

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА R2O  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПУЧКОВ  
НЕЙТРИНО**

Студент

\_\_\_\_\_ Т. В. Махкамов

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ В. О. Тихомиров

Научный консультант,  
д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ А. А. Соколов

Москва 2023

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА  $P_{20}$   
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПУЧКОВ  
НЕЙТРИНО**

Студент	_____ Т. В. Махкамов
Научный руководитель, к.ф.-м.н., доцент	_____ В. О. Тихомиров
Научный консультант, д.ф.-м.н., проф.	_____ А. А. Соколов
Рецензент, к.ф.-м.н., с.н.с.	_____ В. Н. Горячев
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Проект P2O</b>	<b>5</b>
1.1 Общее описание проекта . . . . .	5
1.2 Ускоритель в Протвино . . . . .	5
<b>2 Осцилляции нейтрино</b>	<b>9</b>
2.1 Осцилляции нейтрино . . . . .	9
2.2 Осцилляции нейтрино в вакууме . . . . .	10
2.3 Осцилляции нейтрино в веществе . . . . .	13
<b>3 Построение модели с использованием ПО GEANT4</b>	<b>15</b>
3.1 Описание нейтринного канала . . . . .	15
3.2 Модель образования пучка . . . . .	16
3.3 Модель распада пучка . . . . .	18
<b>4 Моделирование в GLoBES</b>	<b>24</b>
4.1 Программный пакет GLoBES . . . . .	24
4.2 AEDL-файл . . . . .	24
4.3 Вероятности осцилляций в GLoBES . . . . .	24
4.4 Систематические ошибки и расчёт $\chi^2$ в GLoBES . . . . .	27
4.5 Чувствительности в GLoBES . . . . .	28
4.5.1 Чувствительность эксперимента P2O к определению иерархии масс нейтрино . . . . .	29
4.5.2 Чувствительность эксперимента P2O к определению нарушения CP-симметрии . . . . .	30
<b>Заключение</b>	<b>31</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>32</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	<b>33</b>
Условные обозначения . . . . .	33
Таблица данных . . . . .	34

# ВВЕДЕНИЕ

Физика нейтрино является одной из наиболее интересных областей науки, начиная с момента открытия нейтрино в 1956 году, вплоть до настоящего времени. Одной из главных особенностей нейтрино, которая привлекает так много внимания ученых, является ее способность изменять свой "аромат" при прохождении через вакуум или вещество, называемое осцилляцией. Хотя существует также смешивание ароматов кварков, но пока неизвестно, являются ли эти механизмы аналогичными. Изучение осцилляций нейтрино - это один из последних этапов, необходимых для подтверждения полноты и правильности расширенной Стандартной модели физики элементарных частиц, на которой основываются современные представления о микромире.[5]

Одним из проектов в изучении физики нейтрино, предложенным на текущий момент, является проект P2O (Protvino to ORCA). Этот эксперимент включает в себя ближний и дальний детекторы, которые будут использоваться для исследования высокоинтенсивного пучка мюонных нейтрино  $\nu_\mu$  и антинейтрино  $\bar{\nu}_\mu$ . Чтобы получить такой пучок нейтрино, высокоэнергетический пучок протонов направляется на медную мишень, что приведет к образованию вторичных пионов и каонов, а их распады, в свою очередь, породят пучок нейтрино. Первый (ближний) детектор необходим для точного измерения потока нейтрино и его состава по флейворам, а также для уменьшения систематических ошибок. Магнитные системы (квадрупольные линзы, дипольные магниты), установленные перед ближним детектором, могут фокусировать положительно заряженные мезоны  $\pi^+$  и  $K^+$  или отрицательно заряженные мезоны  $\pi^-$  и  $K^-$ , что позволяет работать в двух режимах: FHC (нейтрино) и RHC (антинейтрино).

Образованные нейтрино будут проходить до дальнего детектора расстояние примерно 2595 км, что достаточно для исследования эффектов, CP нарушения и иерархии масс нейтрино. Детекторные комплексы будут расположены под землей (ближний детектор) либо под водой (дальний детектор) для защиты от воздействия космических лучей. В рамках этого эксперимента будут исследоваться явления в широком энергетическом диапазоне нейтрино от 2 до 10 ГэВ для изучения физики нейтринных осцилляций в контексте трехфлейворных состояний нейтрино расширенной Стандартной модели.

На данный момент весь комплекс нейтринных экспериментов измерил пять осцилляционных параметров:  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{13}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\Delta m^2_{21}$  и  $\Delta m^2_{31}$ . Оста-

ются неизвестными:

- октант, в котором находится угол смешивания  $\theta_{23}$ ;
- $\delta_{CP}$  фаза связанная с нарушением комбинированной чётности;
- иерархия масс нейтрино (знак  $\Delta m^2_{31}$ );

Ключевой задачей проекта P2O в физике осцилляций нейтрино является измерение неизвестных параметров и уточнение всех уже измеренных параметров. Если эта задача будет выполнена успешно, то в рамках трехфлейворной парадигмы нейтринных состояний будет возможно полностью описать явление осцилляций.

Цель данной работы заключается в расчете чувствительности проекта P2O к измерению параметров осцилляций нейтрино. С помощью моделирования данного ускорительного эксперимента планируется предсказать, насколько успешным может быть реальный запланированный эксперимент.

Задачи работы:

- 1) изучить эксперимент P2O
- 2) изучить процесс осцилляций нейтрино в вакууме и веществе;
- 3) провести моделирование эксперимента в GLoBES;
- 4) рассчитать чувствительность P2O[1] к определению иерархии масс нейтрино, к измерению фазы  $\delta_{CP}$ ;
- 5) построить модель в GEANT4;
- 6) построить графики вклада фокусированного пучка;

# 1 ПРОЕКТ P2O

## 1.1 ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА

Ускорительный комплекс протонов У-70, расположенный в Протвино Московской области, дает возможность создавать мощные пучки нейтрино, с целью проведения обширных экспериментальных исследований физики нейтрино. Особый интерес представляет возможность направления нейтринного пучка из Протвино на детектор KM3NeT/ORCA, который в настоящее время сооружается в Средиземном море в 40 км от побережья Тулона, Франция. Этот эксперимент известен как P2O. Благодаря длинному пролету пучка в 2595 км, эксперимент обеспечит уникальную чувствительность к взаимодействию с материей Земли, что позволит определить иерархию масс нейтрино с высокой точностью уже в течение нескольких лет работы при умеренной интенсивности пучка около 90 кВт. С длительной экспозицией, в течение 5 лет работы такого пучка возможно достичь чувствительности  $2\sigma$  при измерении нарушения CP-симметрии в лептонном секторе. Кроме того, на данной установке возможно проведение эксперимента по поиску стерильного нейтрино с использованием короткой базы.

## 1.2 УСКОРИТЕЛЬ В ПРОТВИНО

Ускорительный комплекс У-70, расположенный в Протвино приблизительно в 100 км к югу от Москвы, включает в себя синхротрон У-70 с радиусом 1,5 км. Этот синхротрон был построен в 1960-х годах и до сих пор активно используется. Система инжекции протонов включает источник протонов, линейный ускоритель протонов с энергией 30 МэВ и ускоритель протонов с энергией 1,5 ГэВ. Синхротрон работает с энергией пучка от 50 ГэВ до 70 ГэВ и может достигать интенсивности до  $1.5 \times 10^{13}$  протонов за цикл. В прошлом, нейтринный пучок созданный на синхротроне использовался для различных экспериментов, включая пузырьковую камеру SKAT (1974-1992), спектрометр искровой камеры ИТЕР-ИНЕР, нейтринный детектор ИНЕР-JINR (1989-1995, 2002-2006) и другие. Эти эксперименты дали возможность измерить сечения нейтрино-нуклонных реакций, поставили ограничения на параметры осцилляций между электронными и мюонными нейтрино. Путем использования стальных мюонных поглотителей для предотвращения распада мюонов в полете и активной настройки спектра

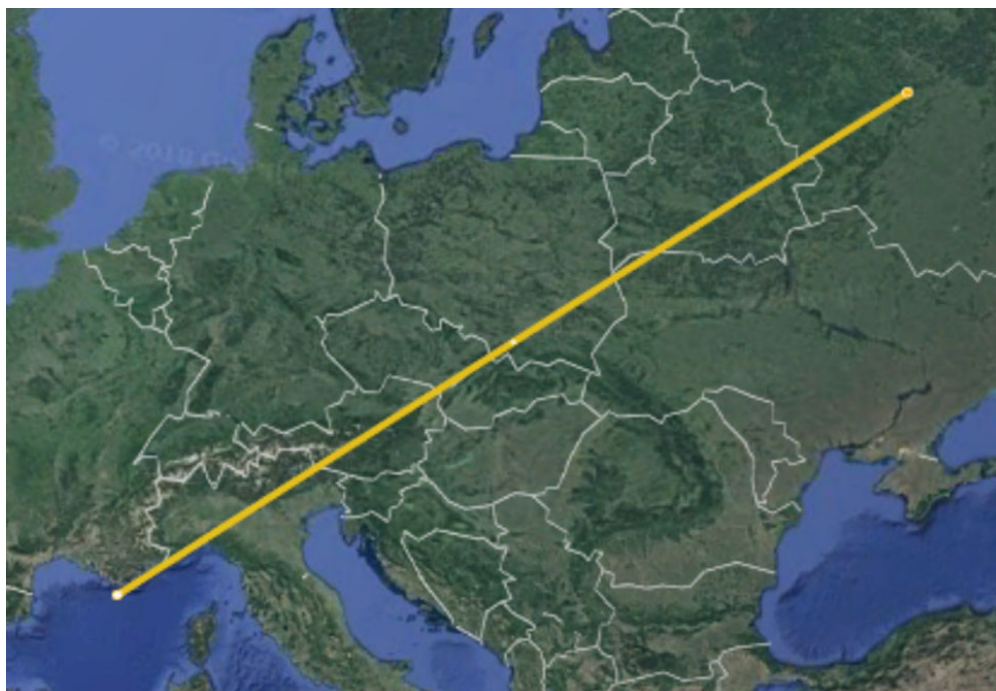


Рисунок 1.1 — Расстояние, которое пройдёт нейтринный пучок из Протвино (справа сверху) до ORCA (слева снизу)

пучка с помощью магнитных линз, можно получить высокоочищенный пучок мюонных нейтрино. В настоящее время нейтринный канал не функционирует, и его активные компоненты потребуют ремонта, если они будут использоваться в будущем. Однако остальная часть ускорительного комплекса У-70 находится в хорошем рабочем состоянии. Комплекс управляется Институтом физики высоких энергий (ИФВЭ), который является частью Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

В 1990-х годах на ИФВЭ рассматривалась новая схема введения протонов, которая позволила бы увеличить интенсивность пучка до  $5 \times 10^{13}$  протонов за цикл. Вместе с сокращением цикла до 7 секунд это обеспечит мощность пучка 75 кВт. После некоторых дополнительных улучшений, мощность пучка в 90 кВт может быть достигнута. Если предположить, что ускоритель будет работать по нейтринной программе с эффективностью 60% в течение 6 месяцев в году, то за один год работы пучка мощностью 90 кВт на мишень будет высаживаться  $\simeq 0.8 \times 10^{20}$  протонов.

Начальный состав и энергетический спектр нейтринного пучка должен контролироваться ближним детектором, который должен быть построен в нескольких сотнях метров от мишени ниже по направлению протонного пучка. Тот же самый пучок нейтрино и ближний детектор также позволят измерять нейтрино-нуклонные сечения. Также здесь возможен эксперимент по поиску стерильных нейтрино с короткой базой.

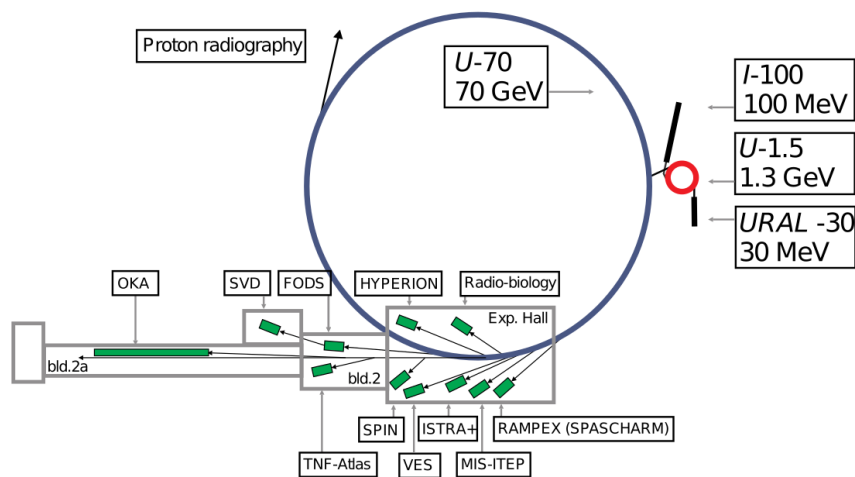


Рисунок 1.2 — Схематический вид ускорительного комплекса в Протвино.

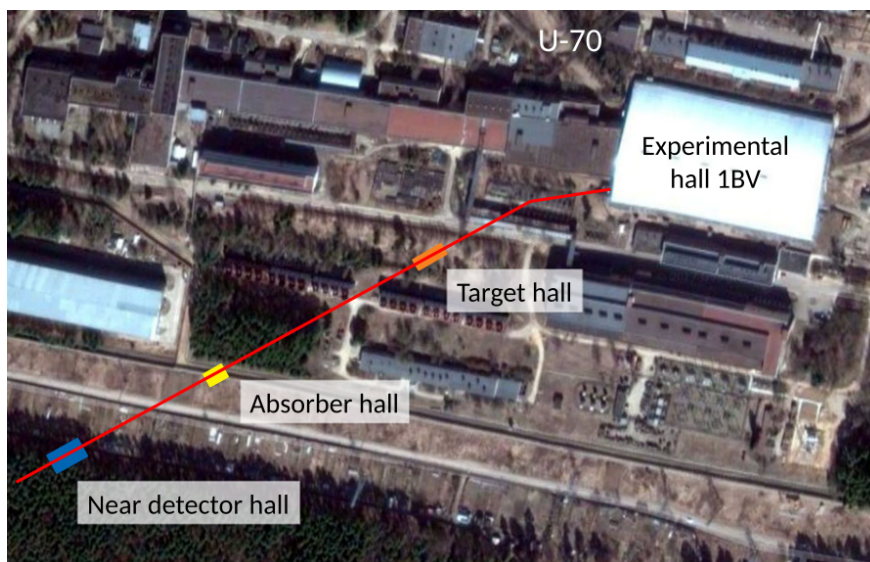


Рисунок 1.3 — Вид сверху и вид в разрезе предполагаемого прохода пучка

Для проведения эксперимента с длинной базой P2O пучок должен быть направлен к расположению ORCA, с углом наклона  $11.8^\circ$  ( $206$  мрад) к уровню горизонта. Самым длинным участком линии формирования нейтринного пучка 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 зал ближнего детектора  $\simeq 90$  м ниже уровня земли. Магниты позволят с помощью изменения полярности электрического тока выбрать режим нейтрино или антинейтрино. Моделирование 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 10 ГэВ. [8]



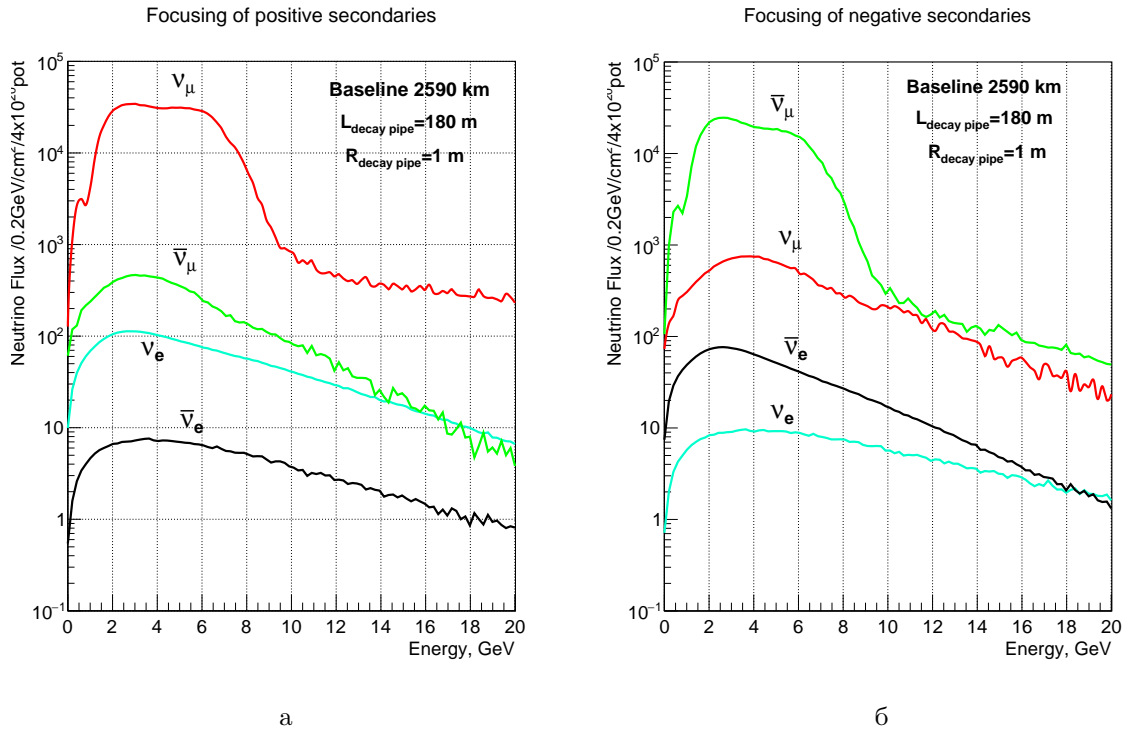


Рисунок 1.4 — Смоделированный спектр нейтринных пучков направленных на ORCA в режиме работы нейтрино (слева) и антинейтрино (справа). Пучок нормирован на значение  $4 \times 10^{20}$  протонов на мишень, что соответствует 1 году работы пучка мощностью 450кВт, или 5 годам работы с мощностью пучка 90кВт

В режиме антинейтрино может быть получен пучок антинейтрино с чистотой 94%. По сравнению со старым нейтринным каналом, ранее работавшим в Протвино, новая конструкция канала ставит следующие новые задачи:

- необходимость получения более высокой интенсивности пучка;
- сооружение канала в наклонном туннеле.

## 2 ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО

### 2.1 ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО

Для изучения процесса осцилляций нейтрино и антинейтрино при их прохождении через Землю на большое расстояние до дальнего детектора необходимо подробно рассмотреть этот процесс и ввести соответствующие величины, которые будут использоваться в данной работе.[3; 6]

В модели рассматриваются три массовых состояния нейтрино, обозначаемые как  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ , с соответствующими массами  $m_1, m_2, m_3$ . Существуют также три флейворных состояния нейтрино, участвующих в стандартном слабом взаимодействии, обозначаемые как  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ . Между массовыми и флейворными состояниями нейтрино существует связь, описываемая унитарной матрицей смешивания  $U$ :

$$\begin{pmatrix} \nu_{e,L} \\ \nu_{\mu,L} \\ \nu_{\tau,L} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}}_U \begin{pmatrix} \nu_{1,L} \\ \nu_{2,L} \\ \nu_{3,L} \end{pmatrix}$$

или

$$\nu_{\alpha,L} = \sum_i U_{\alpha i} \nu_{i,L}$$

где  $\nu_i$  — поле дираковских нейтрино и антинейтрино с массой  $m_i$ ,  $\nu_\alpha$  — поле флейворных нейтрино,  $L$  - индекс, показывающий, что нейтрино - левокиральные. Антинейтрино правокиральные. Лептонное число для нейтрино равно  $L_\nu = 1$ , для антинейтрино -  $L_{\bar{\nu}} = -1$

Таким образом, вектор состояний флейворных нейтрино выражается через вектор состояний нейтрино с массой  $m_i$  [6] :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha,i}^* |\nu_i\rangle \quad (2.1)$$

Флейворное состояние нейтрино - это когерентная суперпозиция состояний нейтрино с различными массами.

## 2.2 ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО В ВАКУУМЕ

Уравнения Шрёдингера (УШ) для осцилляций нейтрино в вакууме:

$$i \frac{\partial |\Psi(t)\rangle}{\partial t} = H |\Psi(t)\rangle \quad (2.2)$$

Вектор  $|\Psi\rangle$  раскладывается по системе состояний нейтрино с ароматами  $|\nu_\alpha\rangle$ :

$$|\Psi\rangle = \sum_{\alpha} a_{\alpha}(t) |\nu_{\alpha}\rangle$$

Стационарное УШ для собственных векторов состояний нейтрино с массами  $m_i$  имеет вид:

$$H |\nu_i\rangle = E_i |\nu_i\rangle, E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2E}$$

Амплитуда вероятности найти  $\nu_\alpha$  в состоянии  $|\Psi(t)\rangle$  :

$$a_{\alpha}(t) = \langle \nu_{\alpha} | \Psi(t) \rangle$$

Тогда уравнение 2.2 преобразуется в:

$$i \frac{\partial a_{\alpha'}(t)}{\partial t} = \sum_{\alpha} \langle \nu_{\alpha'} | H | \nu_{\alpha} \rangle a_{\alpha}(t) \quad (2.3)$$

Из равенства 2.1 справедливо, что  $\langle \nu_{\alpha} | \nu_i \rangle = U_{\alpha,i}$ ,  $\langle \nu_i | \nu_{\alpha} \rangle = U_{\alpha,i}^*$  и, следовательно:

$$\langle \nu_{\alpha'} | H | \nu_{\alpha} \rangle = \sum_i U_{\alpha',i} E_i U_{\alpha,i}^* = p + \sum_i U_{\alpha',i} \frac{m_i^2}{2E} U_{\alpha,i}^*$$

Уравнение Шрёдингера 2.3 приводится к:

$$i \frac{\partial a(t)}{\partial t} = U \frac{m^2}{2E} U^{\dagger} a(t) \quad (2.4)$$

Заменой  $a'(t) = U^{\dagger} a(t)$  получается:

$$i \frac{\partial a'(t)}{\partial t} = \frac{m^2}{2E} a'(t)$$

решение которого  $a'(t) = e^{-i \frac{m^2}{2E} (t-t_0)} a'(t_0)$ , а решение уравнения 2.4 имеет вид:

$$a(t) = U e^{-i \frac{m^2}{2E} (t-t_0)} U^{\dagger} a(t_0)$$

где  $t_0$  – начальное время. Вероятность перехода  $\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}$  будет:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = \left| \sum_i U_{\alpha',i} e^{-i\Delta m_{\alpha,i}^2 \frac{L}{2E}} U_{\alpha,i}^* \right|^2, i = 2, 3 \quad (2.5)$$

или

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = \left| \delta_{\alpha\alpha'} + \sum_i U_{\alpha',i} U_{\alpha,i}^* \left( e^{-i\Delta m_{i1}^2 \frac{L}{2E}} - 1 \right) \right|^2, i = 1, 2, 3 \quad (2.6)$$

Видно, что вероятность зависит от соотношения  $L/E$  и что нейтринные осцилляции будут происходить, если выполняется соотношение  $\Delta m_{i1}^2 L/E \geq 1$ , хотя бы для одного из значений  $i = 2, 3$ . Также справедливо равенство  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = P(\bar{\nu}_{\alpha'} \rightarrow \bar{\nu}_\alpha)$ , являющееся следствием СРТ-инвариантности.[11] Если есть и СР-инвариантность в лептонном секторе, то должно быть верно равенство:  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_{\alpha'})$

Рассмотрим осцилляции нейтрино в предположении, что существует какие-либо два из трёх флейворов. Индекс  $\alpha$  может принимать значения  $\mu, e$  или  $\mu, \tau$  и т.д.

Формула 2.6 для появления нейтрино  $\alpha'$ -аромата из  $\alpha$  примет вид:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = \left| \delta_{\alpha\alpha'} + U_{\alpha',2} U_{\alpha,2}^* \left( e^{-i\Delta m^2 \frac{L}{2E}} - 1 \right) \right|^2, \Delta m = m_2 - m_1 \quad (2.7)$$

Если ввести амплитуду вероятности  $A_{\alpha,\alpha'} = 4 |U_{\alpha',2}|^2 |U_{\alpha,2}|^2 = A_{\alpha',\alpha}$ , отражающую возможность найти нейтрино в момент времени  $t$  в состоянии  $\nu_{\alpha'}$ , если в начальный момент времени  $t_0 = 0$ , оно находилось в состоянии  $\nu_\alpha$ , то:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = \frac{1}{2} A_{\alpha',\alpha} \left( 1 - \cos \left( \Delta m^2 \frac{L}{2E} \right) \right), \alpha \neq \alpha' \quad (2.8)$$

Амплитуду вероятности  $A_{\alpha',\alpha}$  можно представить через угол смешивания  $\theta$

$$\begin{aligned} A_{\alpha',\alpha} &= 4 |U_{\alpha,2}|^2 |U_{\alpha',2}|^2 = 4 |U_{\alpha,2}|^2 (1 - |U_{\alpha,2}|^2)^2 \\ &= 4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta = \sin^2 2\theta \end{aligned}$$

Формула 2.8 преобразуется в:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left( 1 - \cos \left( \Delta m^2 \frac{L}{2E} \right) \right), \alpha \neq \alpha'$$

Из закона сохранения вероятность исчезновения нейтрино  $\alpha$ -аромата определяется:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos\left(\Delta m^2 \frac{L}{2E}\right)\right), \alpha \neq \alpha'.$$

И заключительный этап - учёт нормировки используемых единиц измерения:

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos\left(2.53 \Delta m^2 \frac{L}{2E}\right)\right) = \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{2E}\right), \alpha \neq \alpha'. \end{aligned} \quad (2.9)$$

В этой формуле  $\Delta m^2$  в эВ<sup>2</sup>,  $L$  в км,  $E$  в ГэВ. На 2.1 представлен график вероятности появления нейтрино нового аромата в вакууме, описываемый двумя осцилляционными параметрами  $\sin^2 2\theta$  и  $\Delta m^2$  формулы 2.9

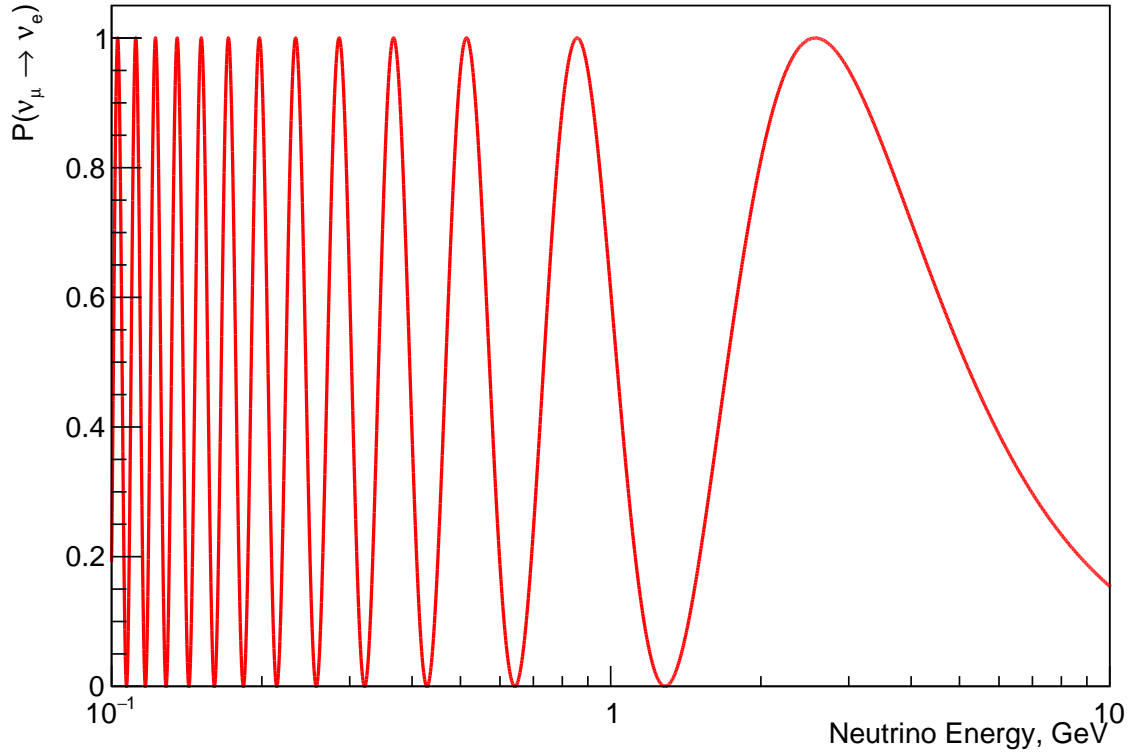


Рисунок 2.1 — Вероятность осцилляций из нейтрино мюонного в нейтрино электронное в вакууме:  $\Delta m = 2.451 \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup>,  $\theta = \pi/4$ ,  $L = 2595$  км.

Стоит заметить, что при осцилляциях в рамках двух ароматов нарушения CP-симметрии наблюдаться не может, т.к. справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) &= P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_{\alpha'}) \\ P(\nu_{\alpha'} \rightarrow \nu_\alpha) &= P(\bar{\nu}_{\alpha'} \rightarrow \bar{\nu}_\alpha) \end{aligned}$$

Для трёх типов нейтрино из соотношения  $\Delta m_{32}^2 \gg \Delta m_{21}^2$  следует, что формула для вероятностей осцилляций для любых из трех ароматов из-за малости отношения параметров  $\frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{32}^2}$  сохраняет вид, как у формулы 2.7:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\alpha'}) = \left| \delta_{\alpha\alpha'} + U_{\alpha',3} U_{\alpha,3}^* \left( e^{-i\Delta m_{32}^2 \frac{L}{2E}} - 1 \right) \right|^2, \Delta m_{32} = m_3 - m_2 \quad (2.10)$$

Видно, что фаза  $\delta_{CP}$  не входит в формулу 2.10, поэтому, чтобы исследовать CP-нарушение в лептонном секторе нельзя пренебрегать членом с  $\Delta m_{21}^2$ . Развернутое выражения для вероятности перехода нейтрино различных типов в приближении  $\Delta m_{12}^2 L/2E \ll 1$  можно записать так:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta_{13} \cdot \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 \left( 1.27 \Delta m_{23}^2 \frac{L}{E} \right),$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta_{23} \cdot \cos^4 \theta_{13} \cdot \sin^2 \left( 1.27 \Delta m_{23}^2 \frac{L}{E} \right) - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e),$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta_{13} \cdot \cos^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 \left( 1.27 \Delta m_{23}^2 \frac{L}{E} \right),$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \cdot \sin^2 \left( 1.27 \Delta m_{23}^2 \frac{L}{E} \right).$$

## 2.3 ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО В ВЕЩЕСТВЕ

Аналогичным образом из решения УШ, получается вероятность осцилляции нейтрино в веществе:

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 (2\theta_{13}) \cdot \frac{\sin^2 (\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \Delta_{31}^2 + \\ &+ \sin (2\theta_{23}) \cdot \sin (2\theta_{13}) \cdot \sin (2\theta_{12}) \cdot \frac{\sin (\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \cdot \frac{\sin(aL)}{(aL)} \cdot \Delta_{21} \cdot \cos (\Delta_{31} + \delta_{CP}) + \\ &+ \cos^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 (2\theta_{12}) \cdot \frac{\sin^2(aL)}{(aL)^2} \cdot \Delta_{21}^2, \end{aligned} \quad (2.11)$$

-где  $\Delta_{ij} = 1,27 \cdot \Delta m_{ij}^2 L/E (i, j = 1, 2, 3)$ ,  $a = G_F N_e / \sqrt{2}$  - эффект вещества, где  $G_F$  - константа Ферми,  $N_e$  - плотность числа электронов в Земле. При замене частиц античастицами изменяется знак у фазы  $\delta_{CP}$  и у эффекта вещества  $a$ .

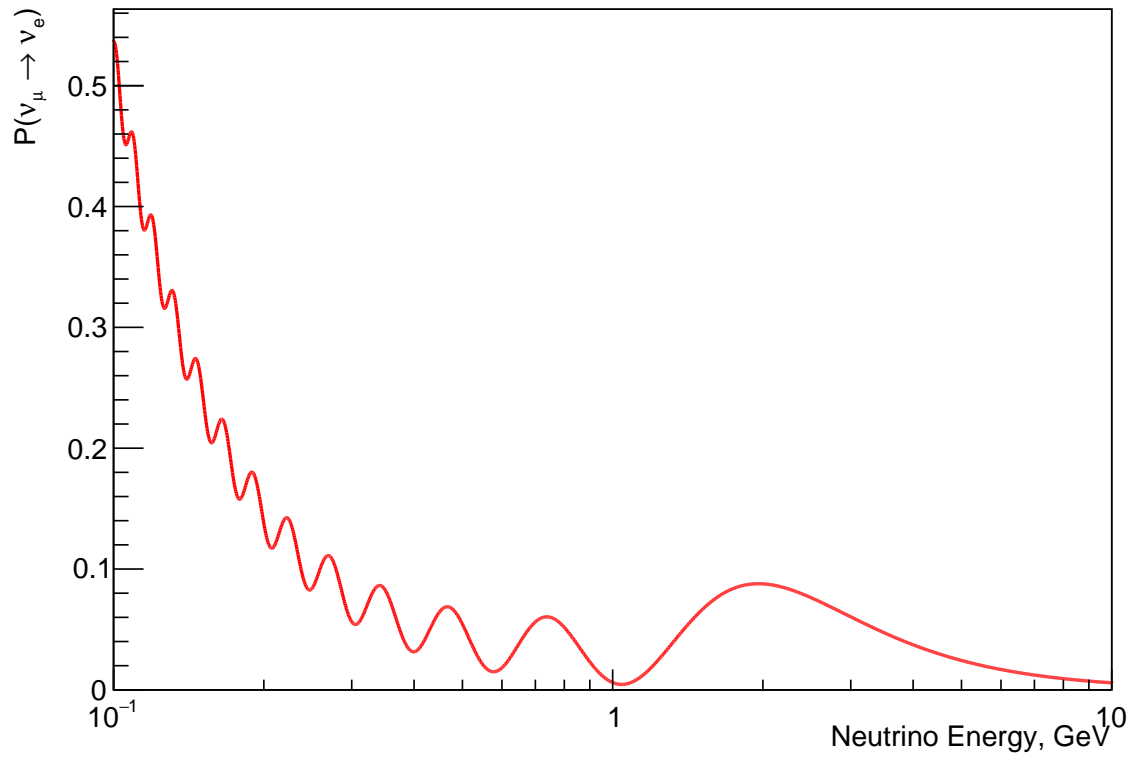


Рисунок 2.2 — Вероятность осцилляций из нейтрино мюонного в нейтрино электронное при нормальной иерархии масс:  $\Delta m = 2.451 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$ ,  $\theta = \pi/4$ ,  $L = 2595 \text{ км}$ .

## 3 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПО GEANT4

С использованием ПО GEANT4 была построена модель формирования нейтринного пучка на ускорительном комплексе У-70. Было смоделировано:

- 1) столкновение протона с медной мишенью, с последующим вылетом  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$  мезонов;
- 2) распад  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$  мезонов в канале распада, с вылетом  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$ ;

Целью построения данной модели, является изучение образования нейтринных пучков. Поскольку вылет  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$  мезонов из мишени является функцией  $d^2N/dpd\Omega$ , то в нейтринных экспериментах требуется информация об импульсе и угле вылета продуктов взаимодействия протона с областью мишени, как для дальнейшей их фокусировки, так и для получения кинематических параметров значений продуктов распада  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$ . Модель состоит из:

- Particle Gun - источник протонов( $p$ ) с энергией равной 70 ГэВ вылетающих вдоль оси z;
- Target - медная цилиндрическая мишень, на которую налетает пучок протонов, с длиной 50 см и радиусом 0.25 мм;

Стоит отметить, что моделирование взаимодействия частиц в медной мишени реализуется с помощью метода slices, который разбивает цилиндрическую область на отрезки длиной 1 мм для оптимизации работы программы за счет вычета частиц с длинной пробега меньше 1 мм. Также, следует указать на необходимость размещения в исходной установке фокусирующего магнита, расположенного после мишени, который в данной модели не реализован.

### 3.1 ОПИСАНИЕ НЕЙТРИННОГО КАНАЛА

Для проведения тестового моделирования была написана программа, описывающая следующую установку: Как можно наблюдать на рисунке 3.1, существует 6 основных частей, с приведенными параметрами:

- ParticleGun - генератор частиц, находящийся в начале координат, из которого вылетает пучок протон с энергией 70 ГэВ;
- Target - медная цилиндрическая мишень, на которую налетает пучок протонов, с длиной 50 см и радиусом 0.25 мм;



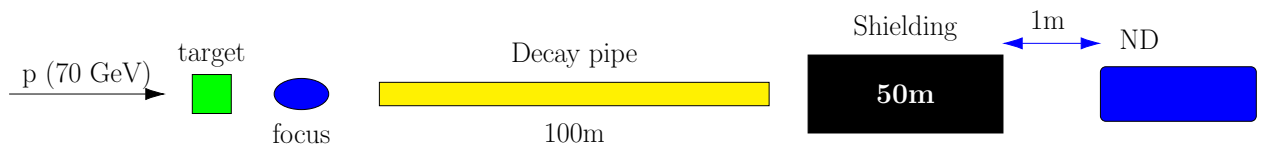


Рисунок 3.1 — Схема модулируемой установки

- focus - фокусирующая установка;
- Decay Pipe - вакуумная труба в которой летит сгенерированная частица, длиной 100 м и радиусом 1 м;
- Shielding - бетонный слой, длиной 50 м;
- ND - детектор, для регистрации нейтрино, радиусом 1 м, и длиной 50 м, отстоящий на 1 метр от Shielding слоя;

## 3.2 МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПУЧКА

В данной модели рассматривается прогонка протонов с пучком из  $10^5$  частиц, с исходной энергией в 70 ГэВ. Среднее число образовавшихся частиц на один протон, в результате взаимодействия протона с областью мишени показан на рисунке 3.2. При взаимодействии одного протона в среднем образуется  $15 \pi^\pm$  и  $1.3 K^\pm$  мезона. Необходимо учесть, что в итоговом спектре нужно взять в расчёт исключительно частицы вылетевшие за область мишени. На графике 3.3 можно наблюдать пики плотностей распределения у  $\pi^+$  и  $K^+$  мезонов при близком к нулю угле их вылета. На рисунке 3.5 показаны точки распада образовавшихся  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$  мезонов в отсутствие фокусирующей системы. Число пробегов на данном рисунке составляет 50000 протонов на мишень, также накладывается нижний предел на импульсы образовавшихся частиц  $p_{\pi^\pm, K^\pm} > 8$  ГэВ/с. Следует отметить, что лишь 10% от исходного пучка распадается в распадном канале в отсутствие квадрупольного фокусирования. На рисунке 3.6 изображены точки распада сфокусированного пучка, состоящего только из  $\pi^\pm$  мезонов с импульсами  $p_{\pi^\pm} > 8$  ГэВ/с полученного на ускорителе У-70.

```

=====
Beam particle                proton
Beam Energy(MeV)            70000
Number of events             1000
Average energy deposit (MeV) 3034   RMS(MeV) 2126
Average number of steps     5868
Average number of gamma     911.5
Average number of e-        648.9
Average number of e+        78.65
Average number of neutrons  31.16
Average number of protons   21.32
Average number of antiprotons 0.045
Average number of pi+ & pi- 15.21
Average number of pi0       8.579
Average number of kaons     1.396
Average number of muons     0.079
Average number of deuterons+tritons 8.129
Average number of He3+alpha 2.769
Average number of ions      6.479
Average number of forward neutrons 0.069
Average number of reflected neutrons 29.68
Average number of leaked neutrons 0.078
Average number of proton leak 9.442
Average number of pion leak 13.16
=====

```

Рисунок 3.2 — Среднее число образовавшихся частиц в результате взаимодействия

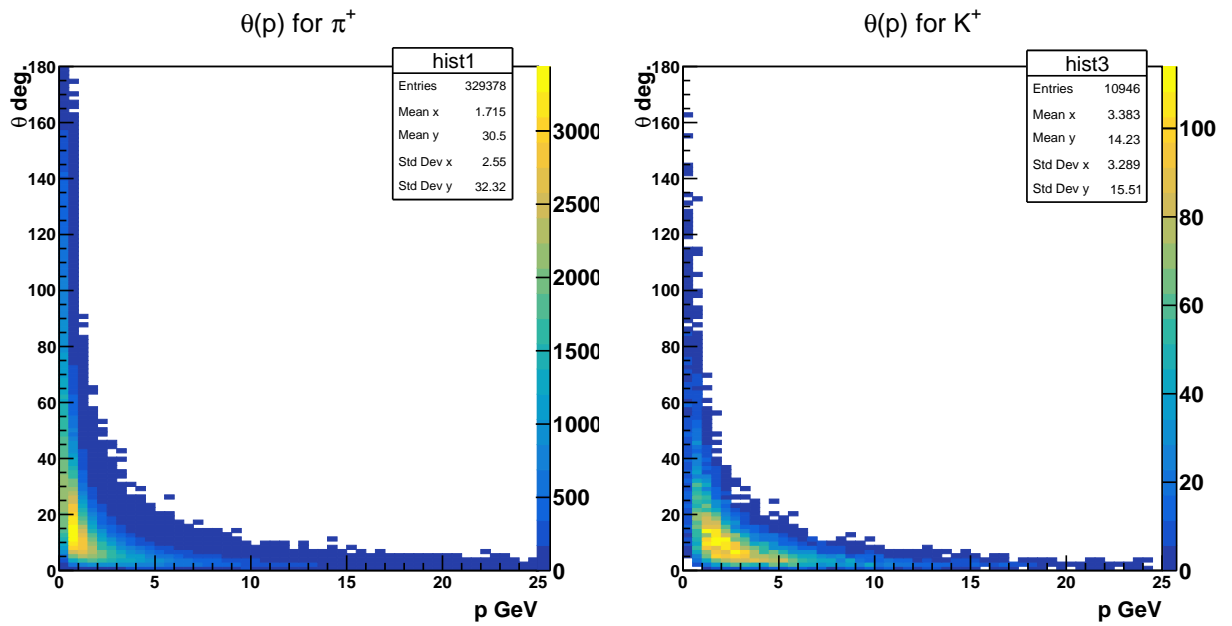


Рисунок 3.3 — Графики распределения импульса в зависимости от угла вылета  $\pi^+$  и  $K^+$  мезонов

Также по данным для сфокусированного пучка были построены распределения по импульсу, координате распада и углам  $\theta_x$  и  $\theta_y$  3.4. Можно наблюдать экспоненциальный характер распределения по координатам точек распада, и пик в диапазоне 10 ГэВ на графике распределения по импульсам, что попадает в исследуемый диапазон энергий родительских частиц нейтрино.

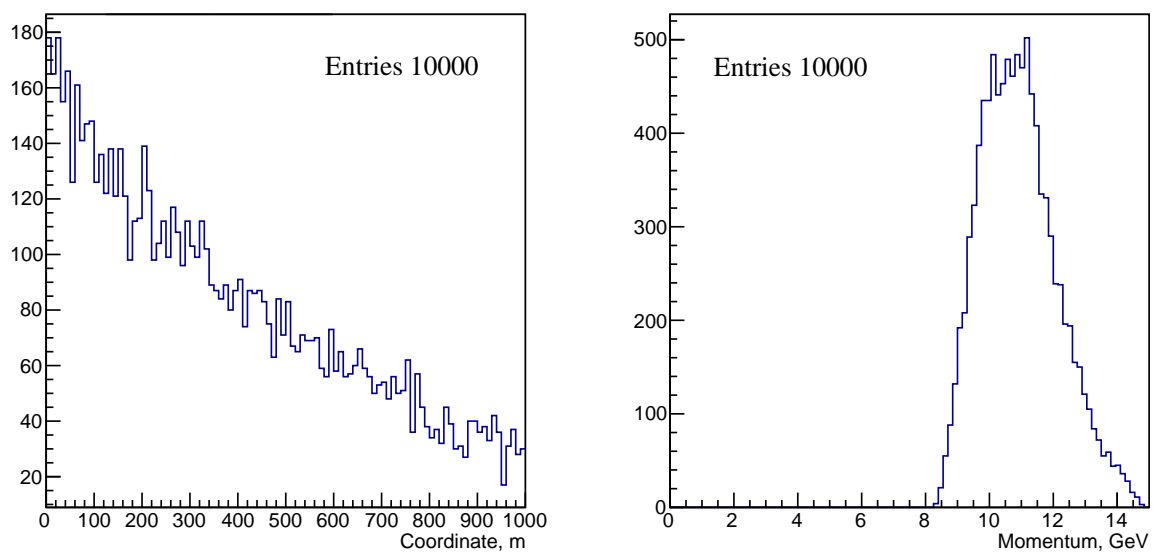


Рисунок 3.4 — Распределения длины пробега(слева) и импульса(справа) сфокусированных  $\pi^\pm$  мезонов

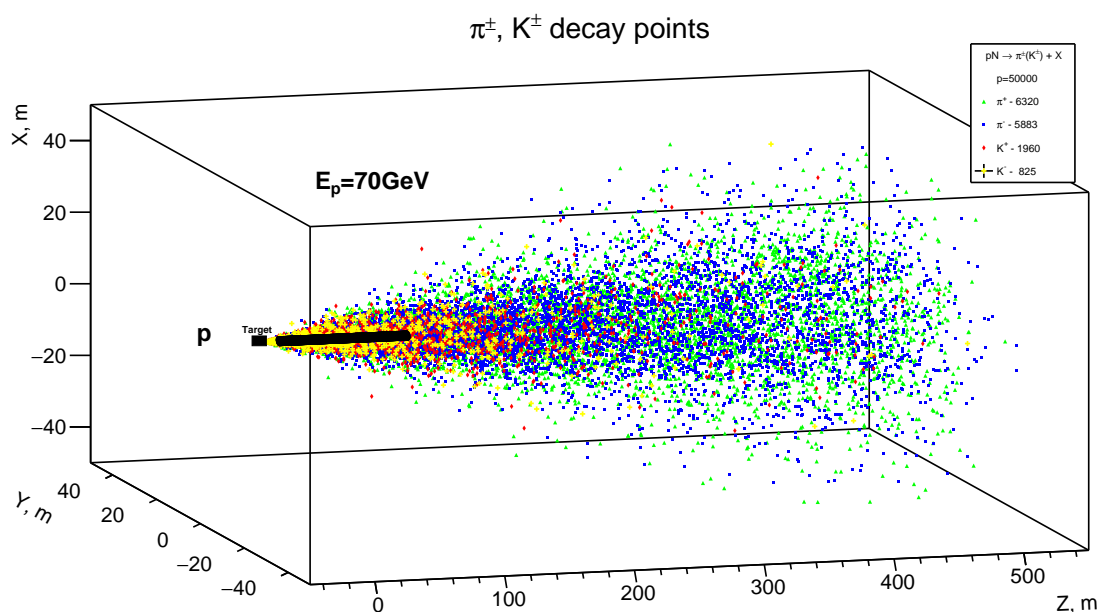


Рисунок 3.5 — Точки распада для нефокусированного  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$  мезонов из модели

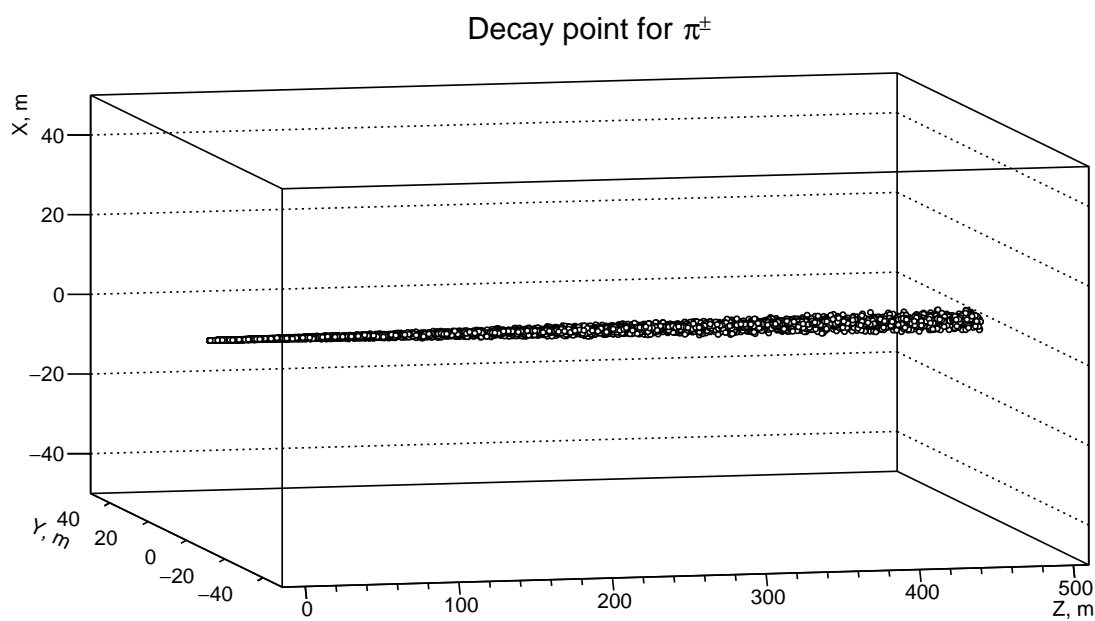


Рисунок 3.6 — Сфокусированный пучок из эксперимента

### 3.3 МОДЕЛЬ РАСПАДА ПУЧКА

Исходя из табличных значений[10], масса и время жизни для  $\pi^+$ -мезона, составляет:

$$\begin{aligned} \text{Mass } m_\pi &= 139.57018 \pm 0.00035 \text{ MeV}; \\ \text{Lifetime } \tau_\pi &= 2.6033 \pm 0.0005 \times 10^{-8} \text{ s}; \\ \text{Схема распада для } \pi^+ &: \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu. \end{aligned}$$

Для  $K^+$ -мезона:

$$\text{Mass } m_K = 493.677 \pm 0.005 \text{ MeV};$$

$$\text{Lifetime } \tau_K = 1.2380 \pm 0.0020 \times 10^{-8} \text{ s};$$

Из всех возможных распадов  $K^+$ , 63% составляет:  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ .

В результате прогонки модели на пучке из  $10^7$  частиц, были получены спектры двух типов:

- 1) При исходной энергии пучка 10 ГэВ;
- 2) При исходной энергии пучка с равномерным распределением в диапазоне от 10 до 15 ГэВ;

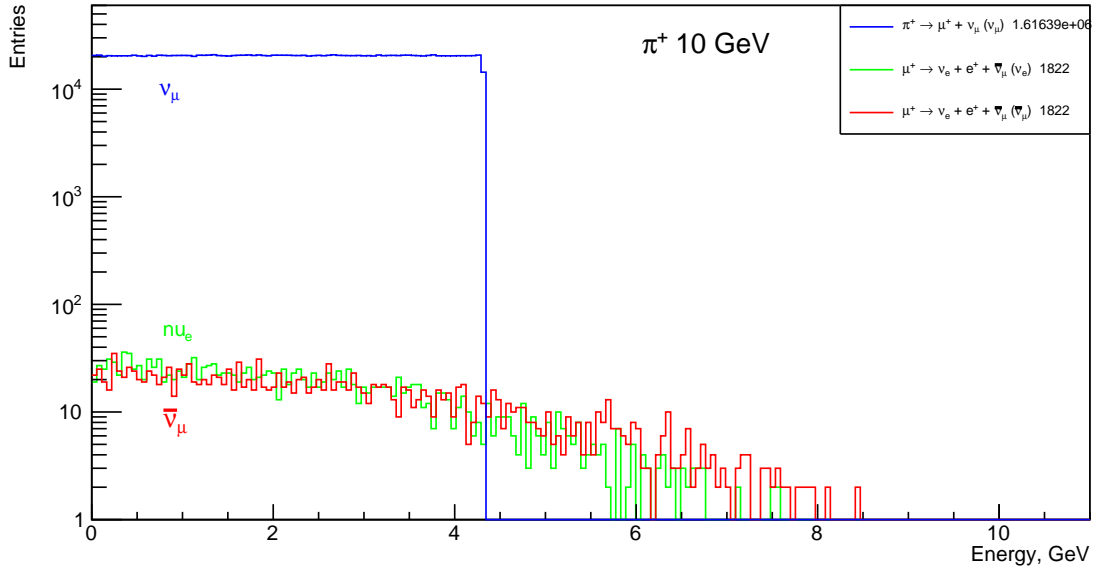
Следует отметить, что в случае двухчастичного распада частицы с безмассовым продуктом, выражение для предельной энергии (в данном случае нейтрино) в лабораторной системе имеет следующий вид:

$$E_\nu = \frac{m_{\pi(K)}^2 + m_\nu^2 - m_\mu^2}{2(E_{\pi(K)} - p_{\pi(K)} \cos\theta)} \quad (3.1)$$

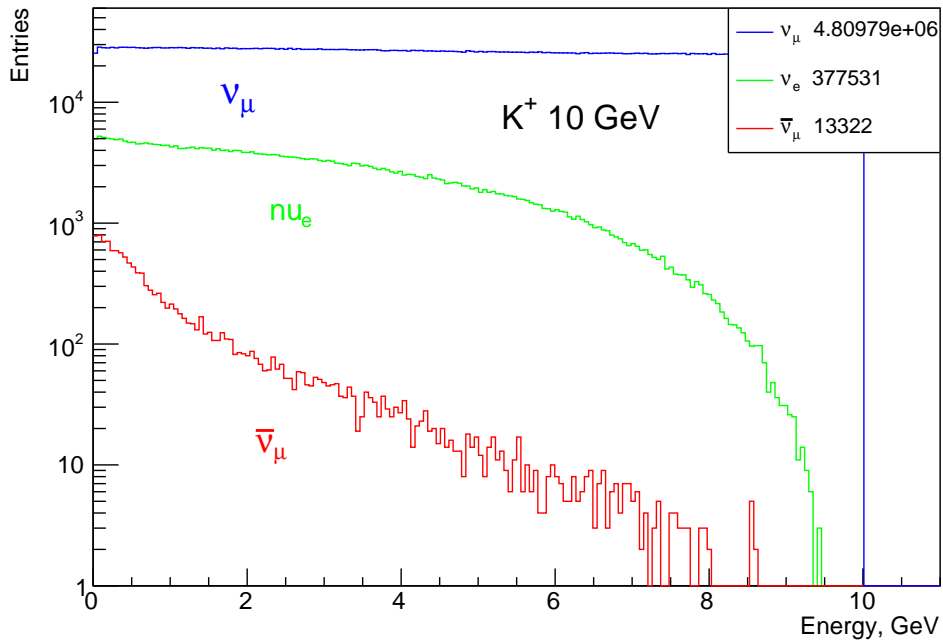
Пренебрегая массой  $m_\nu^2$  и принимая  $\cos\theta = 1$ , получаем:

$$E_\nu = \frac{m_{\pi(K)}^2 - m_\mu^2}{2(E_{\pi(K)} - p_{\pi(K)})} \quad (3.2)$$

Приняв  $E_{\pi(K)} - p_{\pi(K)} = \frac{m^2}{2E}$  и получим выражения для максимальной энергии  $\pi$  и  $K$  мезонов.



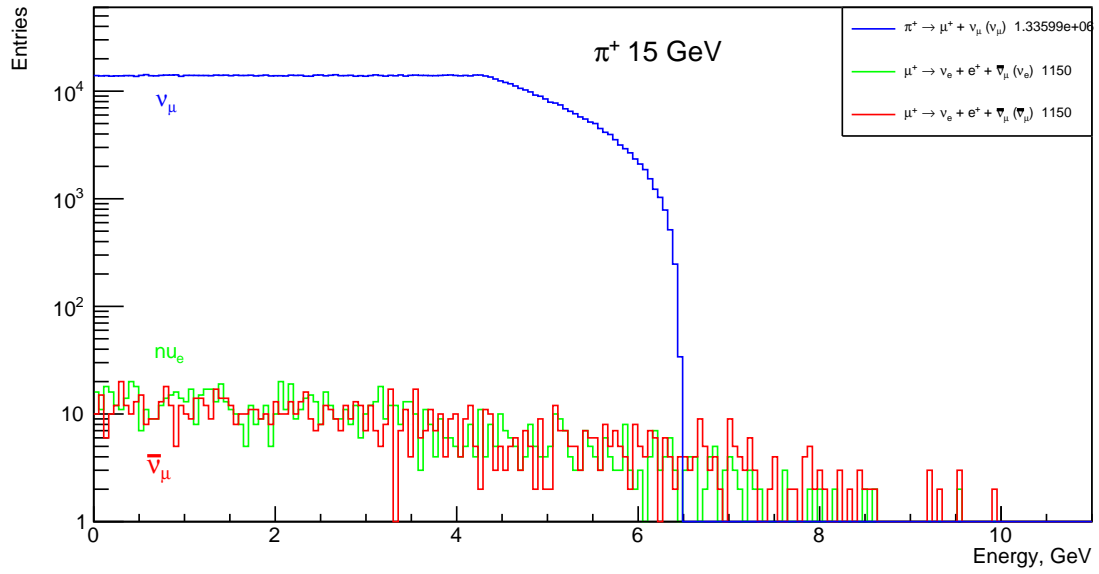
a



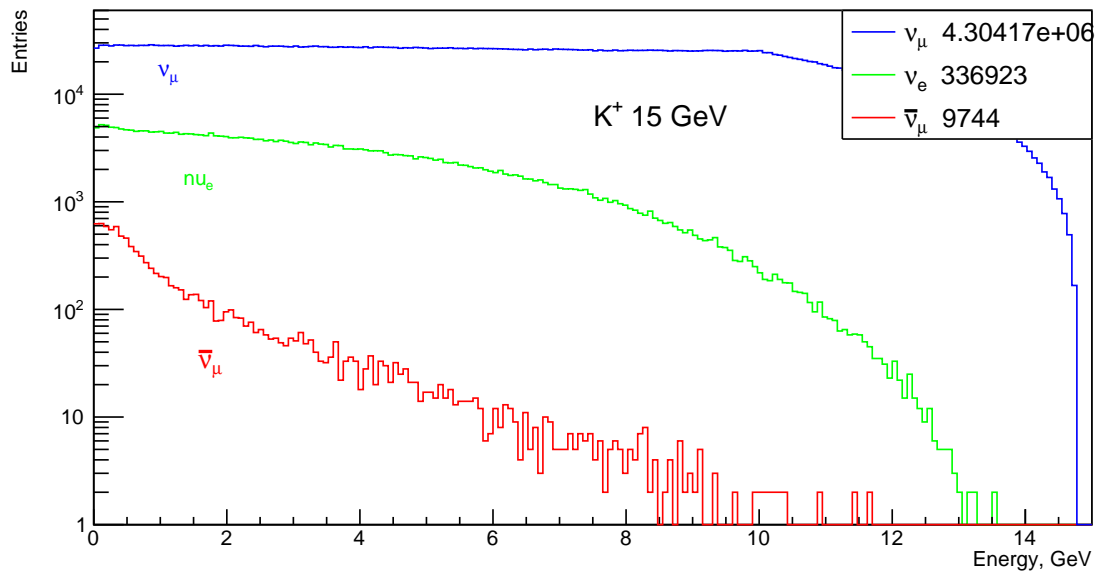
б

Рисунок 3.7 — Спектры нейтрино, образовавшихся в результате распада  $\pi^+$ -мезона(a),  $K^+$ -мезона(b) с исходной энергией 10 ГэВ.

На рисунке 3.7а можно наблюдать обрыв энергии  $\nu_\mu$  в области  $\approx 4.3$  ГэВ, что является предельным значением из формулы 3.2. Подобный обрыв при значении  $\approx 6.5$  ГэВ можно наблюдать при исходной энергии пучка, варьирующейся в диапазоне 10-15 ГэВ (рис. 3.8а), при значении  $\approx 6.5$  ГэВ.

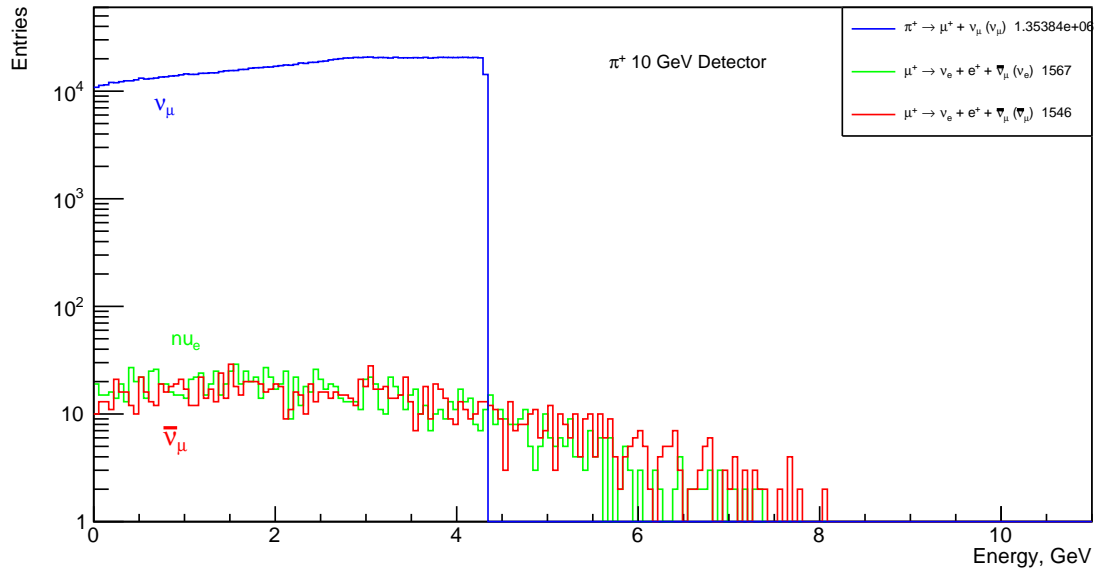


a

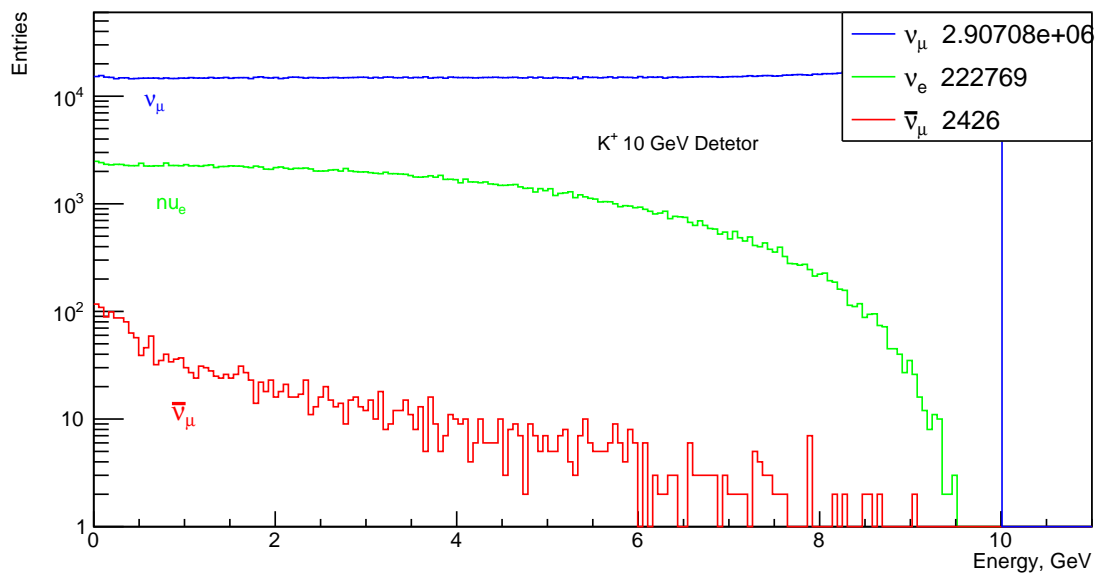


б

Рисунок 3.8 — Спектры нейтрино, образовавшихся в результате распада  $\pi^+$ -мезона(а),  $K^+$ -мезона(б) с исходной энергией от 10 до 15 ГэВ



a



б

Рисунок 3.9 — Спектры нейтрино попавших в область детектора и образовавшихся в результате распада  $\pi^+$ -мезона(а),  $K^+$ -мезона(б) с исходной энергией 10 ГэВ

На рисунке 3.9а можно наблюдать резкий обрыв энергии аналогичный рисунку 3.7а, связанный с формулой 3.2.

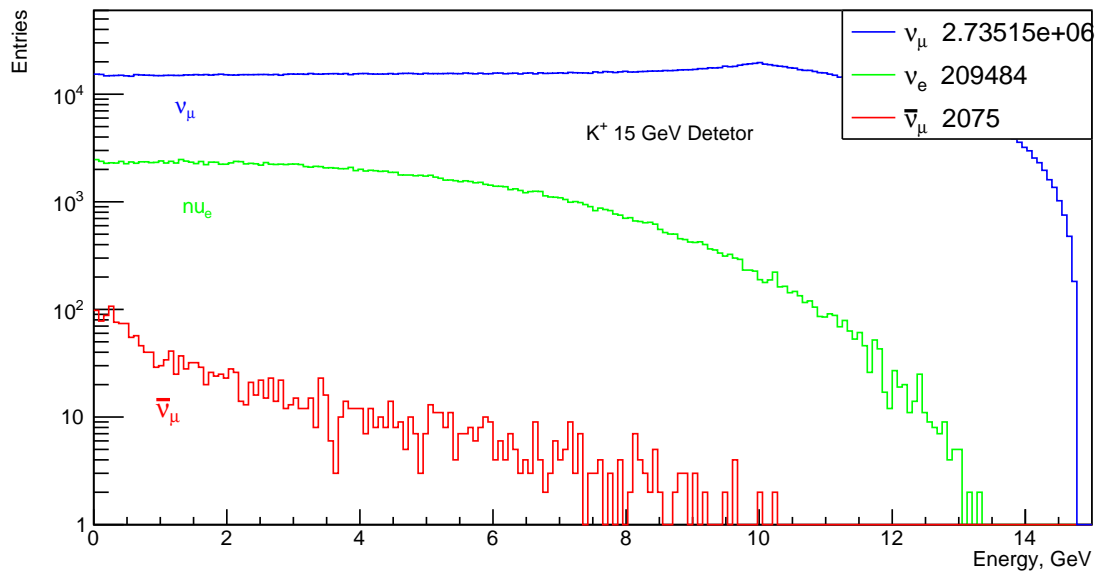
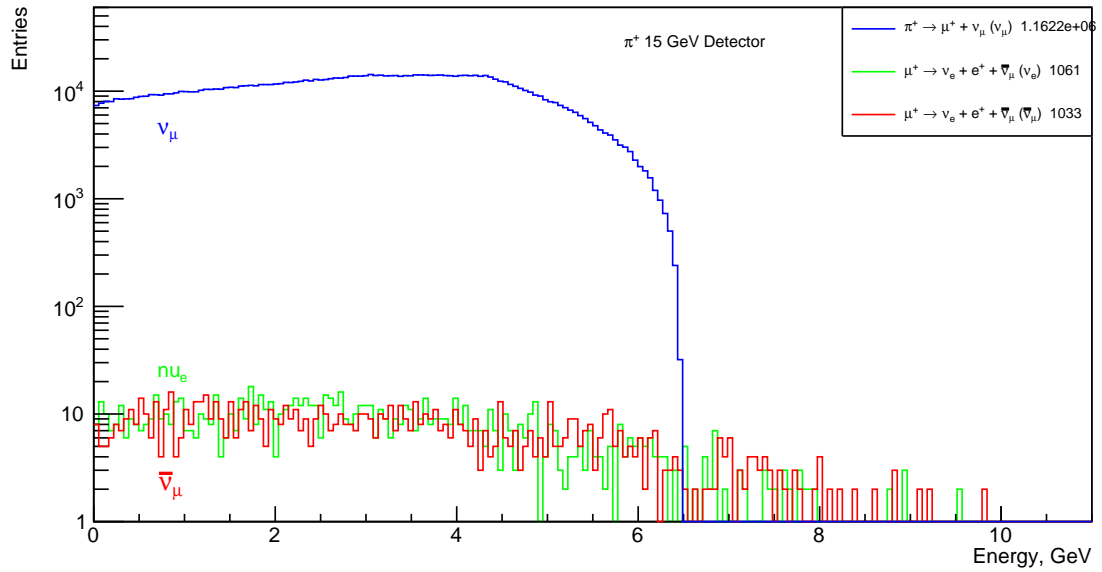


Рисунок 3.10 — Спектры нейтрино попавших в область детектора и образовавшихся в результате распада  $\pi^+$ -мезона(а),  $K^+$ -мезона(б) с исходной энергией от 10 до 15 ГэВ

Также, для  $K^+$ -мезона предельной энергией вычисленной из формулы 3.2 являются, значения  $\approx 9.8$  ГэВ и  $\approx 14.8$  ГэВ 3.8б.



## 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В GLOBES

### 4.1 ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ GLOBES

GLoBES[4] - это свободный программный пакет для моделирования экспериментов с длинными базами по изучению нейтринных осцилляций. Этот программный пакет включает в себя:

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

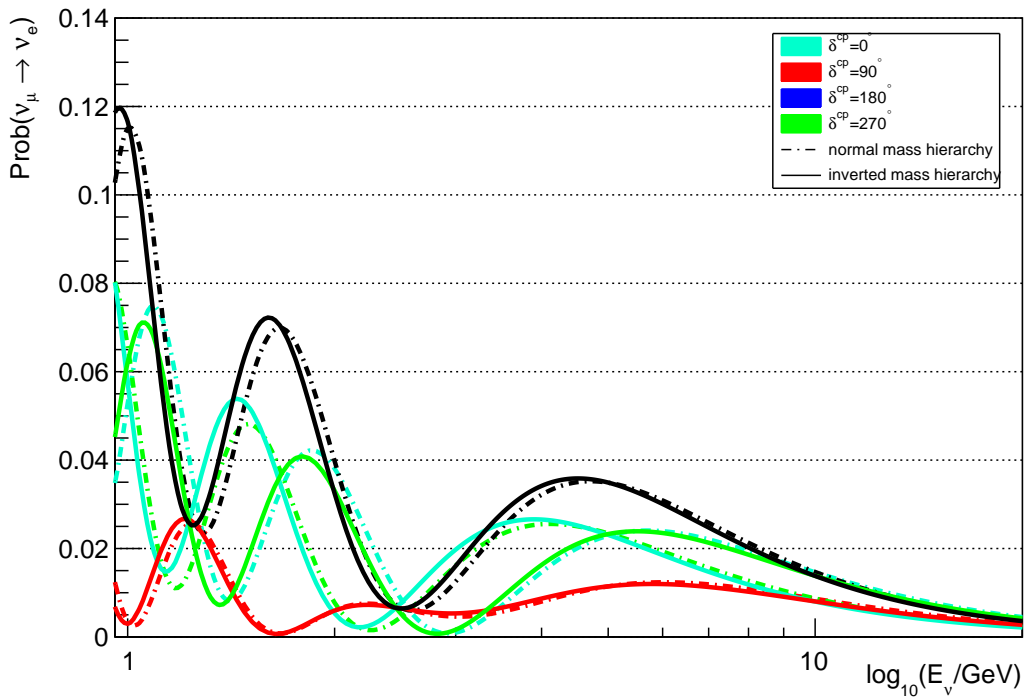
### 4.2 AEDL-ФАЙЛ

Для моделирования эксперимента в GLoBES был разработан AEDL-файл, который написан на специализированном языке программирования Abstract Experiment Definition Language (язык абстрактного определения эксперимента). Этот файл является основой программы и содержит определение четырех правил. Эти правила описывают появление электронных нейтрино и антинейтрино, исчезновение мюонных нейтрино и антинейтрино, и включают как сигнальные, так и фоновые каналы.

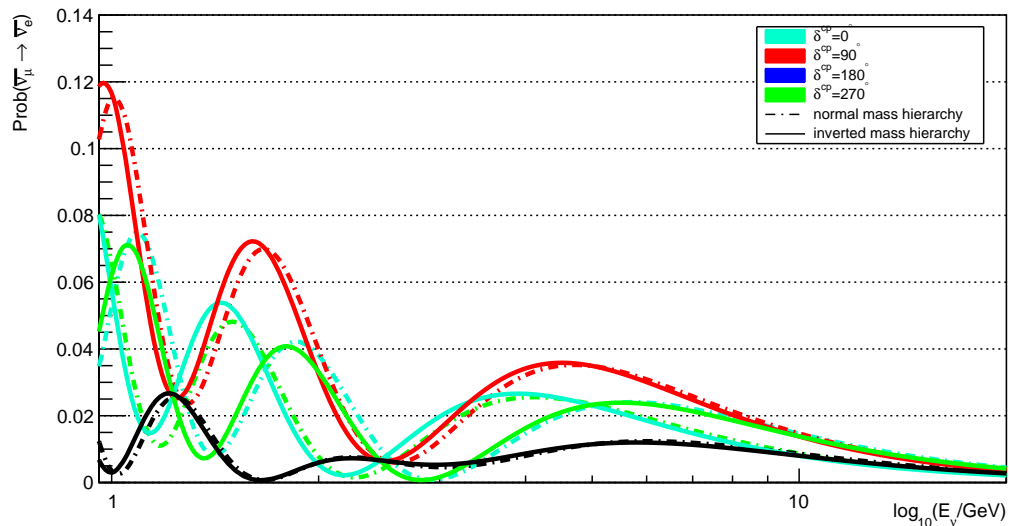
### 4.3 ВЕРОЯТНОСТИ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В GLOBES

В GLoBES вероятности осцилляций нейтрино и антинейтрино рассчитываются более точно, чем в разделе 2.3. Ниже приведен график полученный по алгоритму, заложенному в GLoBES, для вероятности осцилляций нейтрино мюонного в нейтрино электронное  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  и антинейтрино мюонного в антинейтрино электронное  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$  в энергетическом диа-

пазоне от 1 до 20 ГэВ. Данные графики были для осцилляций в вакууме.



а

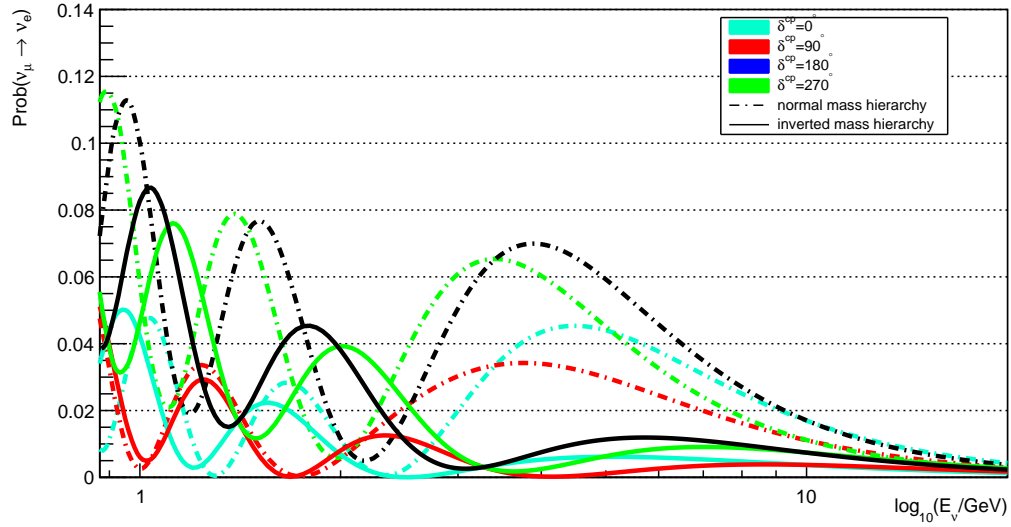


б

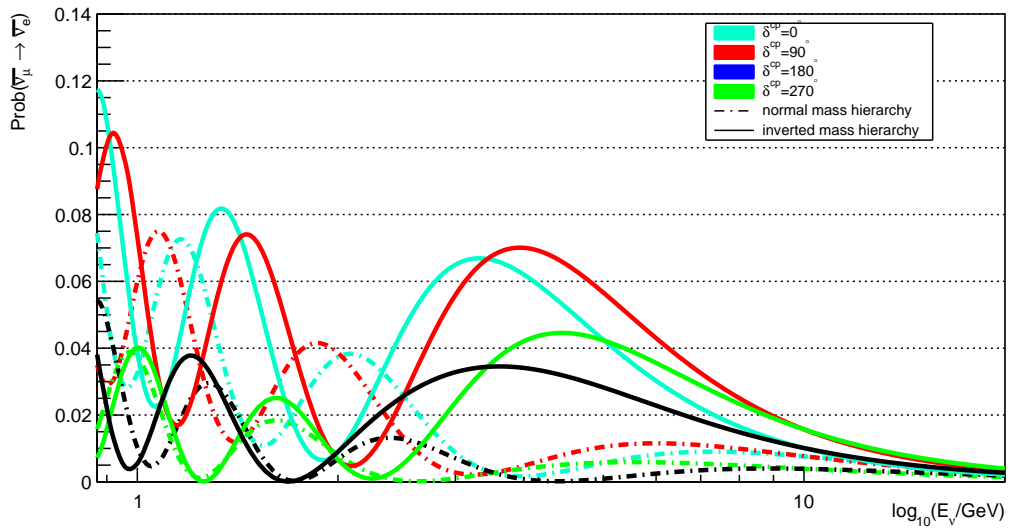
Рисунок 4.1 — Вероятности осцилляций нейтрино в вакууме для  $\delta_{CP} = 0, \pi/2, 3\pi/2$ , полученные с помощью GLOBES. График для осцилляции  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  (сверху) и  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  (снизу). Значения параметров осцилляций одинаковы для двух графиков и взяты из таблицы.

Вероятности осцилляций в обоих случаях были получены с учётом, как прямой(сплошные линии), так и обратной иерархии масс(пунктирные

линии). Также были получены графики вероятностей осцилляций при прохождении через вещество[9], где вещество предполагает, учёт средней плотности электронов в Земле.



a



б

Рисунок 4.2 — Вероятности осцилляций нейтрино в веществе для  $\delta_{CP} = 0, \pi/2\pi, 3\pi/2$ , полученные с помощью GLoBES. График для осцилляции  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  (сверху) и  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  (снизу). Значения параметров осцилляций одинаковы для двух графиков и взяты из таблицы.

## 4.4 СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ И РАСЧЁТ $\chi^2$ В GLOBES

Общее число событий  $n_i$  в  $i$ -ом бине в GLOBES представляется суммой чисел событий сигнальных  $s_i$  и фоновых  $b_i$  в  $i$ -ом бине:

$$n_i(a, b, c, d) = s_i(a, b) + b_i(c, d)$$

где  $a(c)$  - шумовой параметр нормировки сигнала (фона),  $b(d)$  - шумовой параметр калибровки (наклона) сигнала (фона).

Для каждого правила (rule)  $s_i$  получается суммированием чисел событий в сигнальных каналах этого правила (rule):

$$s_i = \sum_{l=1}^m s_i^l$$

где  $m$  - количество сигнальных каналов в правиле (rule).

Аналогично для фоновых каналов правила (rule):

$$b_i = \sum_{p=1}^t b_i^p$$

где  $t$  - количество фоновых каналов в правиле (rule).

Реализация  $s_i$  и  $b_i$  с учётом ошибок нормировки представляется как:

$$\begin{cases} s_i(a) = s_i(1 + a) \\ b_i(c) = b_i(1 + c), \end{cases} \quad (4.1)$$

где  $s_i$  - число сигнальных событий в  $i$ -ом бине одного канала,  $b_i$  - число фоновых событий в  $i$ -ом бине одного канала. У шумовых параметров  $a, c$  есть систематические ошибки -  $\sigma_a, \sigma_c$ .

Для учёта в 4.1 ошибок калибровки энергии используется метод наклона спектра чисел событий (метод "Г"):

$$\begin{cases} s_i(a, b) = s_i(a) + b \cdot s_i \cdot \left( \frac{E'_i - \overline{E}'_i}{E'_{\max} - E'_{\min}} \right) \\ b_i(c, d) = b_i(c) + d \cdot b_i \cdot \left( \frac{E'_i - \overline{E}'_i}{E'_{\max} - E'_{\min}} \right) \\ \overline{E}'_i = \frac{1}{2} (E'_{\max} - E'_{\min}) \end{cases}$$

где  $E'_i$  - средняя (восстановленная) энергия в  $i$ -ом бине;  $E'_{\min}, E'_{\max}$  - минимальная и максимальная энергии, соответственно.

Для построения  $\chi^2$  используется формула, зависящая от чисел событий:

$$\chi^2 = 2 \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^N \left( n_{ik}^{\text{фит}} - n_{ik}^{\text{ист}} + n_{ik}^{\text{ист}} \log \frac{n_{ik}^{\text{ист}}}{n_{ik}^{\text{фит}}} \right)$$

где  $N$  – число энергетических бин.

Она включает истинные числа событий  $n_{ik}^{\text{ист}}$  и тестируемые  $n_{ik}^{\text{фит}}$  числа событий в каждом энергетическом  $i$ -ом бине во всех  $k$  правилах и минимизируется по шумовым параметрам  $\xi_i$  ( $\xi_1 = a, \xi_2 = c$ , и т. д.), которые описывают зависимость чисел событий от систематических ошибок. Центральное значение всех штрафных параметров равно нулю. Тогда  $\chi_{pull}^2$  :

$$\chi_{pull}^2 = \sum_{l=1}^r \underbrace{\min}_{\xi_{il}} \left( \sum_{i=1}^k p_{il}(\xi_{il}) \right)$$

где  $r$  - количество правил (rule), определенных в AEDL-файле эксперимента. Далее, учитывается вклад внешних ограничений на параметры в  $\chi_{input}^2$ .

Итоговая формула для расчёта  $\chi^2$  с учётом штрафных членов и входных ограничений:

$$\chi^2 = 2 \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^N \left( n_{ik}^{\text{фит}} - n_{ik}^{\text{ист}} + n_{ik}^{\text{ист}} \log \frac{n_{ik}^{\text{ист}}}{n_{ik}^{\text{фит}}} \right) + \chi_{input}^2 + \chi_{pull}^2$$

## 4.5 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В GLOBES

В данном разделе был проведен расчет чувствительности эксперимента P2O к определению иерархии масс нейтрино и нарушения CP-симметрии. Оценка чувствительности была осуществлена с применением метода статистических гипотез.

Суть метода заключается в формулировке двух гипотез: истинной (true) и тестируемой (test). Затем вычисляются значения  $\chi^2$  для обеих гипотез и рассчитывается их разность. Корень из этой разности представляет уровень значимости, который показывает, насколько успешно тестируемая гипотеза может быть отвергнута. Далее, строятся зависимости уровня значимости от определенной величины.[2; 7]

Чувствительность к	Истина	Гипотеза	$\sigma = \sqrt{\Delta\chi^2}$
иерархии масс	NO	IO	$\sqrt{\chi_{IO}^{2(\text{test})} - \chi_{NO}^{2(\text{true})}}$
фазе $\delta_{CP}$	$[-\pi, \pi]$	нет CPV	$\sqrt{\min(\chi_{\delta_{CP}=0}^{2(\text{test})}, \chi_{\delta_{CP}=\pi}^{2(\text{test})}) - \chi_{\delta_{CP}}^{2(\text{true})}}$

Таблица 4.1 – Характеристики метода статистических гипотез для чувствительностей к определению иерархии масс нейтрино и нарушения CP-симметрии.

В таблице 4.1 приведены характеристики метода статистических гипотез

для чувствительностей к определению иерархии масс нейтрино и нарушению CP-симметрии.

Распределения чувствительностей и анализ результатов представлены ниже.

#### 4.5.1 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА R2O К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИЕРАРХИИ МАСС НЕЙТРИНО

С помощью метода статистических гипотез получена зависимость зависимости  $\sqrt{\Delta\chi^2}$  от  $\delta_{CP}/\pi$  для определения иерархии масс нейтрино, которая представлена на рисунке 4.3. Иерархия масс нейтрино в эксперименте R2O может быть определена со статистической значимостью 4-8 $\sigma$  в результате одного года работы с пучком мощностью 450 кВт или после пяти лет работы с пучком мощностью 90 кВт (с использованием положительной полярности пучка). Три года работы с пучком мощностью 90 кВт уже будет достаточно для достижения чувствительности  $\geq 3\sigma$  для любого значения  $\theta_{23}$  между 40° и 50° и для любого значения  $\delta_{CP}$ .

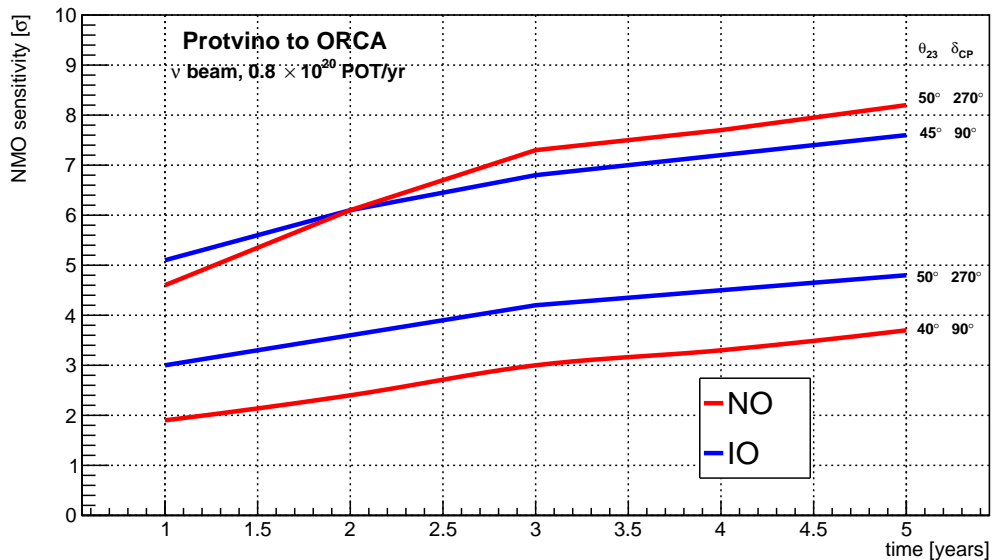


Рисунок 4.3 — Чувствительность R2O к определению иерархии масс нейтрино в зависимости от времени экспозиции с пучком мощностью 90 кВт (с положительной полярностью пучка). Для нормальной(красный) и обратной(синий) упорядочения масс показаны наиболее и наименее благоприятные сценарии.

Следует отметить, что для эффективного анализа чувствительности к иерархии масс нейтрино необходимо, чтобы нейтринный пучок проходил через вещество и чтобы было соблюдено определенное соотношение между

энергией нейтрино и длиной базы осцилляций. В противном случае, нормальная и обратная иерархии масс нейтрино не будут различаться.

#### 4.5.2 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА P2O К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАРУШЕНИЯ CP-СИММЕТРИИ

Зависимость  $\sigma = \sqrt{\chi^2}$  от  $\delta_{CP}/\pi$  для чувствительности к определению нарушения CP-симметрии изображена на 4.4. В точках  $\delta_{CP} = -\pi, 0, \pi$  кривые имеют минимумы, поскольку при этих значениях  $\delta_{CP}$  гипотеза совпадает с истиной. Следует отметить, что чувствительность для опровержения гипотезы о сохранении CP-симметрии представлена для различных сценариев: стандартного P2O и P2O с пучком меченых нейтрино (Tagged P2O). Была проведена оценка для двух различных временных экспозиций -  $12 \times 10^{20}$  протонов-мишени (POT) и  $40 \times 10^{20}$  POT, соответствующих 3 и 10 годам работы с пучком мощностью 450 кВт. Обнаружение нарушения CP-симметрии в секторе нейтрино, по-видимому, невозможно с использованием P2O, однако обнаружение становится возможным с использованием пучка меченых нейтрино в этом эксперименте. При  $12 \times 10^{20}$  POT, эксперимент P2O смог бы заявить об открытии этого эффекта с уровнем значимости  $5\sigma$ - для 46%-ного диапазона фазы  $\delta_{CP}$ , и для 68%-ного диапазона при  $40 \times 10^{20}$  POT.

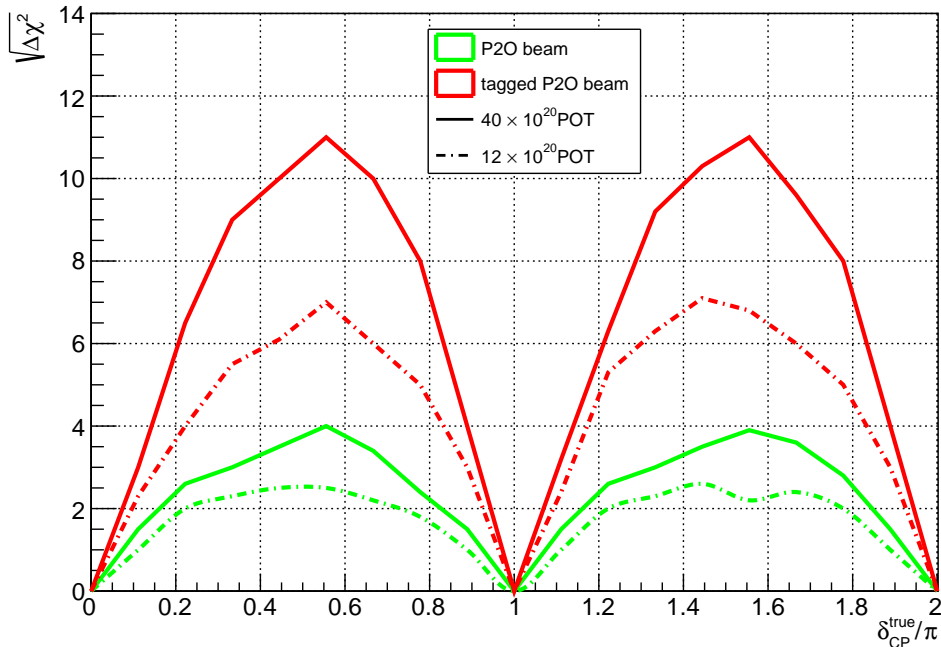


Рисунок 4.4 — Чувствительность к определению нарушения CP-симметрии в зависимости от значения  $\delta_{CP}$  для эксперимента P2O (зеленый), эксперимента P2O с применением меченых нейтрино маркировкой (красный). Сплошные линии соответствуют экспозиции  $40 \times 10^{20}$  POT, а пунктирные  $12 \times 10^{20}$  POT.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены следующие вопросы:

- Принцип работы эксперимента P2O, включая ближний и дальний детекторные комплексы.
- Описание явления осцилляций нейтрино в вакууме и веществе.
- Модель формирования нейтринного пучка на ускорителе У-70.
- Моделирование эксперимента P2O с использованием программной среды GLoBES.
- Расчет чувствительности эксперимента P2O к определению иерархии масс нейтрино и нарушению CP-симметрии для различного времени работы эксперимента и для различных потоков нейтрино.

В ходе работы были сделаны выводы о чувствительности эксперимента P2O к измерению осцилляционных параметров нейтрино и его возможностях в разрешении вопросов в физике осцилляций нейтрино в рамках расширенной Стандартной модели.

Данная исследовательская работа имеет практическую значимость при планировании физической программы эксперимента P2O, который нацелен на изучение осцилляций нейтрино. Нейтрино играют важную роль в физике элементарных частиц и до сих пор существуют нерешенные вопросы, касающиеся их природы (дираковские или майорановские частицы) и значений их масс. Кроме того, помимо Стандартной модели, существуют предположения о наличии новых состояний, похожих на нейтрино, которые могут быть связаны с тёмной материей и требуют дальнейшего исследования.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Bakhti P., Rajae M.* Sensitivities of future reactor and long-baseline neutrino experiments to NSI // *Physical Review D.* — 2021. — Т. 103, № 7.
2. *Choubey S., Ghosh M., Pramanik D.* Sensitivity study of Protvino to ORCA (P2O) experiment: effect of antineutrino run, background and systematics // *The European Physical Journal C.* — 2019. — Т. 79, № 7.
3. *Deepthi K. N., C S., Mohanta R.* Revisiting the sensitivity studies for leptonic CP-violation and mass hierarchy with T2K, NOA and LBNE experiments // *New Journal of Physics.* — 2015. — Т. 17, № 2. — С. 023035.
4. *GLOBES.* General Long Baseline Experiment Simulator. — URL: <https://www.mpi-hd.mpg.de/personalhomes/globes/>.
5. *Gonzalez-Garcia M. C., Maltoni M., Schwetz T.* NuFIT: Three-Flavour Global Analyses of Neutrino Oscillation Experiments // *Universe.* — 2021. — Т. 7, № 12. — ISSN 2218-1997.
6. *Gonzalez-Garcia M. C., Maltoni M., Schwetz T.* NuFIT: Three-Flavour Global Analyses of Neutrino Oscillation Experiments // *Universe.* — 2021. — Т. 7, № 12. — С. 459.
7. *Kaur D., Chowdhury N. R. K., Rahaman U.* Effect of non-unitary mixing on the mass hierarchy and CP violation determination at the Protvino to Orca experiment. — 2023. — arXiv: 2110.02917 [hep-ph].
8. Letter of interest for a neutrino beam from Protvino to KM3NeT/ORCA / A. V. Akhmedov [и др.] // *The European Physical Journal C.* — 2019. — Т. 79, № 9.
9. Series expansions for three-flavor neutrino oscillation probabilities in matter / E. K. Akhmedov [и др.] // *Journal of High Energy Physics.* — 2004. — Т. 2004, № 04. — С. 078—078.
10. *Workman R. L.* [и др.]. Review of Particle Physics // *PTEP.* — 2022. — Т. 2022. — С. 083C01.
11. *Биленький С. М.* "Массы, смешивание и осцилляции нейтрино". — URL: <http://www.mathnet.ru/links/8f84288030c75666994384e4748ed165/ufn2194.pdf>.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

GLOBES (General Long Baseline Experiment Simulator) - симулятор экспериментов с длинной базой осцилляций.

NOvA (NuMI Off-Axis  $\nu_e$  Appearance) - ускорительный эксперимент, изучающий появление электронных нейтрино.

P2O (Protvino to ORCA Neutrino Experiment) - ускорительный эксперимент, изучающий осцилляции нейтрино между Протвино и детектором ORCA.

T2K ("Tokai to Kamioka") - ускорительный эксперимент, исследующий осцилляции нейтрино между Токаи и Камиока.

CC (charged current) - заряженные токи.

NC (neutral current) - нейтральные токи.

CP-инвариантность (charge-parity) - симметрия зарядового сопряжения и пространственной чётности.

CPV (charge-parity violation) - нарушение симметрии комбинированной чётности.

POT (protons on target) - число протонов на мишень.

RHC (reverse horn current) - режим работы с пучком антинейтрино.

FHC (forward horn current) - режим работы с пучком нейтрино.

IO (inverted ordering) - обратная иерархия (обратный порядок) масс нейтрино.

NO (normal ordering) - нормальная иерархия (прямой порядок) масс нейтрино.

## ТАБЛИЦА ДАННЫХ

Эффект вещества	$a, \text{KM}^{-1}$	$2.71 \cdot 10^{-4}$
Константа Ферми	$G_F, \text{эВ}^{-2}$	$1.67 \cdot 10^{-23}$
Плотность электронов	$N_e, m^{-3}$	$8.98 \cdot 10^{29}$
Энергия нейтрино	$E, \text{ГэВ}$	$0.5 - 8$
База осцилляций	$L, \text{KM}$	$1284.9$
Плотность Земли	$\rho, \text{Г/см}^2$	$2.848$
Рабочая масса	$m, \text{КТ}$	$40$

Таблица 4.2 — Числовые значения величин

Параметр	Центральное значение	Относительная погрешность, %
$\theta_{12}$	0.5903	2.3
$\theta_{23}(\text{NO})$	0.866	4.1
$\theta_{23}(\text{IO})$	0.869	4.0
$\theta_{13}(\text{NO})$	0.150	1.5
$\theta_{13}(\text{IO})$	0.151	1.5
$\Delta m_{21}^2$	$7.39 \cdot 10^{-5} \text{эВ}^2$	2.8
$\Delta m_{31}^2(\text{NO})$	$2.451 \cdot 10^{-32} \text{В}^2$	1.3
$\Delta m_{31}^2(\text{IO})$	$-2.512 \cdot 10^{-32} \text{В}^2$	1.3

Таблица 4.3 — Центральные значения осцилляционных параметров и их относительные погрешности