

Расчет чувствительности эксперимента P20 при использовании различных типов пучков нейтрино

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент В. О. Тихомиров

Научный консультант: д.ф.-м.н., проф. А. А. Соколов

Выполнил: ст. гр. Б19-102 Т. В. Махкамов

Москва

2023

Цель работы

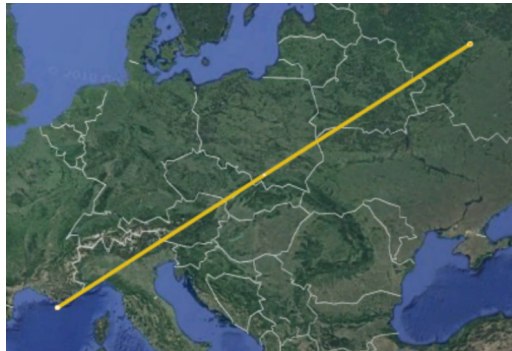
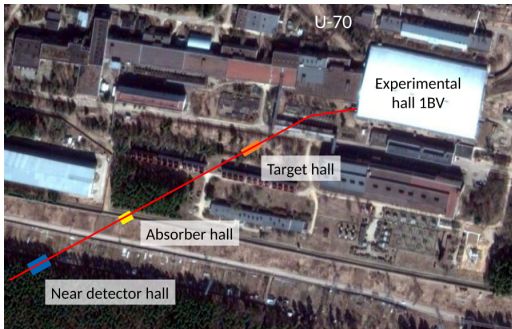
Цель данной работы заключается в изучении, а также в расчете чувствительности проекта P2O к измерению параметров осцилляций нейтрино. С помощью моделирования данного ускорительного эксперимента планируется предсказать, насколько успешным будет реальный запланированный эксперимент.

Задачи работы:

1. изучить эксперимент P2O;
2. изучить процесс осцилляций нейтрино в вакууме и веществе;
3. провести моделирование осцилляций в GLoBES;
4. моделирование нейтринного канала в GEANT4;
5. рассчитать чувствительность P2O к определению иерархии масс нейтрино, к нарушению фазы δ_{CP} -четности;

Проект P20

Наиболее амбициозным проектом, предложенным на сегодняшний день, является проект P20 (Protvino to ORCA)



Осцилляции нейтрино

Три массовых состояния нейтрино ν_1, ν_2, ν_3 с массами m_1, m_2, m_3 соответственно и три флейворных состояния нейтрино ν_e, ν_μ, ν_τ связаны через унитарную матрицу смешивания U :

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

, где матрица U параметризованная матрица ПМНС:

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta_{cp}} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta_{cp}} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $s_{\alpha\beta} = \sin \theta_{\alpha\beta}$, $c_{\alpha\beta} = \cos \theta_{\alpha\beta}$, $\alpha, \beta = \overline{1, 3}$.

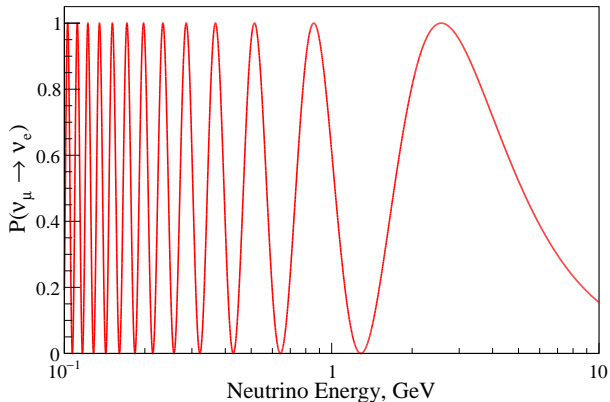
Осцилляции нейтрино в вакууме и веществе

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

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

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

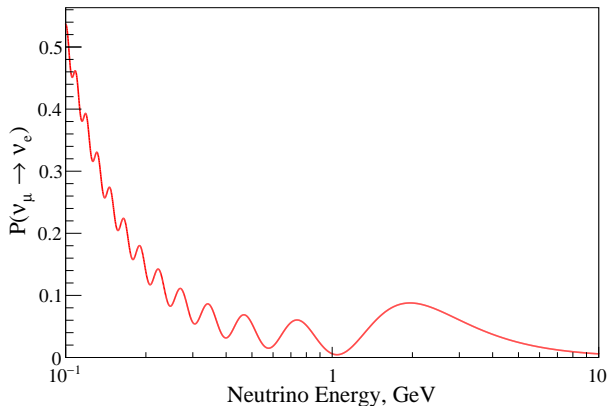
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \times \\ \times \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{23}^2 \frac{L}{E} \right).$$



Осцилляции нейтрино в вакууме и веществе

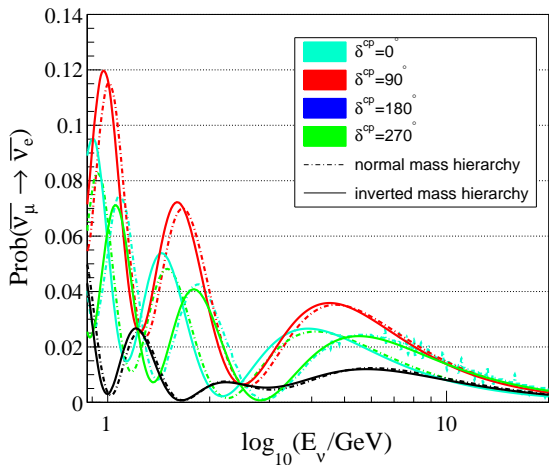
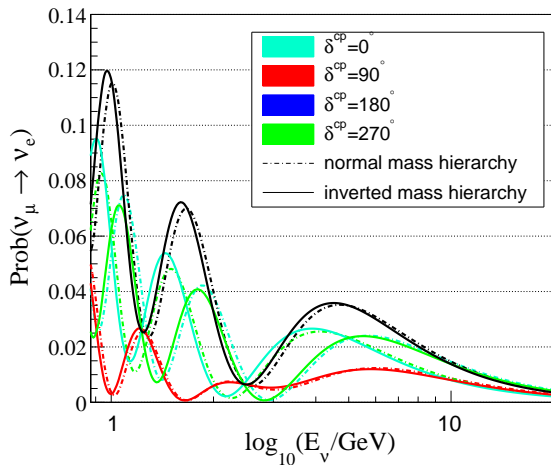
$$\begin{aligned}
 \text{В веществе: } P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 (2\theta_{13}) \cdot \frac{\sin^2 (\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \Delta_{31}^2 + \sin (2\theta_{23}) \times \\
 &\times \sin (2\theta_{13}) \cdot \sin (2\theta_{12}) \cdot \frac{\sin (\Delta_{31}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

где $\Delta_{ij} = 1.27 \cdot \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{E}$ ($i, j = 1, 2, 3$), $a = \frac{G_F N_e}{\sqrt{2}}$ – эффект вещества.

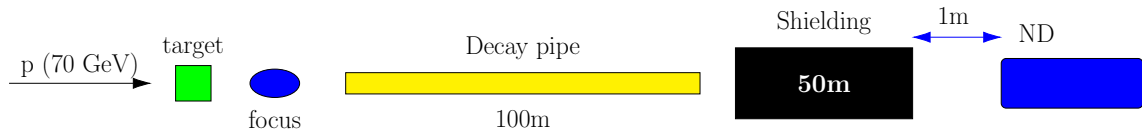


Моделирование осцилляций в GLOBES

Вероятности осцилляций нейтрино в вакууме для $\delta_{CP} = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, полученные с помощью GLOBES. График для осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (слева) и $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ (справа).



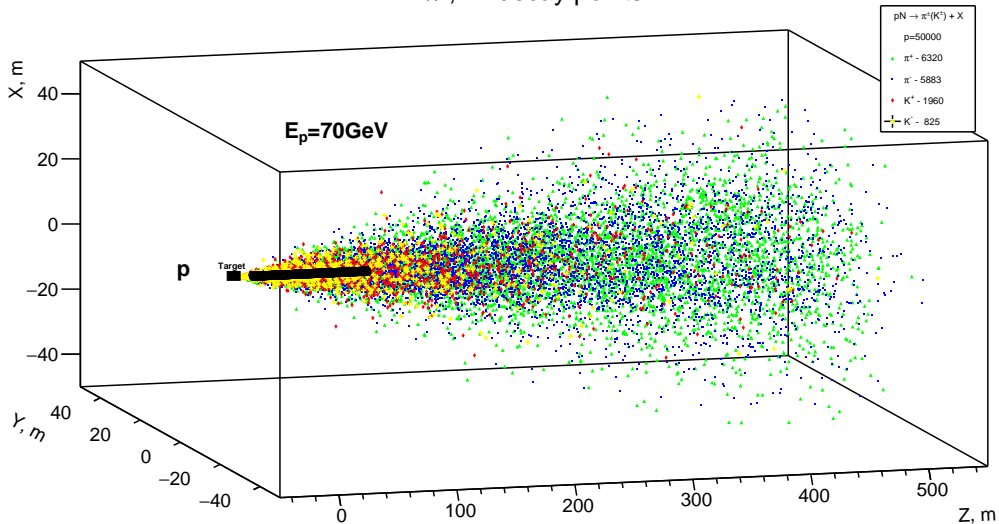
Моделирование нейтринного канала в GEANT4



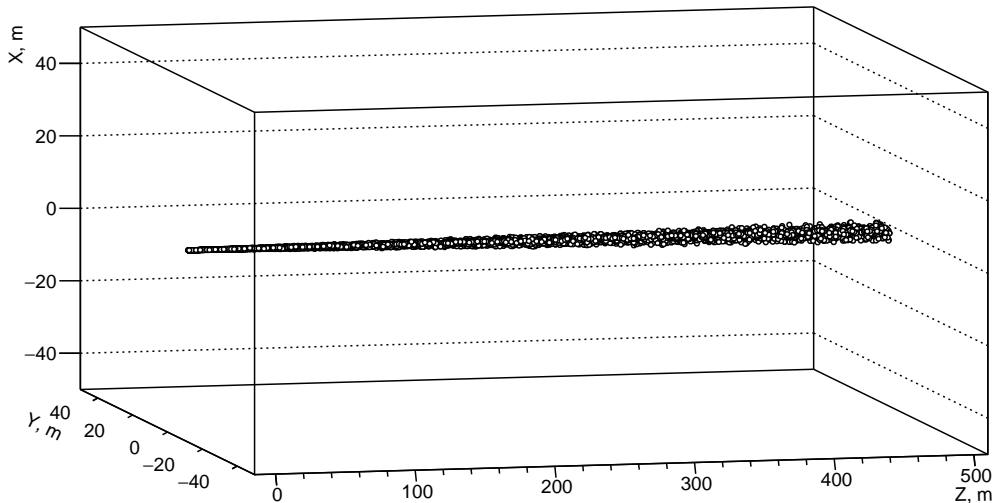
- ParticleGun - генератор частиц, находящийся в начале координат, из которого вылетает пучок протон с энергией 70 ГэВ;
- Target - медная цилиндрическая мишень, на которую налетает пучок протонов, с длиной 50 см и радиусом 0.25 мм;
- focus - фокусирующая установка;
- Decay Pipe - вакуумная трубка в которой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

Моделирование нейтринного канала в GEANT4

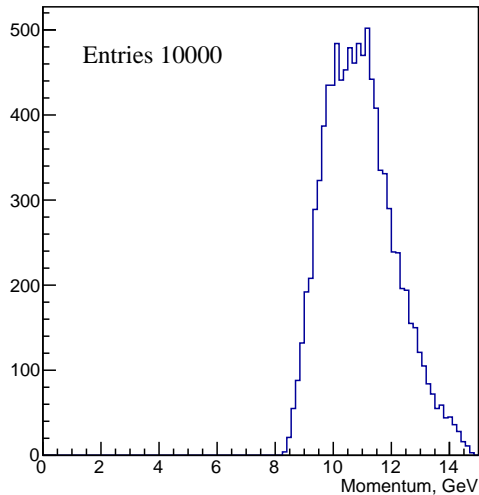
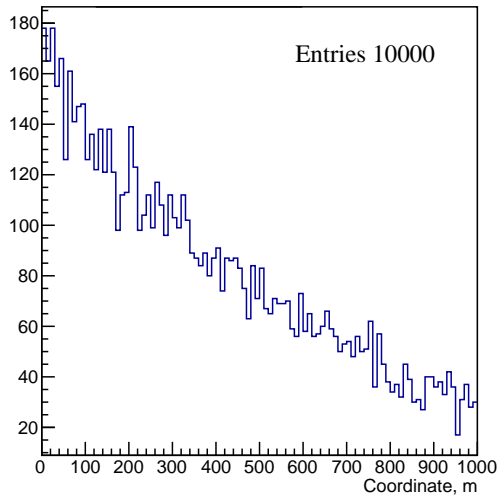
π^\pm, K^\pm decay points



Decay point for π^\pm

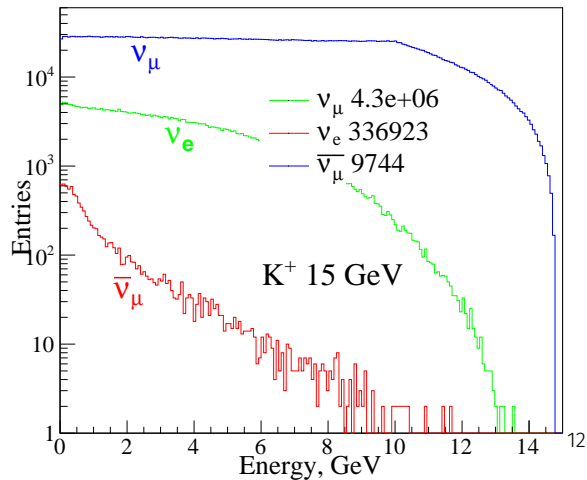
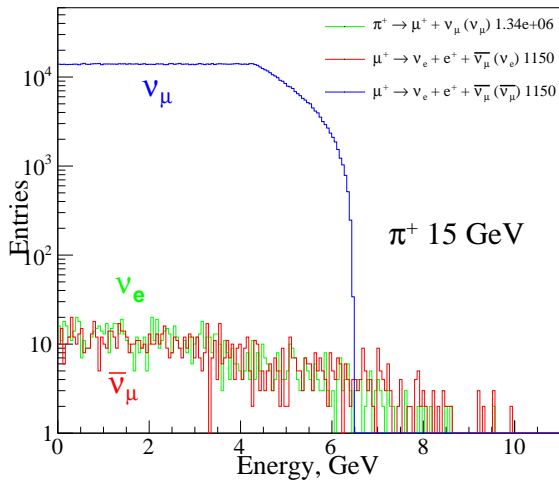


Сфокусированный пучок



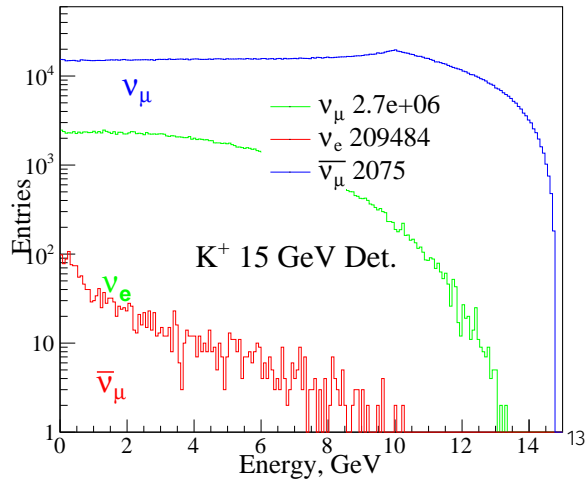
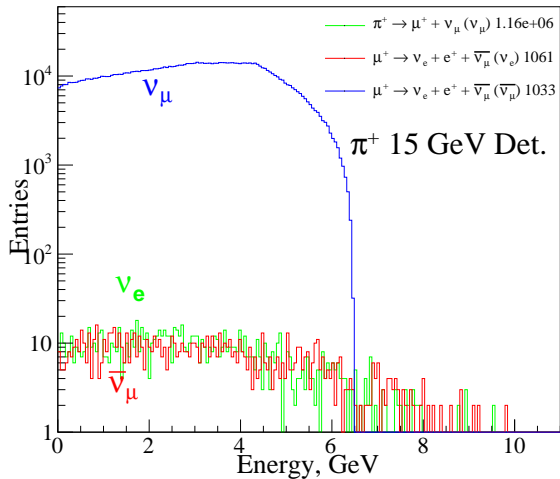
Образованные спектры нейтрино

Спектры нейтрино, образовавшихся в результате распада Пи-мезона (π^+)(слева), К-мезона (K^+)(справа) с исходной энергией от 10 до 15 ГэВ:



Образованные спектры нейтрино

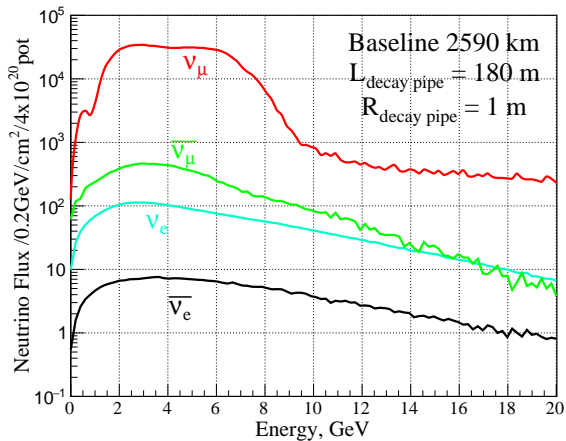
Спектры нейтрино попавших в детектор и образовавшихся в результате распада Пи-мезона (π^+)(слева), К-мезона (K^+)(справа) с исходной энергией от 10 до 15 ГэВ:



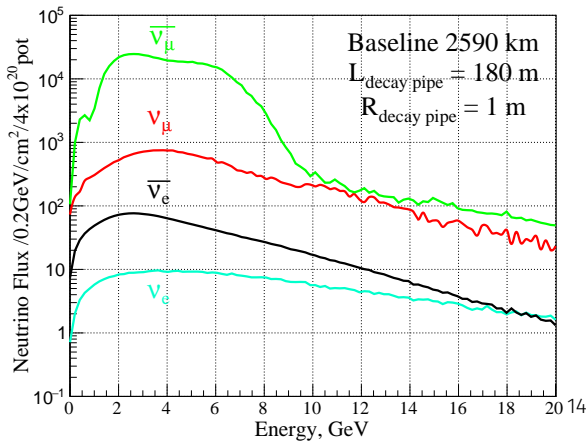
Проект P20

Смоделированный спектр нейтринных пучков направленных на ORCA в режиме работы ν (слева) и $\bar{\nu}$ (справа).

Focusing of positive secondaries



Focusing of negative secondaries



Расчёт чувствительности P2O

Оценка чувствительности была осуществлена с применением метода статистических гипотез

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 δ_{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 1: Характеристики метода статистических гипотез для двух случаев

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ИЕРАРХИИ МАСС НЕЙТРИНО

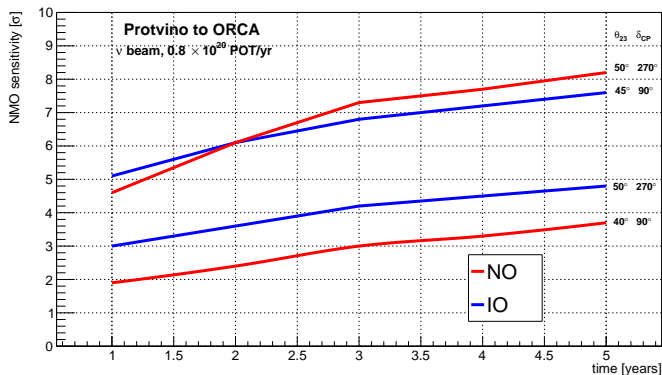


Рисунок 1: Чувствительность P2O к иерархии масс нейтрино в зависимости от времени экспозиции с пучком мощностью 90 кВт (с положительной полярностью пучка). Для обоих нормального(красный) и обратного(синий) упорядочения показаны наиболее и наименее благоприятные сценарии.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К НАРУШЕНИЮ CP-СИММЕТРИИ

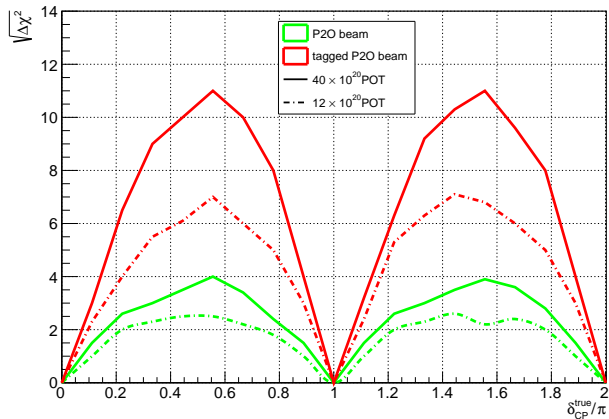


Рисунок 2: чувствительность к нарушению CP-симметрии в зависимости от значения δ_{CP} для эксперимента P2O (зеленый), эксперимента P2O с маркировкой (красный).

Таким образом, в данной работе были рассмотрены следующие аспекты:

- Принцип работы эксперимента P2O, включая ближний и дальний детекторные комплексы.
- Описание явления осцилляций нейтрино в вакууме и веществе.
- 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.

Приложения

Итоговая формула для расчёта χ^2 в учётом штрафных членов и входных ограничений:

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

Масса и время жизни для π^+ -мезона, составляет:

Mass $m = 139.57018 \pm 0.00035$ MeV;

Lifetime $\tau = 2.6033 \pm 0.0005 \times 10^{-8}$ s;

Схема распада для π^+ : $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$.

Для K^+ -мезона:

Mass $m = 493.677 \pm 0.005$ MeV;

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

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

Эффект вещества	a, 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, KM	1284.9
Плотность Земли	$\rho, \text{Г/см}^2$	2.848
Рабочая масса	$m, \text{КТ}$	40

Таблица 2: Числовые значения величин

$$E_\nu = \frac{m_{\pi(K)}^2 - m_\mu^2}{2(E_{\pi(K)} - p_{\pi(K)})} \quad (1)$$

Параметр	Центральное значение	Относительная погрешность, %
θ_{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
Δm_{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 3: Центральные значения осцилляционных параметров и их относительные погрешности

Приложения

Experiment	T2K		T2HK	NOνA	DUNE	P2O	
Location	Japan		Japan	USA	USA	Russia/Europe	
Status	operating		proposed	operating	construction	proposed	
Accelerator facility	J-PARC		J-PARC	Fermilab	Fermilab	Protvino	
Baseline	295 km		295 km	810 km	1300 km	2595 km	
Off-axis angle	2.5°		2.5°	0.8°	0°	0°	
1-st max $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	0.6 GeV		0.6 GeV	1.6 GeV	2.4 GeV	4 GeV	
Detector	SuperK		HyperK	NO ν A	DUNE	ORCA	Super-ORCA
Target material	pure water		pure water	LS	liquid Ar	sea water	
Detector technology	Cherenkov		Cherenkov	LS	TPC	Cherenkov	
Fiducial mass	22 kt		186 kt	14 kt	40 kt	8000 kt	4000 kt
Beam power	500 kW		1300 kW	700 kW	2400 kW	450 kW	450 kW
ν_e events per year (NO)	~ 20		230	~ 20	230	3500	3400
$\bar{\nu}_e$ events per year (IO)	~ 6		165	~ 7	60	1200	1100
NMO sensitivity ($\delta_{CP} = \pi/2$)	-	-	4 σ	1 σ	7 σ	> 7 σ	\gg 7 σ
CPV sensitivity ($\delta_{CP} = \pi/2$)	1.5 σ	3 σ	8 σ	2 σ	7 σ	3 σ	9 σ
1 σ error on δ_{CP} ($\delta_{CP} = \pi/2$)			22°		11°	30°	8°
1 σ error on δ_{CP} ($\delta_{CP} = 0$)			7°		6°	15°	10°
Year / data taking years	2018	2026	10 yr	2024	10 yr	6 yr	10 yr