

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

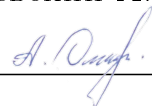
БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

«АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА NO $\nu$ A К  
ПОИСКУ СТЕРИЛЬНЫХ НЕЙТРИНО»


Выполнил студент  
409 группы  
Корсунов Владислав Андреевич

  
\_\_\_\_\_

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н., проф. Ольшевский А. Г.

  
\_\_\_\_\_

Научный консультант:  
Колупаева Л. Д.

  
\_\_\_\_\_

Допущен к защите  
Зав. кафедрой, академик РАН В. А. Матвеев

\_\_\_\_\_

МОСКВА

2020

# Содержание

Введение	2
1 Теория и принципы работы вспомогательного ПО	3
1.1 Основные свойства и история открытия нейтрино . . . . .	3
1.2 Экспериментальные указания на существование стерильных нейтрино . . . . .	4
1.3 Теория нейтринных осцилляций . . . . .	5
1.3.1 Схема $3+1$ . . . . .	5
1.3.2 Схема $3+2$ . . . . .	6
1.3.3 Эффект Михеева – Смирнова – Вольфенштейна . . . . .	7
1.4 Библиотека для подсчета вероятностей осцилляций $NO\nu A$ . . . . .	8
1.5 Эксперимент $NO\nu A$ . . . . .	8
2 Результаты	10
2.1 Параметры осцилляций для стерильного нейтрино схема $(3+1)$ .	10
2.2 Эффект Михеева – Смирнова – Вольфенштейна для стерильных нейтрино . . . . .	11
2.3 Результаты с учетом выбранных параметров осцилляций для схемы $3+1$ . . . . .	12
2.4 Параметры осцилляций для стерильного нейтрино схема $(3+2)$ .	19
2.5 Результаты с учетом выбранных параметров осцилляций для схемы $3+2$ . . . . .	19
Выводы	25
Список использованных источников	26
Приложение	28

# ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является определение чувствительности эксперимента NOvA к поиску стерильных нейтрино. В работе были построены графики вероятностей осцилляций для схем  $3+1$  и  $3+2$ , также был изучен МСВ - эффект для стерильных нейтрино. Проанализирована возможность наблюдать данные эффекты в ближнем и дальнем детекторах. Для реализации данной цели, использовалась библиотека для подсчета вероятностей осцилляций NOvA.

Изучение стерильных нейтрино является одним из важнейших направлений в физике, поскольку дает возможность обнаружить эффекты, находящиеся за пределами стандартной модели. Поиск стерильного нейтрино позволит понять вклад данной частицы в темную материю. Если его масса сотни эВ, то оно может претендовать на роль темной материи, если около эВ — лишь на некий вклад в темную материю. Стерильные нейтрино позволят расширить стандартную модель и представляют собой абсолютно новую физику. Для изучения и анализа этой проблемы было сделано следующее:

1. Проанализирована теория для МСВ - эффекта;
2. Изучен принцип работы библиотеки для вычисления вероятностей осцилляций NOvA;
3. Проанализирована схема осцилляций  $3+1$ , подобраны соответствующие параметры и построены графики осцилляций стерильных нейтрино для данной схемы. Данные графики были построены для ближнего и дальнего детекторов эксперимента NOvA. Варьировались различные осцилляционные параметры. На базе данных графиков был сделан вывод о чувствительности эксперимента;
4. Рассмотрена схема осцилляций  $3+2$ , подобраны соответствующие параметры и построены графики осцилляций стерильных нейтрино для данной осцилляционной схемы. Данные графики были построены с учетом местоположения ближнего и дальнего детекторов. Во время анализа чувствительности эксперимента к поиску стерильного нейтрино для данной схеме осцилляций изменялись различные параметры. На базе данных графиков был сделан вывод о чувствительности эксперимента.

# 1. Теория и принципы работы вспомогательного ПО

## 1.1 Основные свойства и история открытия нейтрино

Нейтрино — это стабильная элементарная частица, относящаяся по своим статистическим свойствам к фермионам, т.е. частицам с полуцелым спином, и входящая в группу лептонов [1].

Характеристика	Значение
Спин $J$	$\frac{1}{2}$
Четность $P$	не определена
Электрический заряд $Q$	0
Время жизни $\tau$	$\rightarrow \infty$ (стабильно)
Барионный заряд $B$	0

Таблица 1.1: Основные общие характеристики нейтрино.

Основные характеристики нейтрино перечислены в Таблице 1.1, а отношение нейтрино к различным типам взаимодействий – Таблице 1.2.

Взаимодействие	Участие
Сильное	–
Слабое	+
Электромагнитное	–
Гравитационное	+

Таблица 1.2: Отношение нейтрино к различным типам взаимодействий.

Важной особенностью нейтрино является слабое взаимодействие с веществом. Сечение взаимодействия нейтрино в зависимости от его энергии лежит в пределах от  $\sigma \approx 10^{-34}$  см<sup>2</sup> до  $\sigma \approx 10^{-43}$  см<sup>2</sup>, поэтому пробег нейтрино низких энергий (порядка 1 МэВ) в твердой среде составляет  $\approx 10^{15}$  км. Известно три типа или аромата нейтрино: электронные нейтрино ( $\nu_e$ ), мюонное нейтрино ( $\nu_\mu$ ) и тау нейтрино ( $\nu_\tau$ ). Различные типы нейтрино

имеют разные лептонные заряды:  $L_e, L_\mu, L_\tau$ . Для нейтрино справедлив закон сохранения лептонного заряда.

Гипотеза о существовании нейтрино была выдвинута В. Паули в 1930 году для объяснения свойств  $\beta$ -распада ядер. Электронное нейтрино  $\nu_e$  было открыто в экспериментах Ф. Райнеса и К. Коуэна (1953–56 гг, США) по детектированию антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  от атомных реакторов в процессе обратного  $\beta$ -распада:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ .

Открытием мюонного нейтрино считается детектирование реакции:  $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$  под действием нейтрино от ускорителя, рождённых в распадах  $\pi$ -мезонов:  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$  (Дж. Стейнбергер, М. Шварц, Л. Ледерман, Брукхейвенская нац. лаборатория, США, 1962). Отсутствие электронов в конечном состоянии реакции доказывает, что  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$  – разные частицы (идея Б. М. Понтекорво).

Тау нейтрино  $\nu_\tau$  было введено в связи с открытием  $\tau$ -лептона в 1975. Открытием  $\nu_\tau$  считается обнаружение т.н. событий с изломом трека в ядерной эмульсии (Национальная ускорительная лаборатория им. Ферми, США, 2000). Эти события обусловлены взаимодействием  $\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$  ( $N$  – нуклон,  $X$  – система адронов) с последующими распадами  $\tau$ -лептона:  $\tau \rightarrow \nu_\tau + e^- + \bar{\nu}_e$  и  $\tau \rightarrow \nu_\tau + h$  ( $h$  – адрон). Поток  $\nu_\tau$  от ускорителя формировался в распадах очарованных мезонов.

## 1.2 Экспериментальные указания на существование стерильных нейтрино

Первое экспериментальное свидетельство существования стерильного нейтрино [2] было представлено в 2001 году экспериментом LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector). Этот эксперимент зафиксировал избыток  $\bar{\nu}_e$  событий с точностью  $3.8\sigma$  в канале рождения  $\bar{\nu}_e$  длиной 30 м от пучка  $\bar{\nu}_\mu$  энергией 30 МэВ. Пучок формировался благодаря распаду мюонов после попадания протонов с энергией 800 МэВ на водную мишень в Лос-Аламосской национальной лаборатории.

Главной целью эксперимента MiniBooNE [3], проводившегося на базе Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми, являлось подтверждение данных эксперимента LSND, путем наблюдения избытка  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$  на расстоянии в 500 м от пучка  $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$  с энергией в 500 МэВ. Данный пучок формируется благодаря распаду пионов, рожденных в результате попадания протонов с начальной энергией 8 ГэВ на бериллиевую мишень. Стоит отметить, что MiniBooNE и LSND имеют одинаковые  $\frac{L}{E}$ , но разные энергии нейтрино, сигнал и фон. Эксперимент MiniBooNE наблюдал избыток нейтрино с точностью

$4.7\sigma$  событий. Данные результаты согласуются с результатами эксперимента LSND.

Еще одно доказательство наличия стерильных нейтрино наблюдалось при помощи радиохимических экспериментов с солнечными нейтрино, GALLEX И SAGE. Они наблюдали дефицит в  $2.6\sigma$  событий для  $\nu_e$  с помощью радиоактивных источников  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{37}\text{Ar}$ .

## 1.3 Теория нейтринных осцилляций

### 1.3.1 Схема 3+1

Мы знаем, что собственные состояния аромата и массы могут быть связаны следующим уравнением [4]

$$\nu_\alpha = U_{\alpha i} \nu_i, \quad (1.1)$$

где  $U$  — унитарная матрица. В матричной форме смешивания между собственными состояниями аромата  $\nu_\alpha$  ( $\alpha = e, \mu, \tau, s$ ; где  $s$  обозначает стерильное нейтрино) и собственными состояниями массы  $\nu_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) для схемы осцилляций вида 3+1 могут быть представлены как

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & U_{\mu4} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & U_{\tau4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Эта унитарная матрица может быть параметризована [5] как

$$U = R_{34}(\theta_{34}, 0) R_{24}(\theta_{24}, 0) R_{23}(\theta_{23}, \delta_3) R_{14}(\theta_{14}, 0) R_{13}(\theta_{13}, \delta_2) R_{12}(\theta_{12}, \delta_1) \quad (1.3)$$

где  $R_{ij}(\theta_{ij}, \delta_l)$  — комплексная матрица вращения в плоскости  $i$ - $j$ , ее элементы задаются следующим образом

$$[R_{ij}(\theta_{ij}, \delta_l)]_{pq} = \begin{cases} \cos \theta_{ij} & , & p = q = i, j \\ 1 & , & p = q \neq i, j \\ \sin \theta_{ij} e^{-i\delta_l} & , & p = i; q = j \\ -\sin \theta_{ij} e^{i\delta_l} & , & p = j; q = i \\ 0 & , & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (1.4)$$

Здесь угол  $\theta_{ij}$  — угол поворота в плоскости  $i$ - $j$ . Если принять  $\theta_{14}, \theta_{24}, \theta_{34} = 0$ , то приведенная выше матрица смешивания сводится к стандартной матрице Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты (PMNS-матрица) [6].

Присутствие стерильного нейтрино изменяет стандартную картину осцилляций нейтрино с тремя ароматами, и, следовательно, необходимо изменить вероятность выживания с учетом эффекта смешивания (3+1). Формула вероятности осцилляций одного типа нейтрино в другой может быть проиллюстрирована приближенным выражением [7, 8],

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_s) \approx \frac{1}{2} \cos^4 \theta_{14} \cos^2 \theta_{34} \sin^2 \theta_{24} - A \sin^2 \Delta_{31} + B \sin 2\Delta_{31}, \quad (1.5)$$

где  $\Delta_{31} = \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}$ .

Коэффициенты  $A$  и  $B$  являются функциями углов смешивания и фаз ( $\theta_{ij}$ ,  $\delta_{14}$  и  $\delta_{24}$ ). В первом порядке,  $A = \sin^2 \theta_{34} \sin^2 2\theta_{23}$  и  $B = \frac{1}{2} \sin \delta_{24} \sin \theta_{24} \sin 2\theta_{34} \sin 2\theta_{23}$ .

### 1.3.2 Схема 3+2

Собственные состояния аромата и массы нейтрино для схемы 3+2 связаны таким же образом, как и для схемы 3+1

$$\nu_\alpha = U_{\alpha i} \nu_i, \quad (1.6)$$

Схема 3+1 осцилляций нейтрино может быть расширена добавлением еще одного массового состояния. Следовательно, схема 3+1 превращается в схему 3+2. В матричной форме смешивания между собственными состояниями аромата  $\nu_\alpha$  ( $\alpha = e, \mu, \tau, s_1, s_2$ ; где  $s_{1,2}$  обозначает стерильные нейтрино) и собственными состояниями массы  $\nu_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) для схемы осцилляций вида 3+2 могут быть представлены как

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \\ \nu'_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} & U_{e5} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & U_{\mu4} & U_{\mu5} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & U_{\tau4} & U_{\tau5} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} & U_{s5} \\ U'_{s1} & U'_{s2} & U'_{s3} & U'_{s4} & U'_{s5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \\ \nu_5 \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Присутствие двух стерильных нейтрино изменяет стандартную картину осцилляций с тремя ароматами и картину осцилляций для схемы 3+1, и, следовательно, приближительная общая формула вероятности осцилляций с учетом схемы 3+2 изменится следующим образом [9],

$$\begin{aligned}
P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \approx & -4|U_{\alpha 5 \beta 5}| |U_{\alpha 4 \beta 4}| \cos \phi_{54} \sin^2(1.27 \Delta_{54} \frac{L}{E}) \\
& +4(|U_{\alpha 4 \beta 4}| + U_{\alpha 5 \beta 5} \cos \phi_{54}) |U_{\alpha 4 \beta 4}| \sin^2(1.27 \Delta_{41} \frac{L}{E}) \\
& +4(|U_{\alpha 4 \beta 4}| \cos \phi_{54} + |U_{\alpha 5 \beta 5}|) |U_{\alpha 5 \beta 5}| \sin^2(1.27 \Delta_{51} \frac{L}{E}) \\
& +2|U_{\beta 5 \alpha 5}| |U_{\beta 4 \alpha 4}| \sin \phi_{54} \sin(2.53 \Delta_{54} \frac{L}{E}) \\
& +2(|U_{\alpha 5 \beta 5}| \sin \phi_{54}) |U_{\alpha 4 \beta 4}| \sin(2.53 \Delta_{41} \frac{L}{E}) \\
& +2(-|U_{\alpha 4 \beta 4}| \sin \phi_{54}) |U_{\alpha 5 \beta 5}| \sin(2.53 \Delta_{51} \frac{L}{E}),
\end{aligned} \tag{1.8}$$

где  $\phi$  — CP фаза, определяющаяся следующим выражением

$$\phi_{54} = \arg(U_{e5} U_{\mu 5}^* U_{e4}^* U_{\mu 4}). \tag{1.9}$$

Члены, которые зависят от  $\cos \phi_{54}$ , сохраняют CP, так как они не меняют знак при переходе из нейтрино в антинейтрино, в то время как члены, которые зависят от  $\sin \phi_{54}$ , нарушают CP.

### 1.3.3 Эффект Михеева – Смирнова – Вольфенштейна

МСВ – эффект [10] — это адиабатическое или частично адиабатическое преобразование аромата нейтрино в среде с различной плотностью.

Динамика МСВ – эффекта может быть описана с помощью степеней свободы. Для простоты рассмотрим случай двух нейтрино. Произвольное состояние нейтрино может быть описано в терминах собственных состояний с помощью гамильтониана:

$$\nu(x) = \cos \theta_\alpha \nu_{1m} + \sin \theta_\alpha \nu_{2m} e^{i\Phi_m} \tag{1.10}$$

где

- $\theta_\alpha = \theta_\alpha(x)$  определяет вклад собственных состояний в  $\nu(x)$ ;
- $\Phi_m(x)$  — фаза осцилляций:

$$\Phi_m(x) = \int_{x_0}^x \Delta H dt', \tag{1.11}$$

здесь  $\Delta H = H_{2m} - H_{1m}$  — разность собственных состояний. Уравнение 1.11 дает выражение для фазы.



- Угол смешивания в веществе  $\theta_m$  определяет количество собственного состояния аромата (ароматов) в веществе. Данный угол является функцией от плотности вещества.

При наличии вещества гамильтониан системы изменяется:  $H_0 \rightarrow H = H_0 + H$ , где  $H_0$  — гамильтониан в вакууме. Соответственно, собственные состояния и собственные значения гамильтониана  $H$  меняются:  $\nu_1, \nu_2 \rightarrow \nu_{1m}, \nu_{2m}$ ,  $\frac{m_1^2}{2E}, \frac{m_2^2}{2E} \rightarrow H_{1m}, H_{2m}$ . Здесь  $\nu_1, \nu_2$  — собственные состояния массы с массами  $m_1, m_2$ .

Смешивания в веществе определяются с учетом собственных состояний  $\nu_{1m}$  и  $\nu_{2m}$ . Аналогично случаю вакуумных осцилляций, углы смешивания  $\theta_m$  определяют отношения между собственными состояниями массы и ароматами нейтрино:  $\nu_e \equiv \cos \theta_m \nu_{1m} + \sin \theta_m \nu_{2m}$ . В веществе собственные состояния, собственные значения, а следовательно, и углы смешивания зависят от плотности вещества и энергии нейтрино.

Аналогично МСВ – эффект описывается для схем 3+1 и 3+2.

## 1.4 Библиотека для подсчета вероятностей осцилляций NOvA

Изначально библиотека строит полный гамильтониан системы и решает его для собственных векторов и собственных значений методом итераций. Библиотека делит матрицу квадратов масс гамильтониана на две величины энергии пучка ( $2E$ ), чтобы получить вакуумный гамильтониан в эВ. Потенциал вещества добавляется к электронным и стерильным компонентам. В итоге, получается потенциал аналогичный потенциалу вещества для матрицы смешивания  $3 \times 3$  [11]:

$$\langle H_{eff} \rangle = \bar{\nu}_l A \gamma_0 P_L \nu_l, \quad (1.12)$$

где  $A = \sqrt{2} G_F [N_e \text{diag}(1, 0, 0) - \frac{N_n}{2} \text{diag}(1, 1, 1)]$ .

Библиотека NOvA решает данный гамильтониан методом итераций (при помощи GNU Scientific Library).

## 1.5 Эксперимент NOvA

Эксперимент NOvA [8] – нейтринный ускорительный эксперимент, который использует пучок мюонных нейтрино (антинейтрино) из Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (США) для изучения нейтринных осцилляций. Для поиска частиц используются два детектора (ближний

и дальний), которые представляют собой трековые калориметры. Расстояние до ближнего детектора – 1 км, до дальнего – 810 км. Эксперимент NOvA может искать осцилляции в стерильное нейтрино путем поиска исчезновения активного потока нейтрино между ближним и дальним детекторами.

Нейтринный пучок NuMI создается с помощью протонов с энергией 120 ГэВ, падающих на графитовую мишень длиной 1.2 м. Каоны и пионы, вылетающие из мишени, фокусируются двумя магнитными горнами и распадаются на нейтрино при прохождении расстояния в 705 м, включая 675 метровый распадный канал, или поглощаются. Результирующий пучок нейтрино имеет узкий энергетический спектр, пик которого находится на энергии 2 ГэВ. Ближний детектор видит большой телесный угол, поскольку он находится ближе к источнику пучка, и, следовательно, более широкое распределение по энергии. Длительность пучка составляет 10 мкс, он испускается каждые 1.33 с и преимущественно состоит из  $\nu_\mu$ .

Ближний и дальний детекторы являются идентичными калориметрами, состоящими из ячеек, заполненных жидким сцинтиллятором на основе минерального масла, с примесью пятипроцентного раствора псевдокумола. Ячейки размером 3,9 на 6,6 см изготовлены из отражающего ПВХ. Сцинтиллятор составляет 62% от массы детектора. Ячейки дальнего детектора (ближнего детектора) имеют длину 15,5 (3,9) м и содержат петлю из оптоволокну, смещающего длину волны, которое крепится к 32-пиксельному лавинному фотодиоду Hamamatsu. В общей сложности 344 064 (18 432) ячеек организованы в 896 (192) плоскостей, расположенных таким образом, что ячейки чередуются между горизонтальной и вертикальной ориентациями относительно оси пучка, чтобы обеспечить трехмерную реконструкцию. Масса дальнего детектора и ближнего детектора составляет 14 кт и 193 т соответственно.

#### Основные задачи эксперимента NOvA:

- Наблюдение осцилляций мюонного нейтрино в электронное нейтрино;
- Определение иерархии масс нейтрино;
- Измерение фазы CP нарушения в лептонном секторе. Это может быть ключом к пониманию, почему во вселенной больше материи, чем анти-вещества.

## 2. Результаты

### 2.1 Параметры осцилляций для стерильного нейтрино схема (3+1)

Ниже приведены таблицы с параметрами осцилляций для схемы 3+1. Данные параметры являются общепринятыми. Таблица 2.2 демонстрирует параметры трехфлейворных осцилляций [8, 12, 13]. В таблице 2.1 содержатся параметры осцилляций для стерильного нейтрино [8, 12].

Параметр осцилляций	Значение	Параметр осцилляций	Значение
$\delta_{14}$	$\frac{3\pi}{2}$ рад	$\theta_{14}$	$12^\circ$
$\delta_{24}$	$\frac{\pi}{2}$ рад	$\theta_{24}$	$10^\circ$
$\Delta m_{41}^2$	$2.5 \times 10^{-3}$ эВ <sup>2</sup>	$\theta_{34}$	$22.8^\circ$
E	1.8 ГэВ	$\rho$	$2.7$ г/см <sup>3</sup>

Таблица 2.1: Параметры осцилляция для стерильных нейтрино.

Параметр осцилляций	Значение
$\delta_{13}$	$\frac{3\pi}{2}$ рад
$\Delta m_{21}^2$	$7.53 \times 10^{-5}$ эВ <sup>2</sup>
$\Delta m_{31}^2$	$2.5 \times 10^{-3}$ эВ <sup>2</sup>
$\theta_{12}$	0.594 рад
$\theta_{13}$	0.146 рад
$\theta_{23}$	$\frac{\pi}{4}$ рад

Таблица 2.2: Параметры осцилляций для нейтрино.

## 2.2 Эффект Михеева – Смирнова – Вольфенштейна для стерильных нейтрино

На графике (Рисунок 2.1) показаны зависимости вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$  в веществе (график черного цвета) и вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$  в вакууме (график красного цвета). Синяя и фиолетовая линии показывают местоположение ближнего и дальнего детекторов соответственно. На рисунке 2.1 наблюдается расхождение между графиками для вероятности осцилляций в веществе и вероятности осцилляций в вакууме. График для вероятности осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$  в веществе лежит ниже чем график для вероятности осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$  в вакууме. Следовательно, можно сделать вывод, что вероятность выживания нейтрино в вакууме больше чем в веществе. Данное расхождение, объясняется с помощью эффекта Михеева – Смирнова – Вольфенштейна.

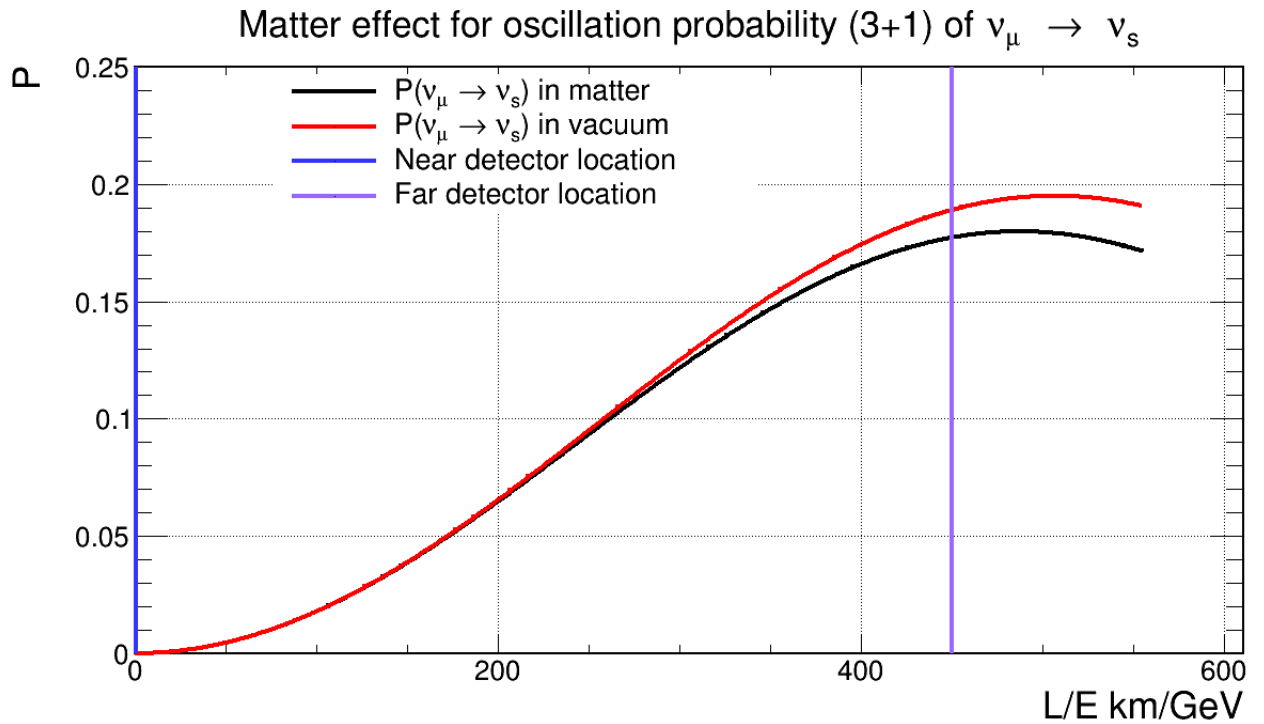


Рис. 2.1: График зависимости вероятности осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$  в вакууме и вероятности осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$  в веществе постоянной плотности от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\Delta m_{41}^2$ .

## 2.3 Результаты с учетом выбранных параметров осцилляций для схемы 3+1

На Рисунке 2.2 показаны вероятности осцилляций мюонного нейтрино в стерильное нейтрино для различных значений  $\Delta m_{41}^2$ . Синяя и фиолетовая линии показывают расположение ближнего и дальнего детекторов соответственно. Для удобства график построен в логарифмическом масштабе. Из графика видно, что при данных значениях квадрата разности масс осцилляции наблюдаются только в дальнем детекторе. Также можно заметить, что с увеличением значения  $\Delta m_{41}^2$  частота осцилляций возрастает. Как видно из графика, для значения  $\Delta m_{41}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$  максимум вероятности осцилляций приходится на расположение дальнего детектора. Данный квадрат разности масс наиболее приближен к реальным значениям, следовательно, выбор данного значения параметра оправдан.

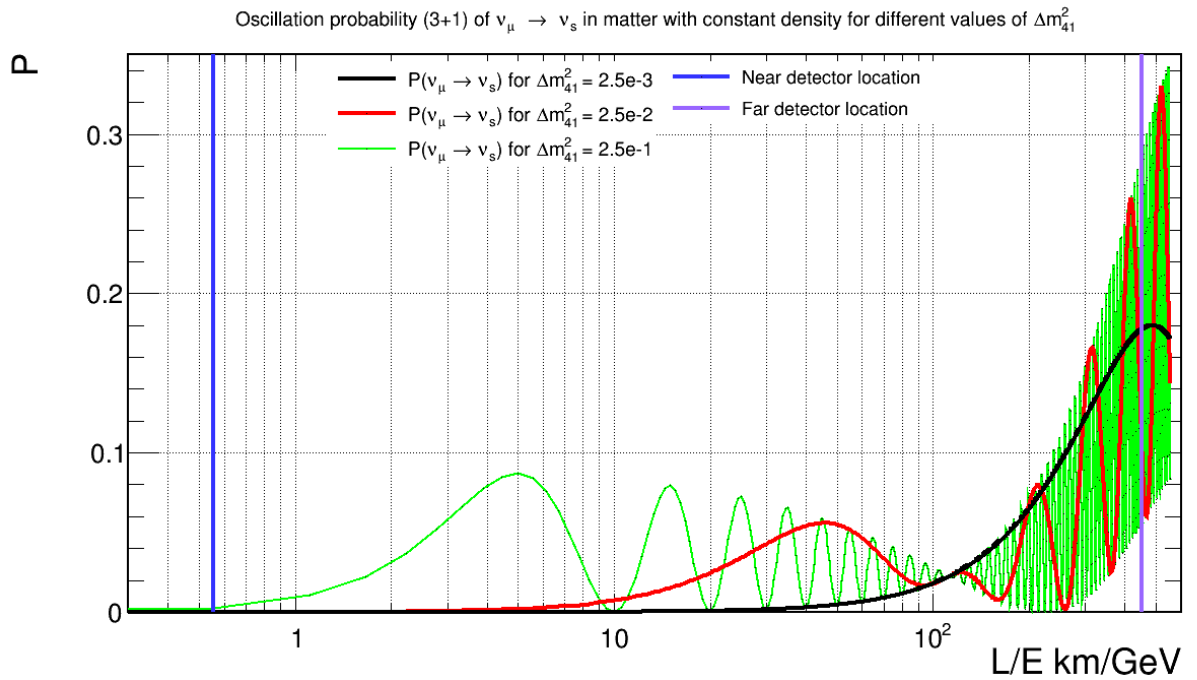


Рис. 2.2: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\Delta m_{41}^2$ .

На Рисунке 2.3 варьируется значение параметра  $\Delta m_{41}^2$ . Это позволит наблюдать нейтринные осцилляции в ближнем детекторе. В данном случае использовались значения  $\Delta m_{41}^2 = 2.5 \times 10^{-2} \text{ эВ}^2$ ,  $2.5 \times 10^{-1} \text{ эВ}^2$ ,  $2.5 \text{ эВ}^2$ . Эти значения на несколько порядков больше общепринятых значений, но они демонстрируют нейтринные осцилляции для ближнего детектора. С увеличением  $\Delta m_{41}^2$  частота осцилляций продолжает увеличиваться так же как и для графика выше (Рисунок 2.2). Ближний детектор с наибольшей вероят-

ность способен зарегистрировать стерильное нейтрино при  $\Delta m_{41}^2 = 2.5 \text{ эВ}^2$ . В этом случае вероятностная кривая имеет пик там, где находится ближний детектор (Рисунок 2.3). Также из рисунка можно видеть, что при наиболее приближенном к общепринятым значениям разности квадратов масс  $\Delta m_{41}^2 = 2.5 \times 10^{-2} \text{ эВ}^2$ , вероятность наблюдать стерильное нейтрино почти нулевая.

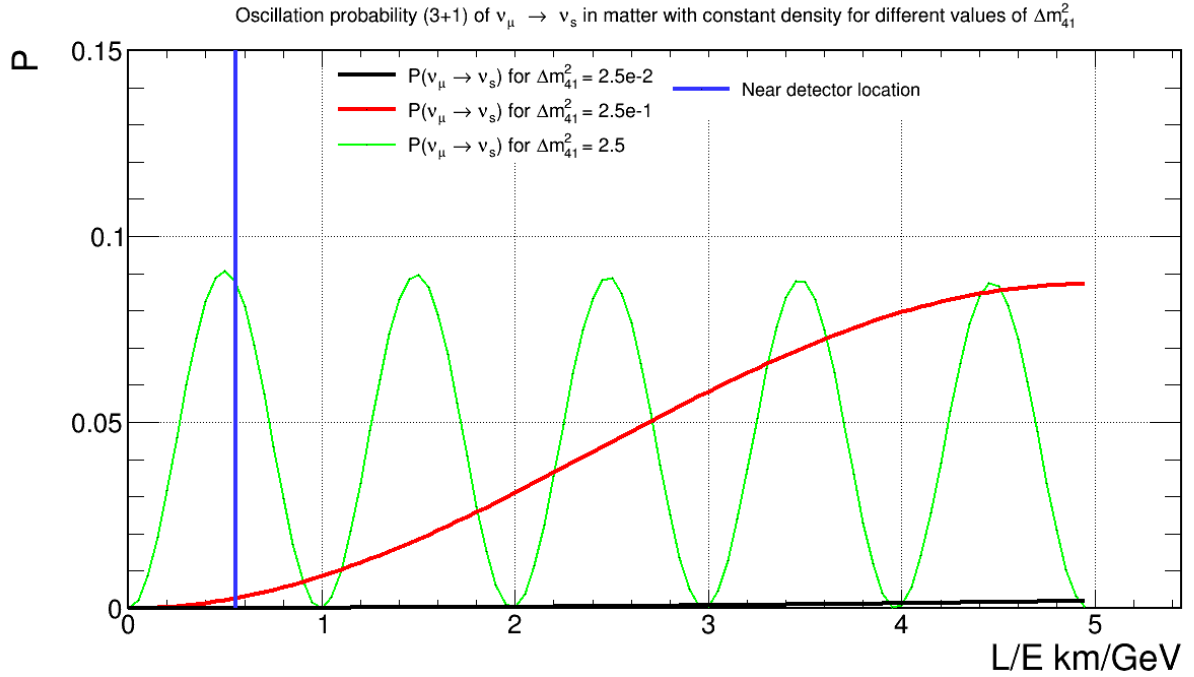


Рис. 2.3: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\Delta m_{41}^2$  для ближнего детектора.

На Рисунке 2.4 показана зависимость вероятности осцилляций мюонного нейтрино в стерильное нейтрино от отношения расстояния до детектора к энергии пучка  $\frac{L}{E}$  для различных значений  $\delta_{14}$  в логарифмическом масштабе. В данном случае были использованы следующие значения параметра:  $\delta_{14} = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  радиан. Для значений  $\delta_{14} = \frac{3\pi}{2}$  радиан (оранжевая линия на Рисунке 2.4) наблюдается максимум вероятности осцилляций  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_s$ . Минимум вероятности осцилляций  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_s$  можно наблюдать для значения параметра  $\delta_{14} = \frac{\pi}{2}$  радиан (красная линия на Рисунке 2.4). Значение параметра  $\delta_{14} = \pi$  радиан, принятого как параметр по умолчанию, почти соответствует максимальному значению (черная линия на Рисунке 2.4).

На Рисунке 2.5 показаны вероятности осцилляций мюонного нейтрино в стерильное нейтрино для различных значений  $\delta_{24}$  в логарифмическом масштабе. Использовались следующие значения;  $\delta_{24} = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ . Из графика видно, что для значения фазы  $\delta_{24} = 0$  радиан (салатовая линия на Рисун-

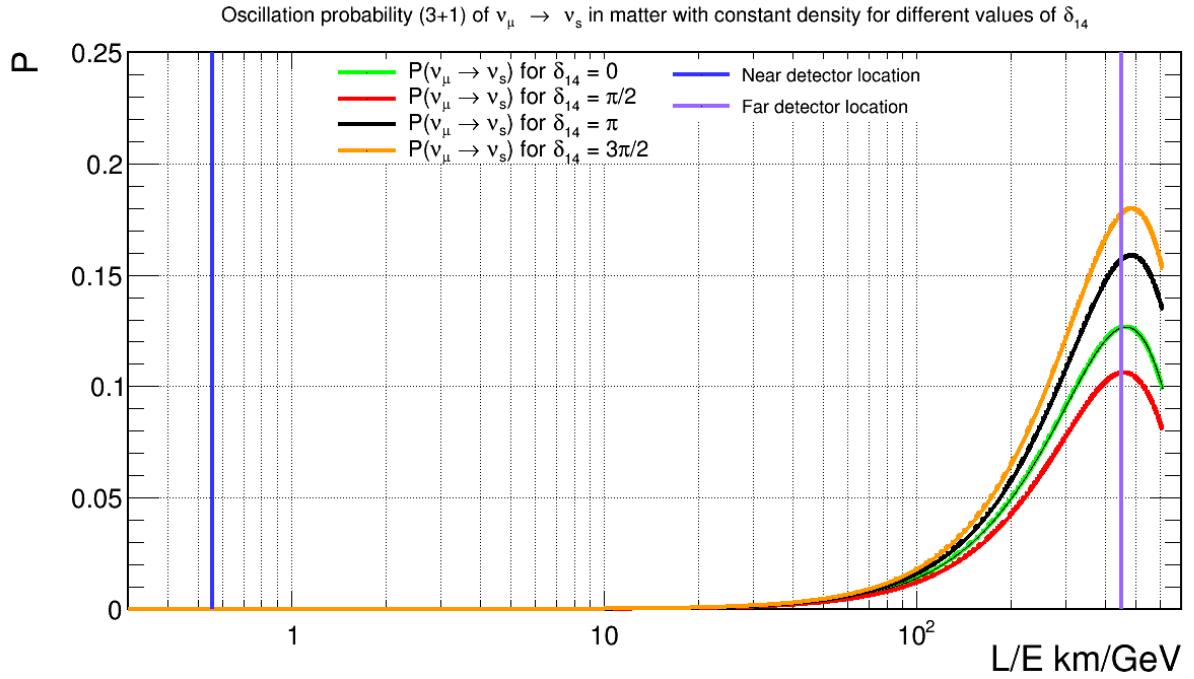


Рис. 2.4: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\delta_{14}$ .

ке 2.5) вероятность осцилляций наименьшая, а для значения фазы  $\delta_{24} = \pi$  (черная линия на Рисунке 2.5) вероятность осцилляций наибольшая.

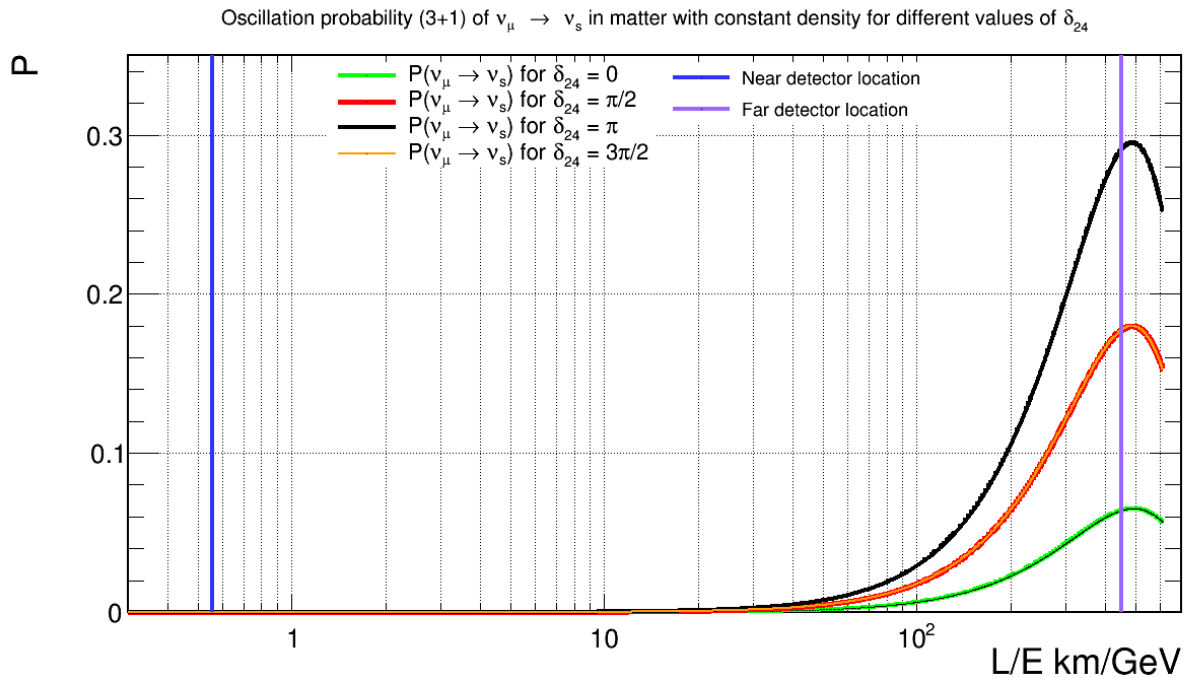


Рис. 2.5: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\delta_{24}$ .

На Рисунке 2.6 показаны вероятности осцилляций мюонного нейтрино

в стерильное нейтрино для различных значений  $\theta_{14}$  в логарифмическом масштабе. Использовались следующие значения:  $\theta_{14} = 12^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Из графика видно, что для значения угла смешивания  $\theta_{14} = 12^\circ$  (черная линия на Рисунке 2.6) вероятность осцилляций наименьшая, а для значения угла  $\theta_{14} = 90^\circ$  (салатовая линия на Рисунке 2.6) вероятность осцилляций наибольшая.

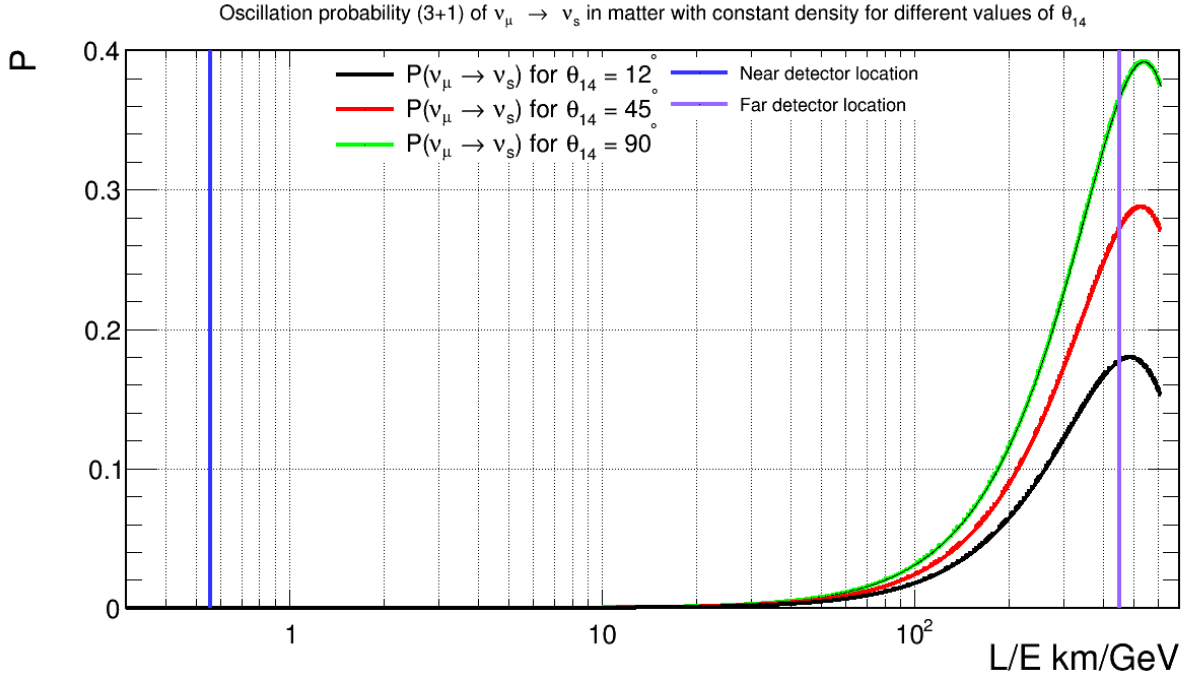


Рис. 2.6: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{14}$ .

На Рисунке 2.7 варьируется значение параметра  $\theta_{14}$ . Также для данного рисунка изменено значение квадрата разности масс  $\Delta m_{41}^2 = 2.5 \text{ эВ}^2$ . Это значение на несколько порядков больше общепринятых значений, но оно демонстрирует нейтринные осцилляции для ближнего детектора. В данном случае использовались значения  $\theta_{14} = 12^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Максимум для вероятности осцилляций наблюдается для значения параметра  $\theta_{14} = 12^\circ$  (салатовая линия на Рисунке 2.7). При значении параметра  $\theta_{14} = 90^\circ$  наблюдается минимум вероятности осцилляций (черная линия на Рисунке 2.7). Расположение ближнего детектора показано синей линией.

Рисунок 2.8 показывает вероятность осцилляций мюонного нейтрино в стерильное нейтрино в зависимости от отношения  $\frac{L}{E}$  для различных значений параметра  $\theta_{24}$ . График построен в логарифмическом масштабе. Максимум осцилляций наблюдается при значении  $\theta_{24} = \frac{\pi}{4}$  радиан (красная линия на Рисунке 2.8), а минимум осцилляций при  $\theta_{24} = \frac{\pi}{2}$  (салатовая линия на Рисунке 2.8). Значение  $\theta_{24} = 10^\circ$  (черная линия на Рисунке 2.8) определяет среднее значение вероятности выживания. При данных параметрах осцилляций ближней детектор не способен зарегистрировать нейтрино.



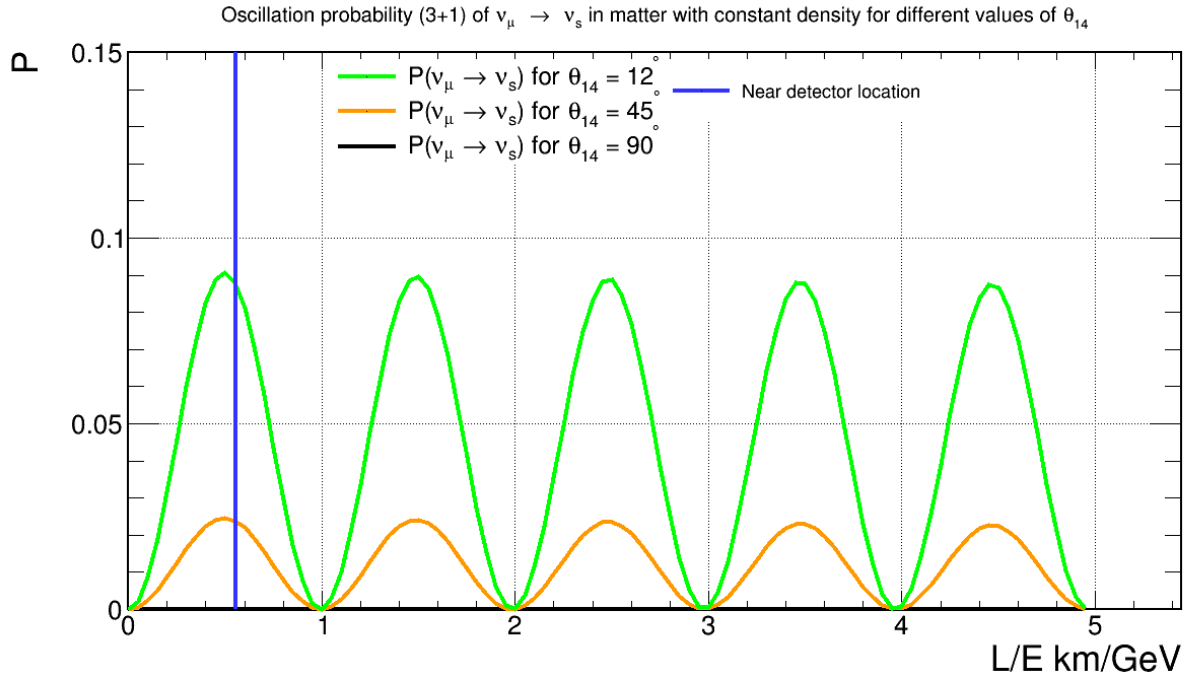


Рис. 2.7: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{14}$ . График демонстрирует осцилляции для ближнего детектора.

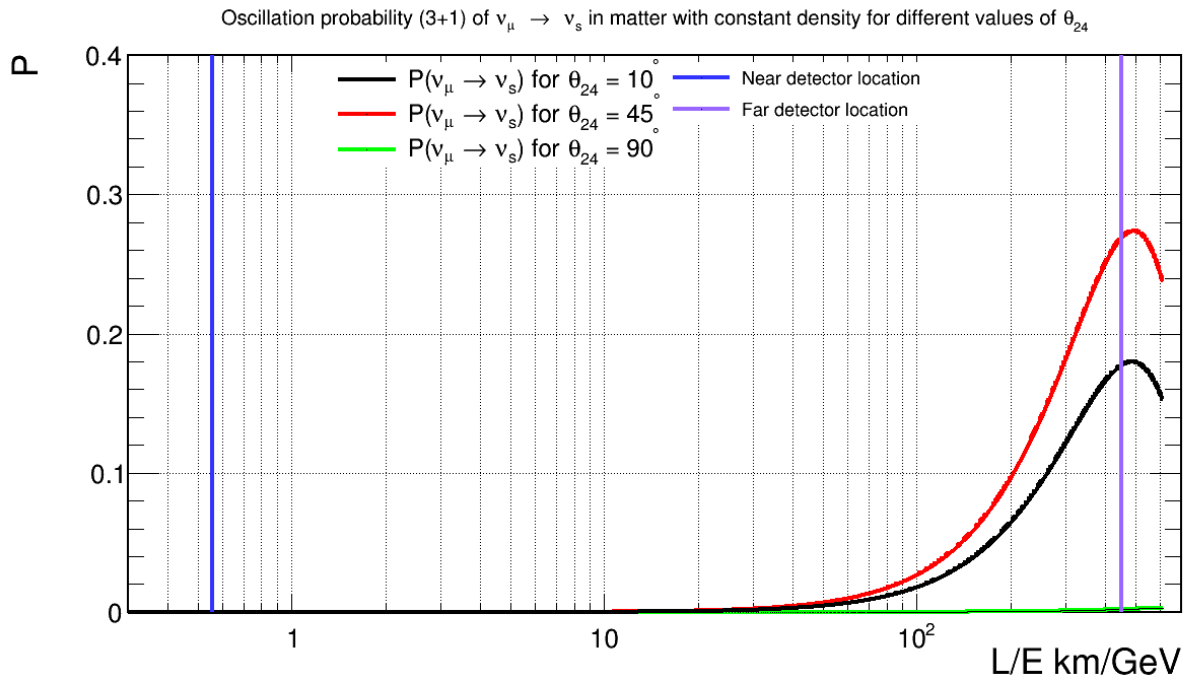


Рис. 2.8: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{24}$ .

На Рисунке 2.9 варьируется значение параметра  $\theta_{24}$ . Для данного графика изменено значение квадрата разности масс  $\Delta m_{41}^2 = 2.5 \text{ эВ}^2$ . Это поз-

волит наблюдать нейтринные осцилляции в ближнем детекторе. В данном случае использовались значения  $\theta_{24} = 10^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Максимум для вероятности осцилляций наблюдается для значения параметра  $\theta_{24} = 45^\circ$  (оранжевая линия на Рисунке 2.9). При значении параметра  $\theta_{24} = 90^\circ$  вероятность осцилляций нулевая (черная линия на Рисунке 2.9). Расположение ближнего детектора показано синей линией.

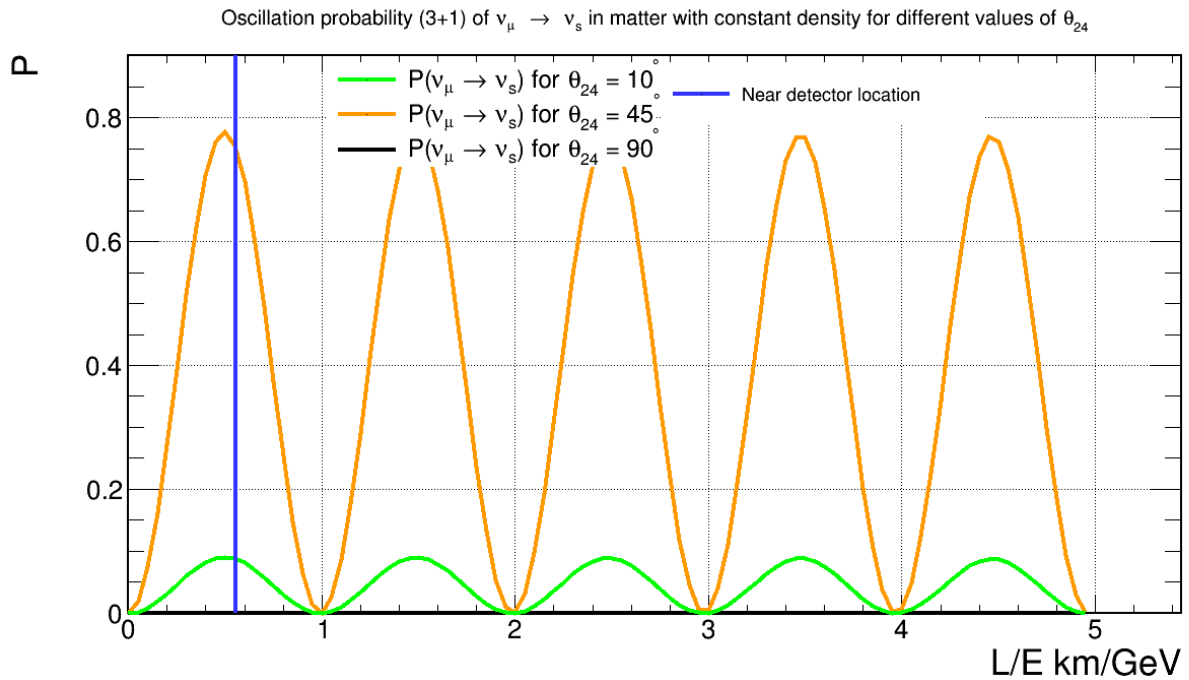


Рис. 2.9: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{24}$ . График демонстрирует осцилляции для ближнего детектора.

На Рисунке 2.10 показаны вероятности осцилляций мюонного нейтрино в стерильное нейтрино для различных значений  $\theta_{34}$  в логарифмическом масштабе. Использовались следующие значения;  $\theta_{34} = 22.8^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Из графика видно, что для значения угла смешивания  $\theta_{34} = 22.8^\circ$  (черная линия на Рисунке 2.10) вероятность осцилляций наименьшая, а для значения угла  $\theta_{34} = 90^\circ$  (салатовая линия на Рисунке 2.10) вероятность осцилляций наибольшая. Для значения параметра  $\theta_{34} = 45^\circ$  вероятность осцилляций принимает среднее значение (красная линия на рисунке 2.10).

На Рисунке 2.11 варьируется значение параметра  $\theta_{34}$ . Для данного графика изменено значение квадрата разности масс  $\Delta m_{41}^2 = 2.5 \text{ эВ}^2$ . Это позволит наблюдать нейтринные осцилляции в ближнем детекторе. В данном случае использовались значения  $\theta_{34} = 22.8^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Максимум для вероятности осцилляций наблюдается для значения параметра  $\theta_{34} = 22.8^\circ$  (салатовая линия на Рисунке 2.11). При значении параметра  $\theta_{34} = 90^\circ$  вероятность осцилляций нулевая (черная линия на Рисунке 2.11). При значении параметра

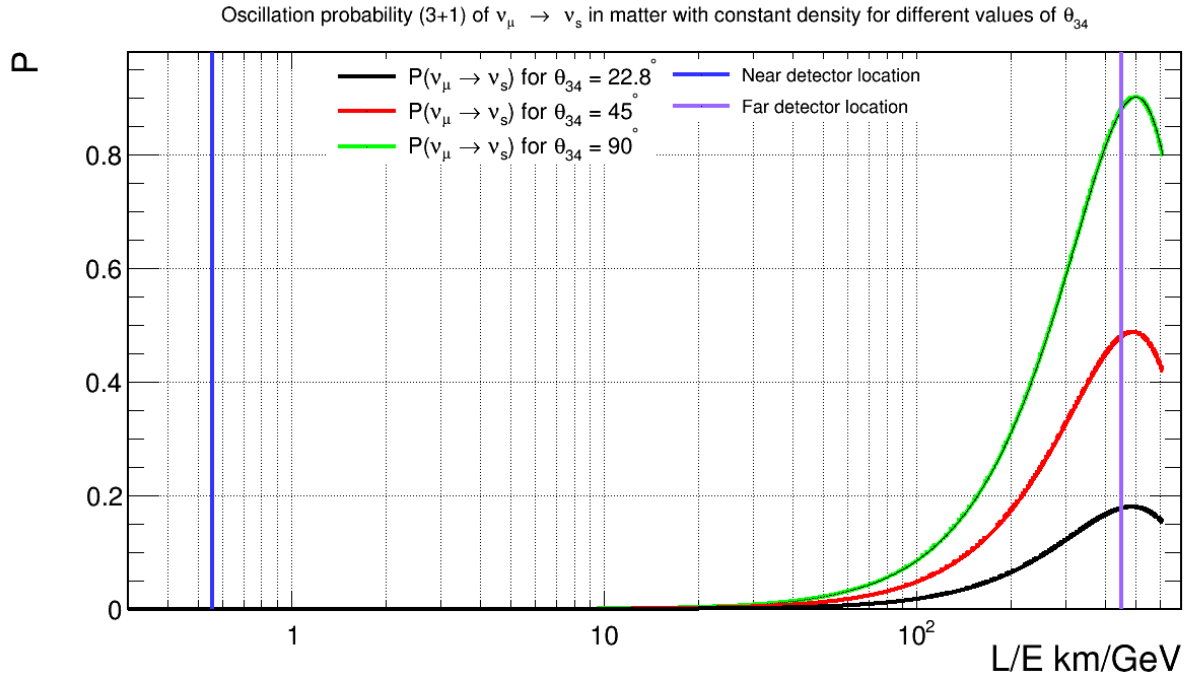


Рис. 2.10: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{34}$ .

ра  $\theta_{34} = 45^\circ$  пики кривых соответствуют среднему значению вероятности осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$ .

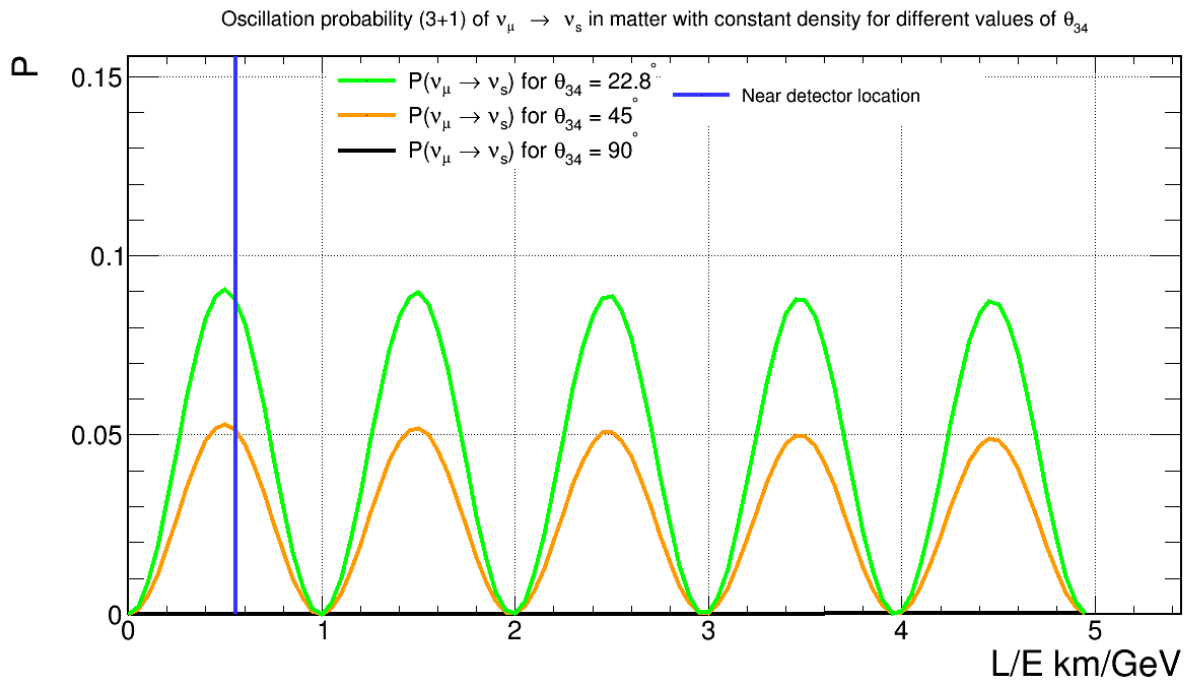


Рис. 2.11: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{34}$ . График демонстрирует осцилляции для ближнего детектора.

## 2.4 Параметры осцилляций для стерильного нейтрино схема (3+2)

В таблице ниже (Таблица 2.3) приведены параметры осцилляций и их значения для схемы 3+2 [14]. Данные параметры являются общепринятыми. За начальные значения углов смешивания  $\theta_{ij}$  принимается величина в 10 градусов. Остальные параметра оставлены без изменений (см. Таблица 2.1, Таблица 2.2).

Параметр осцилляций	Значение
$\delta_{15}$	$\frac{3\pi}{2}$ рад
$\delta_{25}$	$\frac{\pi}{2}$ рад
$\Delta m_{51}^2$	1.6 эВ <sup>2</sup>
$\theta_{15}$	10°
$\theta_{25}$	10°
$\theta_{35}$	10°
$\theta_{45}$	10°

Таблица 2.3: Параметры осцилляций для нейтрино.

## 2.5 Результаты с учетом выбранных параметров осцилляций для схемы 3+2

Рисунки, отображающие осцилляции в дальнем детекторе в более крупном масштабе, приведены ниже (см. 2.5. ПРИЛОЖЕНИЕ).

На Рисунке 2.12 показаны вероятности осцилляций нейтрино для различных значений  $\Delta m_{51}^2$ . В данном случае использовались следующие значения для разности квадратов масс  $\Delta m_{51}^2 = 1.6$  эВ<sup>2</sup>,  $1.6 \times 10^{-1}$  эВ<sup>2</sup>,  $1.6 \times 10^{-2}$  эВ<sup>2</sup>,  $1.6 \times 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup>. Графики представлены в логарифмическом масштабе, на рисунке хорошо видны осцилляции в ближнем детекторе. Также стоит отметить, что данные графики отображают наличие сразу двух типов стерильных нейтрино ( $\nu_s, \nu'_s$ ). Он строился именно таким образом, так как наблюдение стерильного нейтрино происходит по дефициту того или иного типа нейтрино (в конкретном случае — это  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) рабочим веществом детектора. В данном случае стерильные нейтрино будут наблюдаться как в ближнем детекторе, так и в дальнем детекторе. Также видно, что с увеличением квадрата разности масс для схемы 3+2, частота осцилляций увеличивается. Это

стоит учитывать при попытке поиска стерильного нейтрино для данной осцилляционной схемы ближним детектором.

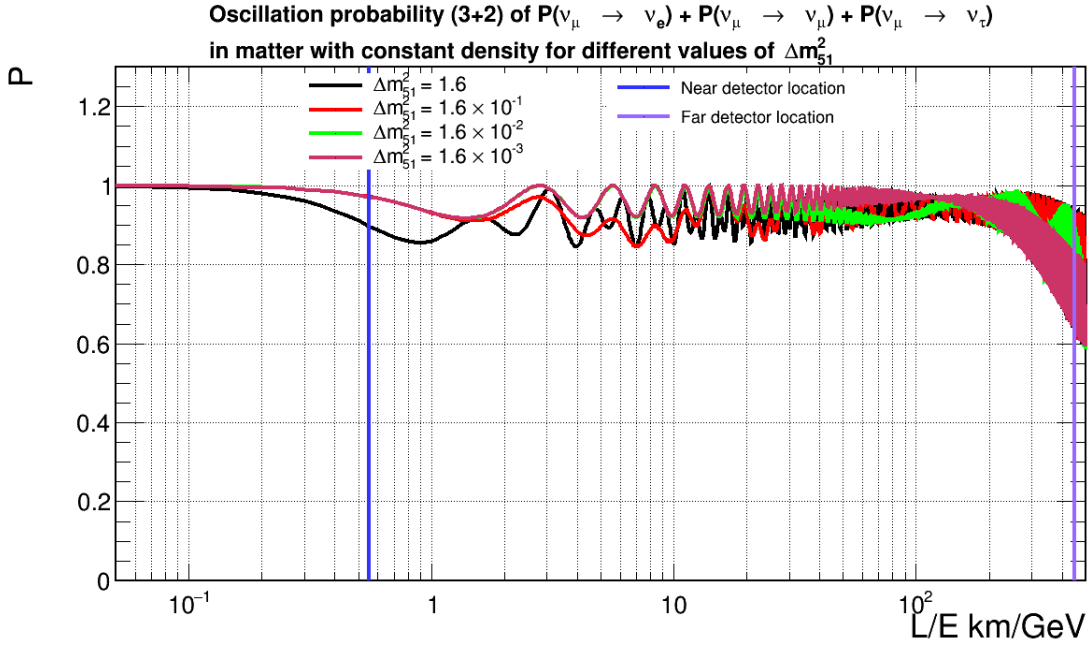


Рис. 2.12: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\Delta m_{51}^2$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ .

Ниже приведены графики суммы осцилляций мюонного нейтрино в электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау нейтрино (Рисунок 2.13), для их построения варьировался параметр  $\Delta m_{51}^2$ . Данные графики построены в обычном масштабе. На рисунке отчетливо видны осцилляции в дальнем детекторе. Наибольший дефицит нейтрино в дальнем детекторе наблюдается для параметра  $\Delta m_{51}^2 = 1.6 \times 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup>.

На Рисунке 2.14 представлены зависимости вероятности осцилляций нейтрино от отношения  $\frac{L}{E}$ . Изменяемый параметр в данном случае — это  $\delta_{15}$ . Из рисунка видно, что фаза  $\delta_{15}$  почти не влияет на вероятность осцилляций мюонного нейтрино в стерильное нейтрино. Наименьшая вероятность будет наблюдаться для значения фазы  $\delta_{15} = \frac{3\pi}{2}$ , а наибольшее для  $\delta_{15} = \frac{\pi}{2}$ .

Рисунок 2.15 демонстрирует зависимости суммы вероятностей осцилляций мюонного нейтрино в электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау нейтрино от отношения  $\frac{L}{E}$ . Из графика видно, что наименьшая вероятность осцилляций для стерильного нейтрино будет наблюдаться для значения фазы  $\delta_{25} = 0$ , а наибольшее для  $\delta_{25} = \pi$  (для дальнего детектора). В ближнем детекторе фаза осцилляций почти не влияет на вероятность наблюдать стерильное нейтрино.

На Рисунке 2.16 показаны вероятности осцилляций мюонного нейтрино

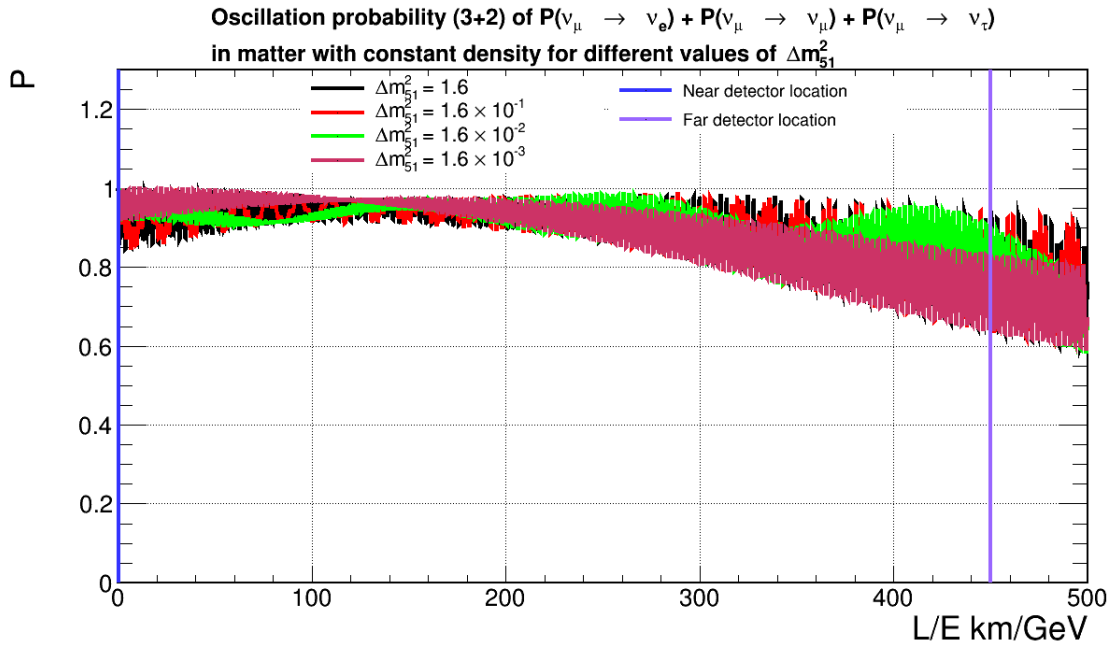


Рис. 2.13: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\Delta m_{51}^2$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ .

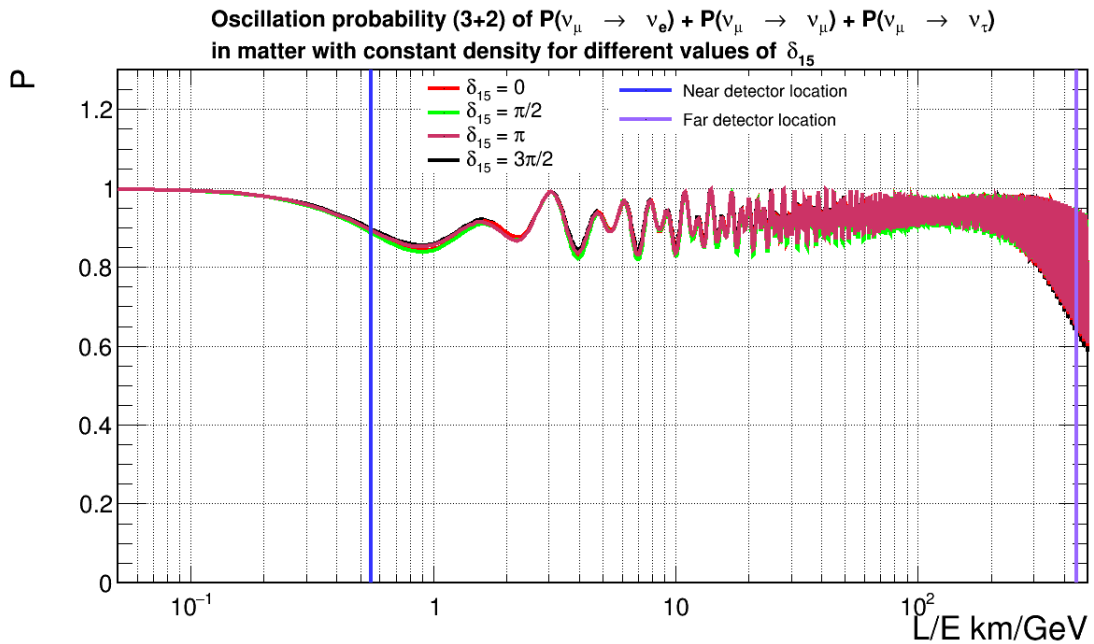


Рис. 2.14: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\delta_{15}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ .

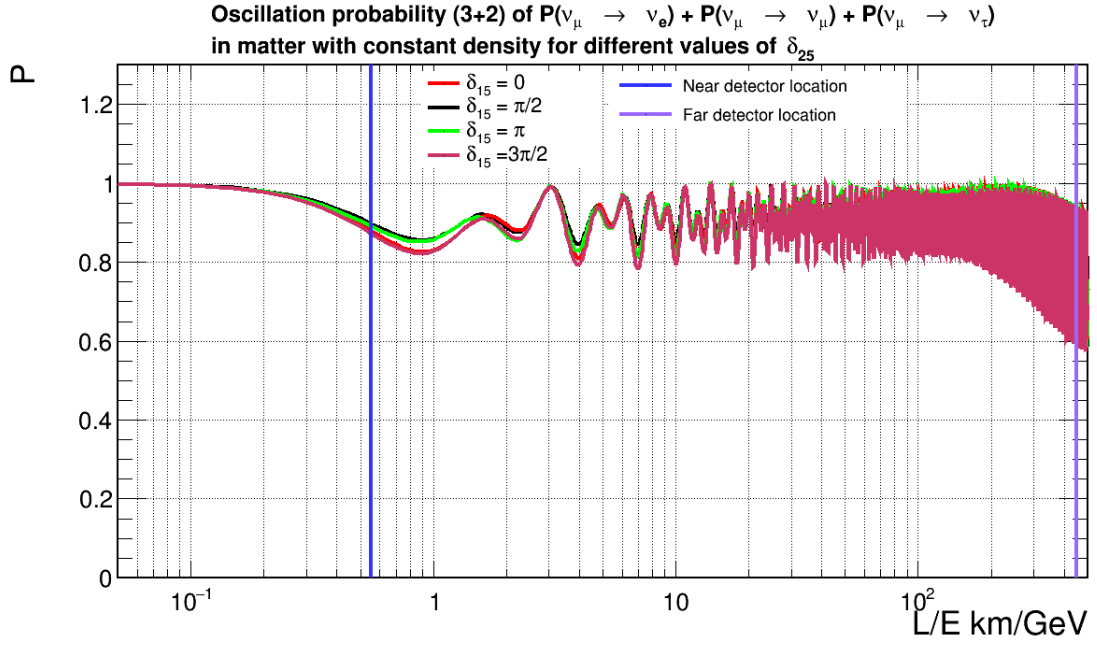


Рис. 2.15: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\delta_{25}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ .

в три основных типа нейтрино для различных значений  $\theta_{15}$  в логарифмическом масштабе. Использовались следующие значения:  $\theta_{15} = 0^\circ, 10^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Из графика видно, что для значения углов смешивания  $\theta_{15} = 0^\circ$  и  $\theta_{15} = 10^\circ$  (красная и черная линии на Рисунке 2.16) вероятность осцилляций наибольшая, а для значения угла смешивания  $\theta_{15} = 90^\circ$  (фиолетовая линия на Рисунке 2.16) вероятность осцилляций наименьшая. Для параметров  $\theta_{15} = 45^\circ$  и  $\theta_{15} = 90^\circ$  вероятности осцилляций в ближнем детекторе принимают почти одинаковые значения, но в дальнем детекторе наблюдается достаточно большое расхождение между кривыми, определяемыми этими параметрами.

Из Рисунка 2.17 видно, что наибольшая вероятность осцилляций мюонного нейтрино в стерильное нейтрино будет наблюдаться для значения параметра  $\theta_{25} = 45^\circ$ . При данном значении параметра наибольшая вероятность наблюдать стерильное нейтрино будет наблюдаться для ближнего детектора и дальнего. Однако при значениях угла смешивания  $\theta_{25}$  более близким к общепринятым, вероятность наблюдения стерильного нейтрино будет больше для дальнего детектора, хотя ближний детектор также останется чувствителен к поиску стерильных нейтрино при значениях  $\theta_{25} = 0^\circ$  и  $\theta_{25} = 10^\circ$ . При значениях угла  $\theta_{25} = 90^\circ$  — нулевая вероятность наблюдать стерильное нейтрино.

Рисунок 2.18 показывает графики вероятности осцилляций при изменении параметра  $\theta_{35}$ . Наибольшая вероятность наблюдать стерильное нейтрино

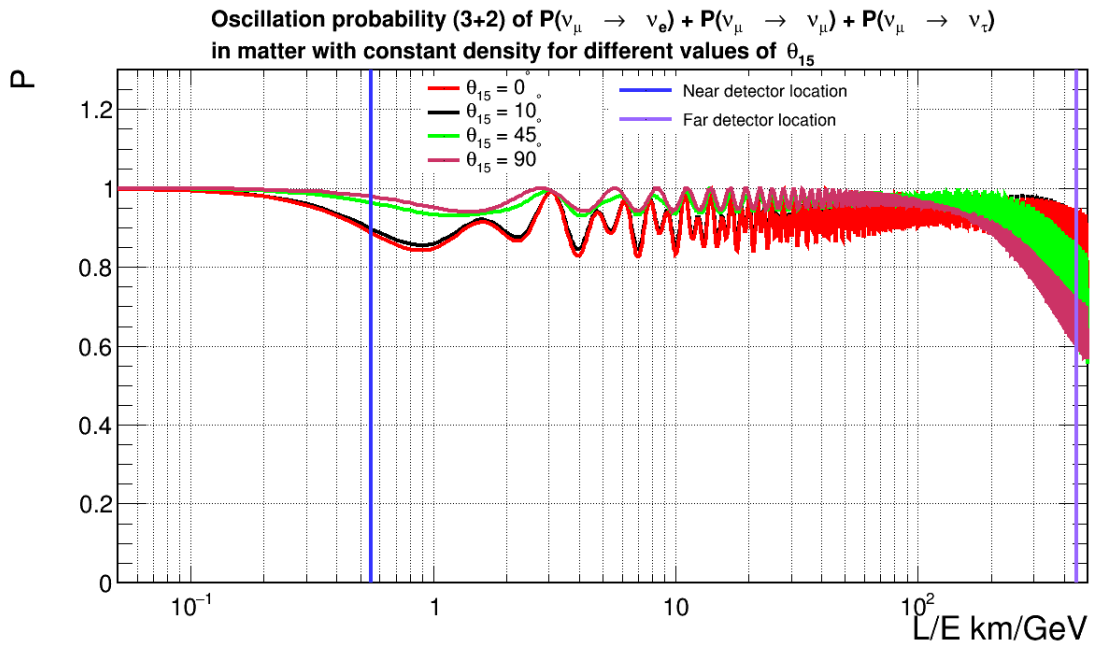


Рис. 2.16: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{25}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ .

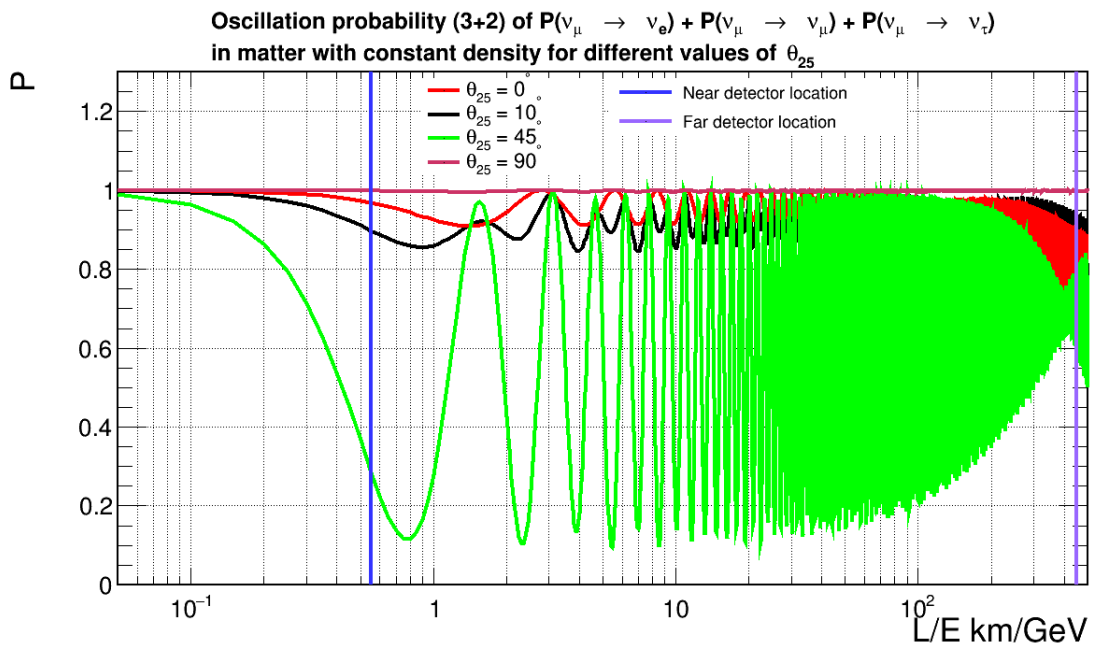


Рис. 2.17: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{25}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ .



будет для дальнего детектора при значении параметра  $\theta_{35} = 90^\circ$ . Для ближнего детектора при аналогичном значении угла смешивания вероятность осцилляций будет минимальна. Наибольшее значение вероятности наблюдается в ближнем детекторе при значении угла смешивания  $\theta_{35} = 0^\circ$ . Так же стоит отметить, что для ближнего детектора кривые, определяемые значениями углов смешивания  $\theta_{35} = 45^\circ, 90^\circ$  и  $\theta_{35} = 0^\circ, 10^\circ$ , лежат достаточно близко друг к другу. Однако для ближнего детектора наблюдается достаточно большое расхождение между кривыми для углов  $\theta_{35} = 0^\circ$  и  $\theta_{35} = 90^\circ$ ,  $\theta_{35} = 10^\circ$  и  $\theta_{35} = 90^\circ$ .

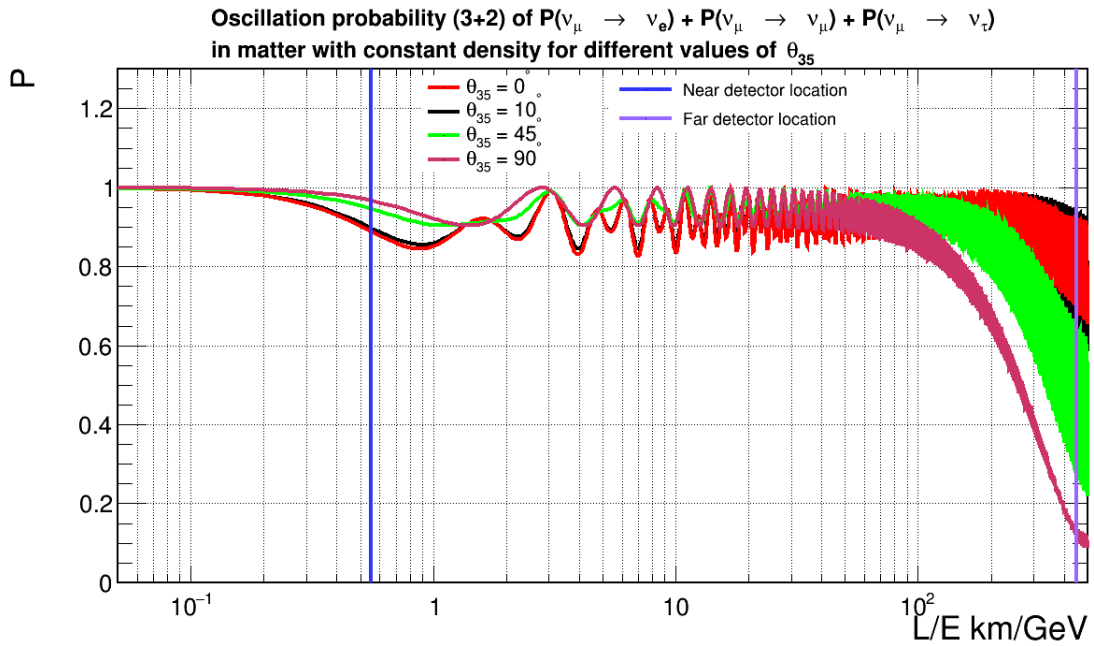


Рис. 2.18: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{35}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ .

## ВЫВОДЫ

Изучив все аспекты данной теории и проанализировав график для схем  $3+1$  и  $3+2$ , можно сделать следующие выводы

- Для стерильных нейтрино наблюдается МСВ - эффект также как и для обычных нейтрино (см. Секция 2.3).
- Для схемы осцилляций  $3+1$  наблюдаются осцилляции нейтрино (см. Секция 2.3). При параметрах осцилляций наиболее приближенных к общепринятым ближний детектор эксперимента NOvA не способен зарегистрировать стерильное нейтрино. При параметрах осцилляций, которые на несколько порядков больше общепринятых параметров, в ближнем детекторе будут наблюдаться осцилляции. Следовательно, можно сделать вывод, что ближний и дальний детекторы эксперимента NOvA способны зарегистрировать стерильное нейтрино. Однако для данной осцилляционной схемы стерильное нейтрино с большей вероятностью будет зарегистрировано дальним детектором.
- Для схемы  $3+2$  с данными параметрами осцилляции возможны и в дальнем, и в ближнем детекторе (см. Секция 2.5). В ближнем детекторе будут наблюдаться осцилляции с меньшей вероятностью. Однако при значении угла смешивания  $\theta_{25} = 45^\circ$  пик вероятности осцилляций приходится на расположение ближнего детектора. Во всех остальных случаях пики будут приходиться на расположение дальнего детектора. Следовательно, эксперимент NOvA чувствителен к поиску стерильных нейтрино для схемы осцилляций  $3+2$ . С наибольшей вероятностью стерильное нейтрино будет зарегистрировано в дальнем детекторе.
- На основе всего выше сказанного заключаем, что эксперимент NOvA чувствителен к поиску стерильных нейтрино.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Л.Б. Окунь Лептоны и кварки, Москва, Изд-во «Наука», 1981.
2. Seon-Hee Seo REVIEW OF STERILE NEUTRINO EXPERIMENTS, Contribution to: 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 2020. С. 7.
3. MiniBooNE Collaboration, A.A. Aguilar-Arevalo Significant Excess of ElectronLike Events in the MiniBooNE Short-Baseline Neutrino Experiment, Phys.Rev.Lett. 121 (2018) 22, 221801, 2018. С. 7.
4. Kalpana Bora, Debajyoti Dutta, Pomita Ghoshal Probing Sterile Neutrino Parameters with Double Chooz, Daya Bay and RENO, JHEP 12 025, 2012. С. 13.
5. O. Yasuda Sensitivity to sterile neutrino mixings and the discovery channel at a neutrino factory, Invited talk at Fifth International Conference on BEYOND THE STANDARD MODELS OF PARTICLE PHYSICS, COSMOLOGY AND ASTROPHYSICS, Cape Town, South Africa, 2010. С. 14.
6. B. Pontecorvo NEUTRINO EXPERIMENTS AND THE PROBLEM OF CONSERVATION OF LEPTONIC, Sov. Phys. JETP 26 (1968) 984 [Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53 (1967) 1717], 1968. С. 984 – 988.
7. P. Adamson et al. (MINOS Collaboration) Limits on Active to Sterile Neutrino Oscillations from Disappearance Searches in the MINOS, Daya Bay, and Bugey-3 Experiments, Phys. Rev.Lett. 117, 2016. С. 8.
8. NOvA Collaboration, P. Adamson(Fermilab) Search for active-sterile neutrino mixing using neutral-current interactions in NOvA, Phys.Rev.D 96 (2017) 7, 072006, 2017. С. 9.
9. J.M. Conrad, M.H. Shaevitz Sterile Neutrinos: An Introduction to Experiments, Adv.Ser.Direct.High Energy Phys. 28 (2018) 391-442, 2016. С. 52.
10. A. Yu. Smirnov The MSW effect and Matter Effects in Neutrino Oscillations, Phys.Scripta T 121 (2005) 57-64, 2004. С. 57 – 64.

11. Alessandro Strumia Neutrino masses and mixings and..., see-saw at LHC, plot of neutrino/nucleon cross section, extra diagram of loop mediation of neutrino masses; spectral split of supernova neutrinos due to collective oscillations; nuclear matrix elements for  $0\nu 2\beta$ ,  $\theta_{13}$  prediction contest, latest data from KamLAND, Borexino, Auger, Cuoricino, NuMi (including the hint for  $\theta_{13}$ ), 2010. C. 243.
12. Gazal Sharma, B. C. Chauhan Investigating the sterile neutrino parameters with QLC in  $3 + 1$  scenario, Advances in High Energy Physics, vol. 2019, Article ID 4685198, 2019. C. 10.
13. M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018) and 2019 update.
14. Carlo Giunti, Marco Laveder  $3+1$  and  $3+2$  Sterile Neutrino Fits, Phys.Rev.D 84 (2011) 073008, 2011. C. 9.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

В данном разделе приведены рисунки, показывающие вероятности осцилляций в дальнем детекторе. Они представлены в увеличенном масштабе. Увеличение масштаба позволяет четко видеть вероятности осцилляций для дальнего детектора. Рисунки в этом разделе явно демонстрируют, описанные в Разделе 2.5 предположения о максимальном значении вероятности осцилляций в дальнем детекторе.

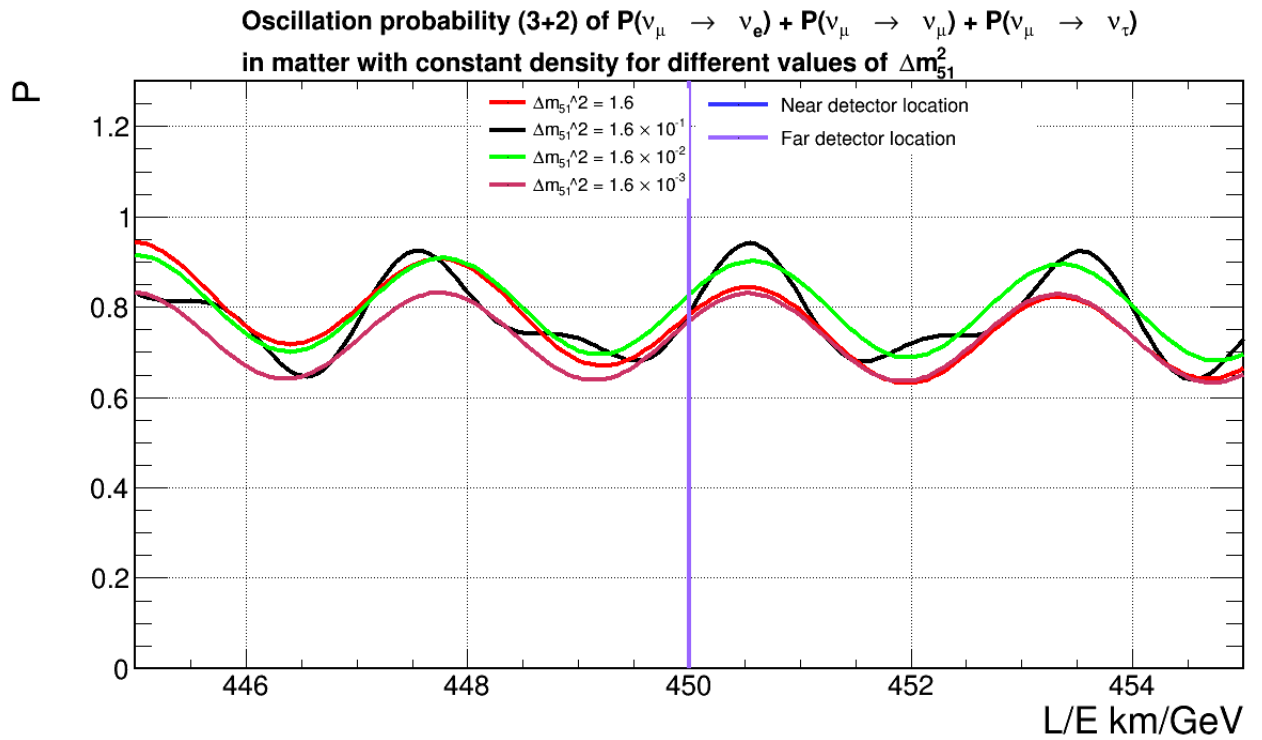


Рис. 2.19: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\Delta m_{51}^2$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ . График показывает осцилляции в дальнем детекторе.

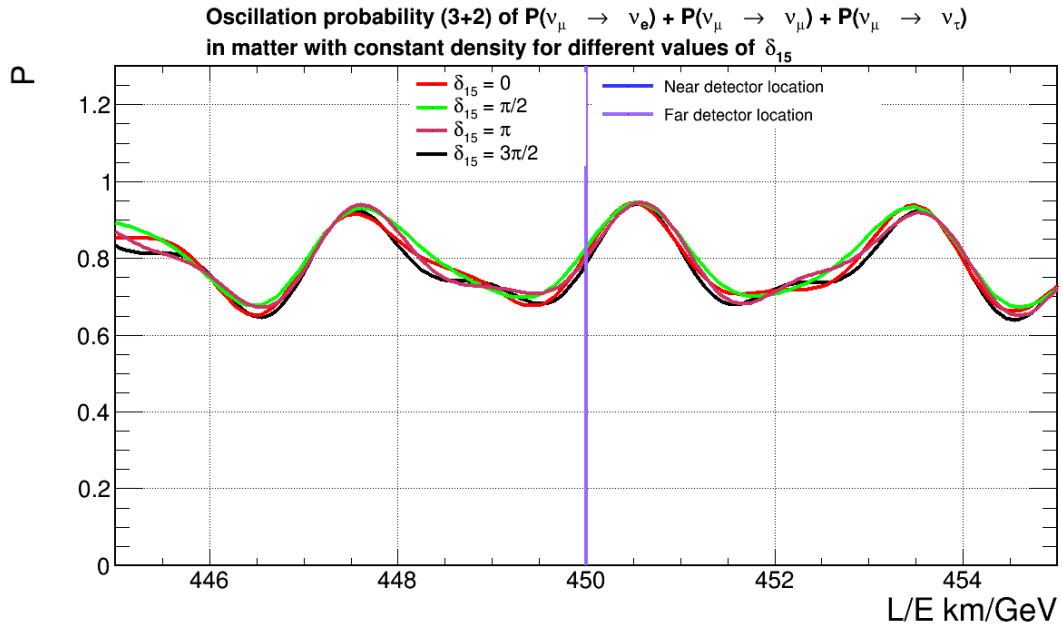


Рис. 2.20: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\delta_{15}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ . График показывает осцилляции в дальнем детекторе.

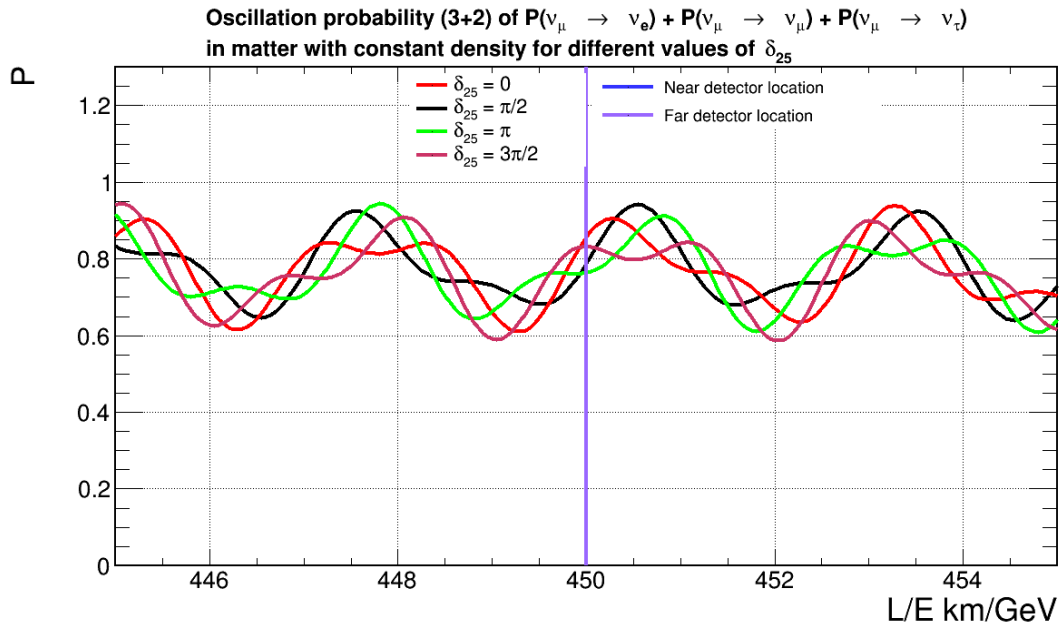


Рис. 2.21: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\delta_{25}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ . График показывает осцилляции в дальнем детекторе.

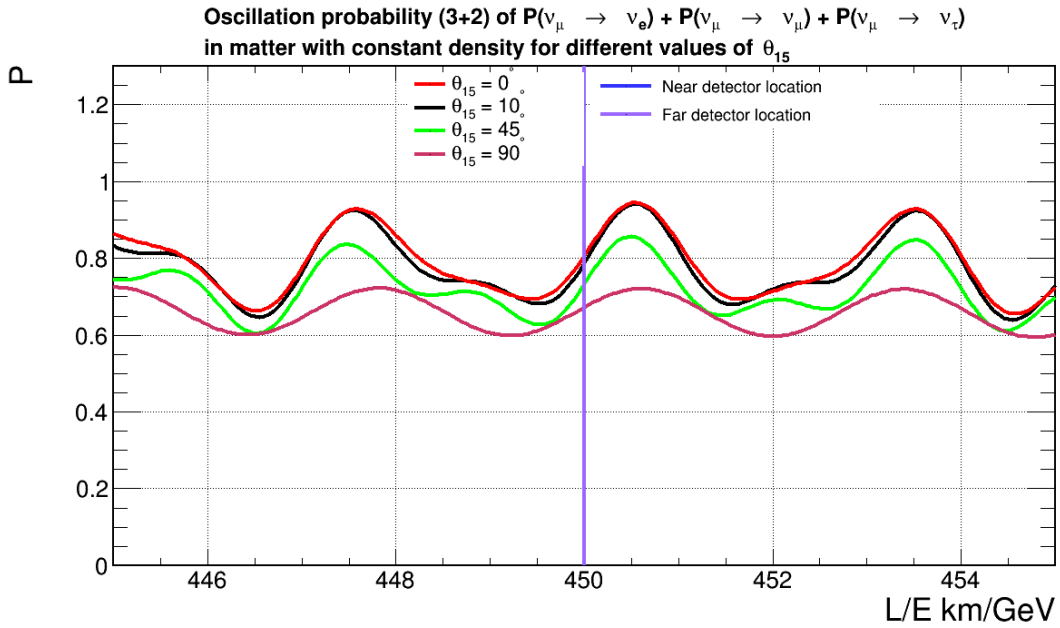


Рис. 2.22: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{15}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ . График показывает осцилляции в дальнем детекторе.

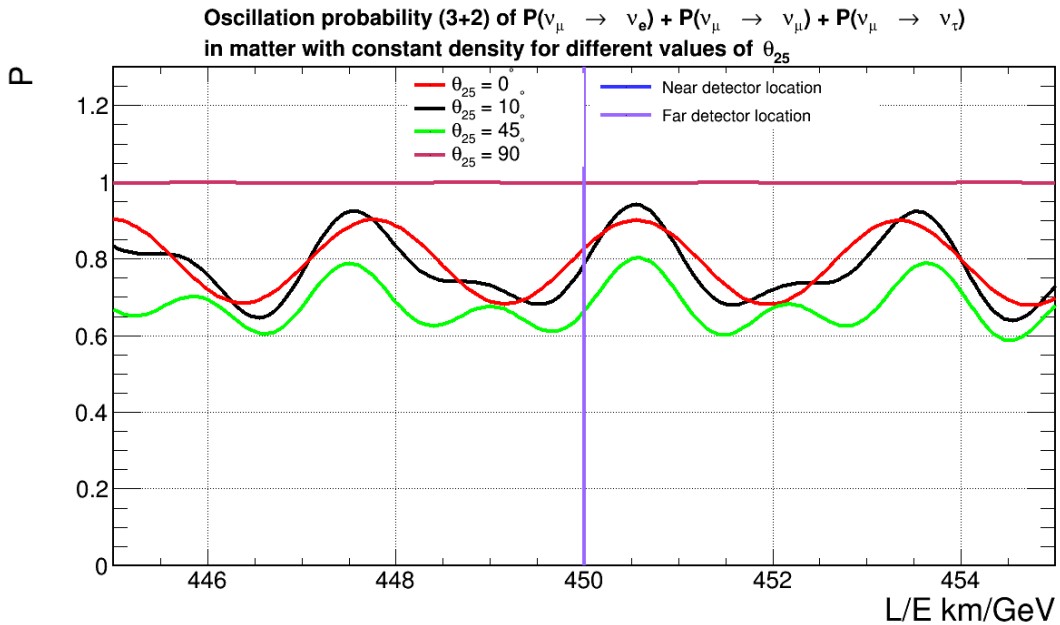


Рис. 2.23: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{25}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ . График показывает осцилляции в дальнем детекторе.

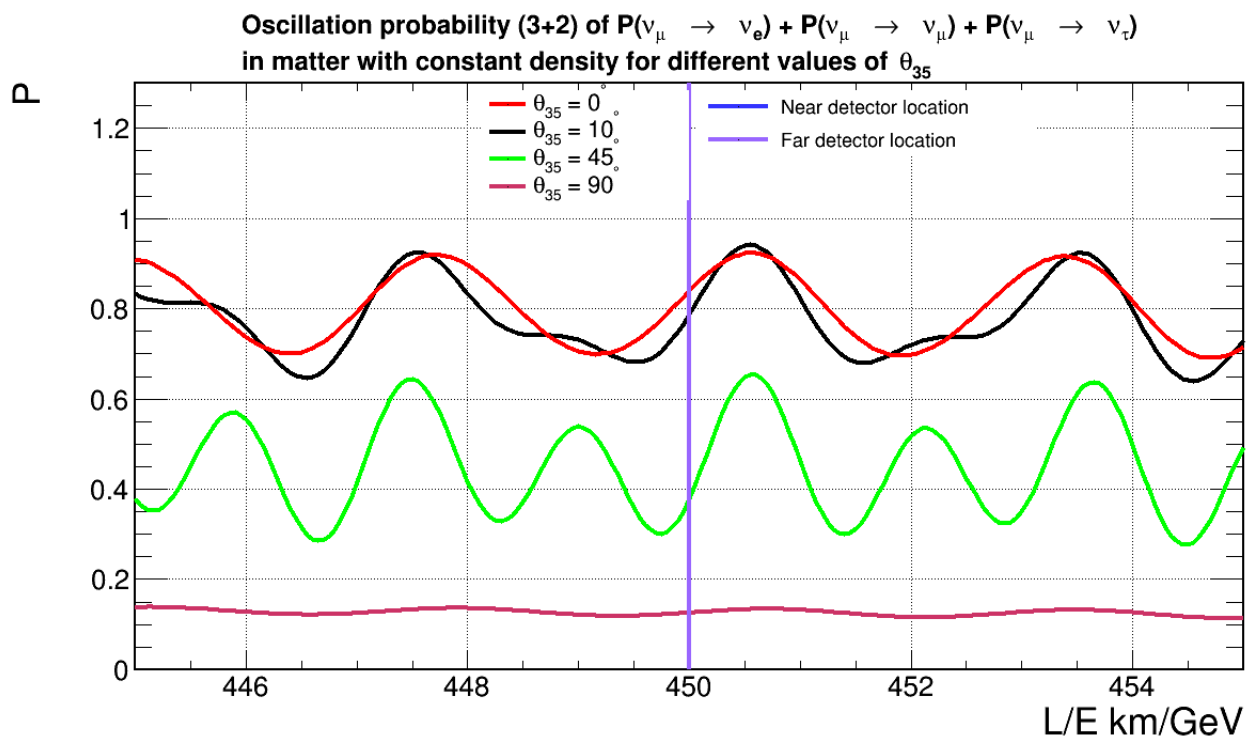


Рис. 2.24: График зависимости вероятности осцилляций от отношения расстояния до детектора к энергии пучка для различных значений  $\theta_{35}$ . График демонстрирует сумму вероятностей осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в присутствии двух стерильных нейтрино в веществе с плотностью  $\rho$ . График показывает осцилляции в дальнем детекторе.