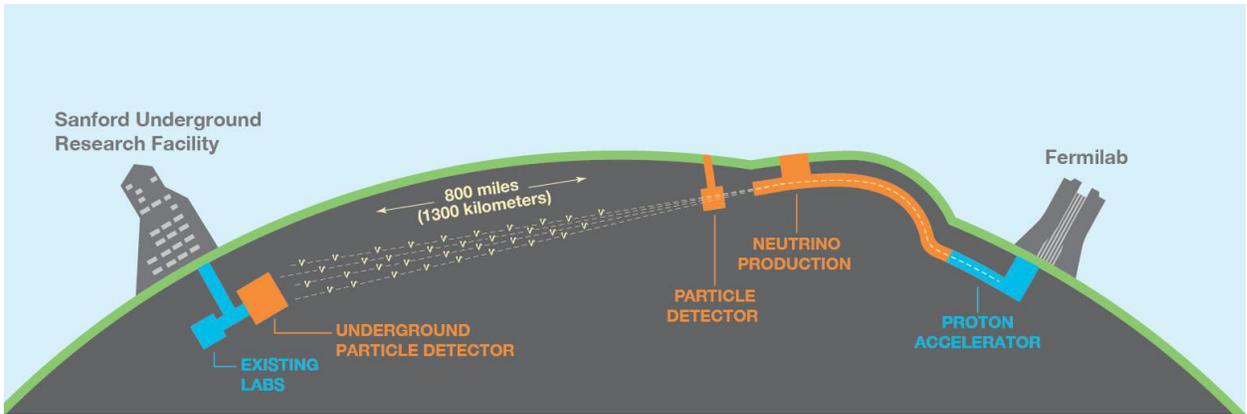


Рис. 2, Схема эксперимента DUNE

Глава 4

Эксперимент OPERA

4.1 Описание установки

Эксперимент OPERA начал сбор данных в 2008 году с целью сделать первое прямое наблюдение нейтринных осцилляций в канале $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$. Установка расположена около 2 км под землей, что позволяет сократить мюонный фон от космических лучей до 1 мюон/(м²×час). Сам детектор состоит из двух одинаковых супермодулей (SM). Каждый модуль состоит из трех частей: мишень и два боковых мюонных спектрометра (рис. 3)

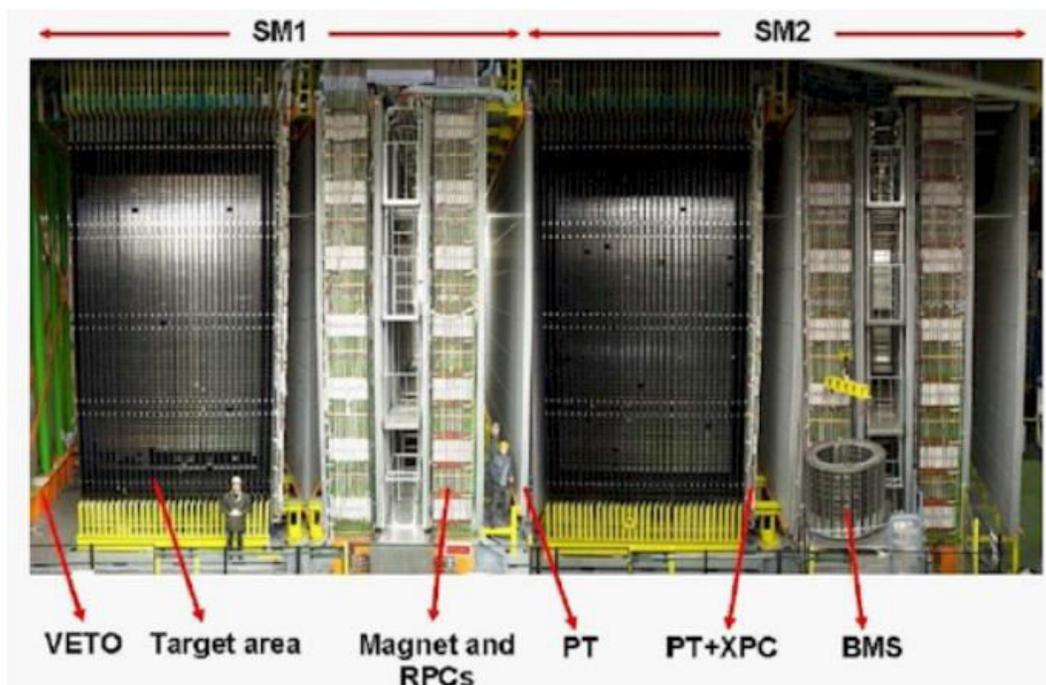
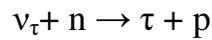


Рис. 3, схема экспериментальной установки

Обнаружение осцилляций происходит за счет того, что пока пучок нейтрино летит от ускорителя в ЦЕРНе до лаборатории Гран-Сассо в Италии,

в нем возникает примесь тау-нейтрино, которые затем попадают на детектор. И затем из-за взаимодействия с веществом мишени, каждая тау-нейтрино могут превратиться в τ (как показано ниже), но вероятность этого процесса крайне мала.



Далее τ распадается по каналам:

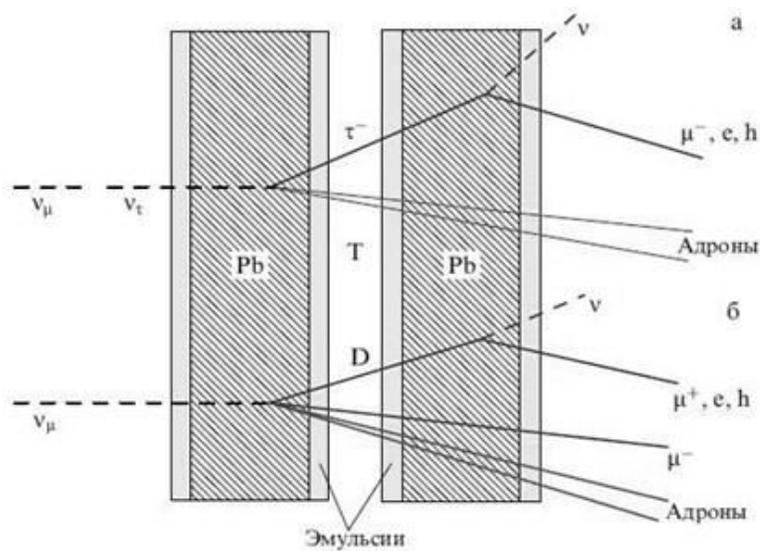
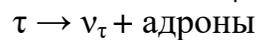
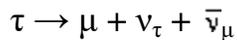


Рис. 4, Схема регистрации событий в детекторе OPERA

В данных, полученных с 2008 по 2010 и в части 2011 года наблюдались два события. Значимость полученных событий все еще оценивается. Предварительное ожидание составляет 2,1 события с появлением тау-нейтрино 0,2 фоновых события. Эксперимент OPERA также измеряет

скорость нейтрино благодаря своей длинной базе CNGS (длина которой составляет около 730 км). После корректировки и обновления своей системы синхронизации, она смогла подтвердить результаты, полученные из стандартных данных CNGS за 2009–2011 годы, с данными из двух отдельных группированных пучков, предварительно сформированных в 2011 году. Было установлено ограничение на скорость: $1,6 \times 10^{-6} < (v_\nu - c) / c < 2,3 \times 10^{-6}$, что не показало существенной разницы между скоростями нейтрино и антинейтрино и скоростью света. Стоит отметить, что в 2011 году ученые, работающие на эксперименте OPERA, обнаружили “сверхсветовое” нейтрино, но потом сами же опровергли эту информацию.

4.2 Первый кандидат в ν_τ

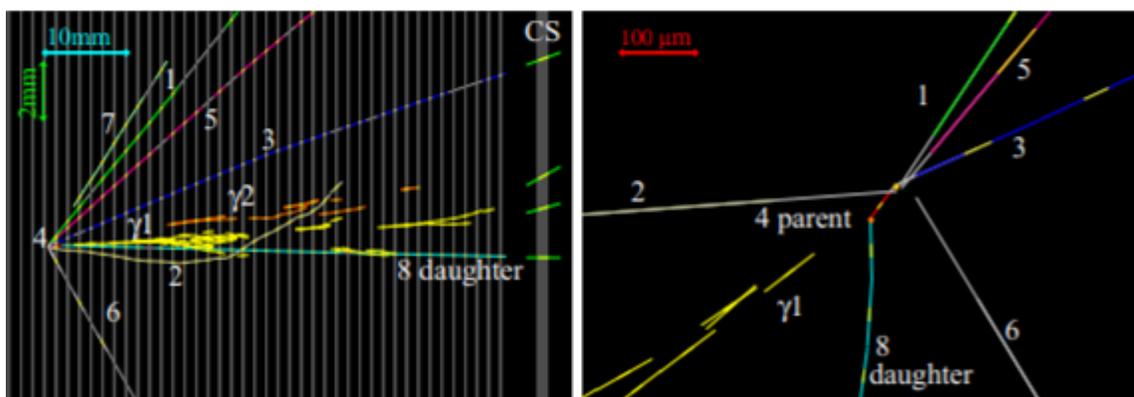


Рис. 5, Треки частиц первого события-кандидата в ν_τ

Первое событие-кандидат в ν_τ наблюдалось в наборе данных за 2008-2009 годы. Событие, показанное на рис. 5, имеет семь зубцов в первичной вершине; четыре из них происходят от адронов, три имеют вероятность менее чем 0,1% быть вызванными мюоном, и ни один из них не оставлен электроном. Родительская дорожка (обозначенная 4 и выделенная красным

цветом на рис. 5) имеет топологию изломов, а дочерняя дорожка идентифицируется как созданная адроном в результате его взаимодействия. Два гамма-луча (обозначены γ_1 и γ_2) испускаются из второй вершины с вероятностями большими чем 99% и 90% соответственно. Их суммарная энергия составляет $(120 \pm 20(\text{стат.}) \pm 35(\text{сист.})) \text{ МэВ/ } c^2$, что сравнимо с массой π^0 . Предполагая, что вторичный адрон является π^- , и добавив энергию двух γ -луча, масса инвариантного родителя совместима с массой ρ (770). Доля распада вида $\tau \rightarrow \rho \nu_\tau$ составляет 25%.

4.3 Второй кандидат в ν_τ

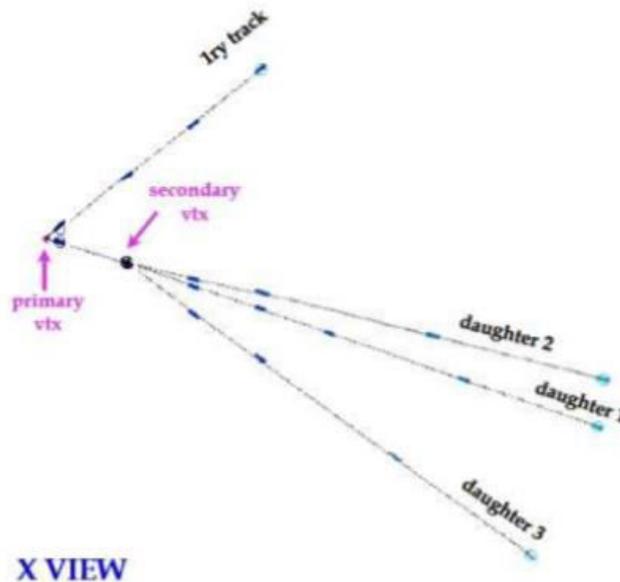


Рис. 6, Треки частиц второго события-кандидата в ν_τ

Второе событие-кандидат ν_τ было найдено в наборе данных 2011 года. Событие, показанное на рис. 6, представляет собой двузубчатое взаимодействие (слева) и короткой дорожки (именно там может быть возможный τ -лептон) с длиной полета 1,54 мм и дорожкой, идентифицированной как адрон. Исходный лептон распадается на три адрона

(показанных на рис. 6), один из которых реинтегрирует с образованием двух заряженных треков и четырех обратно рассеянных ядерных фрагментов. Импульс заряженного адрона в первичной вершине (слева) составляет около 2,8 ГэВ / с, и гипотеза мюона на основе согласованности между импульсом и дальностью крайне маловероятна. Все дочерние частицы, приходящие из вершины распада, также были идентифицированы как адроны. Кинематический анализ события удовлетворяет заданным критериям для канала распада $\tau \rightarrow 3h$.

Глава 5 Будущие эксперименты

5.1 Эксперимент DUNE

Финансируемая частично Министерством энергетики США (DOE) и ЦЕРНом для более глубокого понимания поведения физики элементарных частиц, на установке с длинными базовыми нейтрино, расположенной в Лиде, штат Южная Дакота, будет размещено самое большое в мире нейтринный детектор. Argon позволил Fermilab, одному из самых выдающихся исследовательских центров по физике высоких энергий в США, разработать подземную установку, в которой будет размещен эксперимент, известный как DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment).

DUNE предназначен для строительства в Сэнфордском подземном исследовательском центре в Южной Дакоте на глубине около 1500 м и на базовой линии в 1300 км от Fermilab, где будет производиться пучок нейтрино. На данный момент DUNE - это сотрудничество 776 физиков из 144 учреждений. Протонным драйвером линии нейтринного пучка будет PIP-II: с мощностью около 1,2 МВт к 2025 году, хотя ожидается, что он достигнет мощности свыше 2 МВт с PIP-III после фазы конструкторских работ. Базовая конструкция ближнего детектора представляет собой Fine-Grained Tracker в магнитном поле, дополненный EMR (Electron-Muon Ranger). Он будет расположен на расстоянии 574 м от цели, на глубине 65 м. Идентификатор дальнего детектора, предназначенный для набора из четырех детекторов, предполагает 10 кт жидкого аргона. Первый модуль жидкого аргона будет основан на однофазной технологии (аналог детектора "Icarus"). Необходимо решить, будут ли следующие модули будут однофазным или двухфазным, это будет сильно зависеть от текущих исследований и разработок,

поддерживаемых ЦЕРНом. Текущий график предусматривает начало сбора данных с первым модулем в 2025 году и полную конфигурацию, готовую к 2029 году.

5.2 Эксперимент Hyper-Kamiokande

Hyper-Kamiokande (НК) станет следующим поколением крупномасштабных водяных черенковских детекторов. Планируется, что он будет на порядок больше, чем его предшественник Super-Kamiokande (SK), с оптимальной конструкцией, состоящей из двух резервуаров, оснащенных фотодатчиками сверхвысокой чувствительности. Детектор Hyper-Kamiokande - это и «микроскоп», используемый для наблюдения элементарных частиц, а также «телескоп» для наблюдения Солнца и сверхновых звезд с использованием нейтрино.

Проект Hyper-Kamiokande имеет чрезвычайно богатое физическое портфолио, которое включает в себя изучение нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе, параметров смешивания нейтрино, атмосферных нейтрино и нейтрино астрономического происхождения. Проект поддерживается сообществами NEP и Cosmic Ray.

Hyper-Kamiokande предназначен для использования в качестве черенковского водяного детектора размером 0,99 Мт, состоящего из двух горизонтальных цилиндров диаметром 48 м и 53 м. длина. Базовым вариантом для фототрубок является так называемый Box & Line PMT, который имеет, по сравнению с фототрубками Super-Kamiokande, вдвое лучшее временное разрешение (1 нс против 2 нс) и лучшее разрешение

заряда одного электрона (35% против 53%). Луч будет тот же, что используется Т2К, предполагаемая мощность луча составляет 0,75 МВт. На сегодняшний день в проекте принимают участие 13 стран и около 240 сотрудников. Планировалось начать строительство в 2018 году, но даты постоянно переносили. На апрель 2020 года строительство не началось. Похоже, что начало сбора данных будет гораздо позже запланированного 2025 года.

Список литературы

- [1] Е.В. Широков. *Нейтринные осцилляции*. НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ, Москва, Россия.
- [2] Mauro Mezzetto. *Long Baseline Neutrino Experiments*. Национальный институт ядерной физики, Падуя, Италия.
- [3] G.J.Feldman, J.Hartnell, T.Kobayashi. *Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiments*
- [4] E. Medinaceli. *Status of the OPERA experiment*. Национальный институт ядерной физики, Падуя, Италия.
- [5] М.Б. Громов. *Эксперимент OPERA*. НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ, Москва, Россия.