

Измерение примеси электронного нейтрино в исходном пучке эксперимента T2K

Дмитрий Гудин

Московский физико-технический институт

Москва, июнь 2012

Содержание

- Явление нейтринных осцилляций
- Описание эксперимента T2K
- Алгоритм по отбору CC-событий для ν_μ и ν_e и его результаты
- Вычисление примеси ν_e в исходном пучке
- Выводы

Нейтринные осцилляции

Матрица Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты:

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix},$$

Параметризация:

$$\begin{aligned} U &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Осцилляции описываются параметрами: 3 угла-смешивания, CP-фаза и две разницы квадратов масс собственных состояний.

Нейтринные осцилляции

Модель с двумя типами нейтрино:

$$|\nu(t)\rangle = C_1 e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + C_2 e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle.$$

В пределе малых масс нейтрино:

$$E_2 - E_1 = \frac{\Delta m_{21}^2}{2E}.$$

При $m_1 \neq m_2$ вероятность осцилляций:

$$P(\nu_{f1} \rightarrow \nu_{f2}) = \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 L}{E} \right),$$

(Δm_{12}^2 выражено в эВ², L — в км, E — в ГэВ).

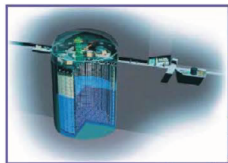
Таким образом, осцилляции предполагают наличие у нейтрино ненулевых масс.

Текущие значения параметров

parameter	best fit $\pm 1\sigma$	2σ	3σ
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	7.62 ± 0.19	7.27–8.01	7.12–8.20
$\Delta m_{31}^2 [10^{-3} \text{eV}^2]$	$2.53^{+0.08}_{-0.10}$ $-(2.40^{+0.10}_{-0.07})$	2.34 – 2.69 $-(2.25 - 2.59)$	2.26 – 2.77 $-(2.15 - 2.68)$
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.320^{+0.015}_{-0.017}$	0.29–0.35	0.27–0.37
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.49^{+0.08}_{-0.05}$ $0.53^{+0.05}_{-0.07}$	0.41–0.62 0.42–0.62	0.39–0.64
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.026^{+0.003}_{-0.004}$ $0.027^{+0.003}_{-0.004}$	0.019–0.033 0.020–0.034	0.015–0.036 0.016–0.037
δ	$(0.83^{+0.54}_{-0.64}) \pi$ $0.07\pi^a$	$0 - 2\pi$	$0 - 2\pi$

(arXiv:1205.4018v2 [hep-ph], 17 May 2012)

Эксперимент T2K



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)

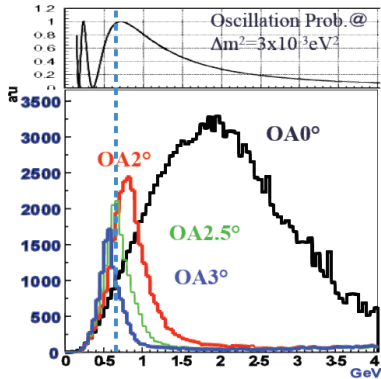


Основные цели эксперимента:

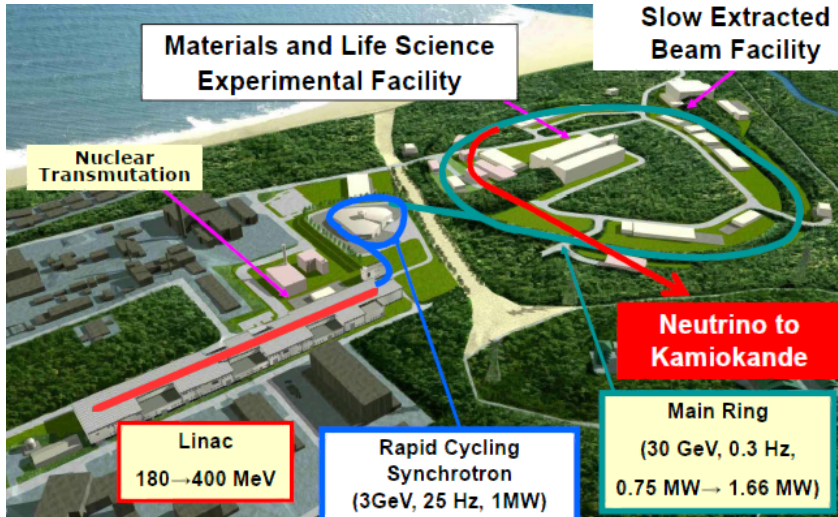
- Изучение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ и измерение θ_{13} с точностью, превышающей точность предыдущих экспериментов.
- Изучение осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ (эксперимент на исчезновение) и измерение соответствующих параметров с точностью $\delta(\Delta m_{23}^2) \approx 10^{-4} \text{ эВ}^2$ и $\delta(\sin^2(2\theta_{23})) \approx 1\%$.

Эксперимент T2K

- Осцилляционный эксперимент II поколения с длинной базой.
- Угол в 2.5° :
 1. Узкий энергетический спектр нейтрино
 2. Максимум осцилляций (600 МэВ)
 3. Дополнительное подавление фоновых процессов

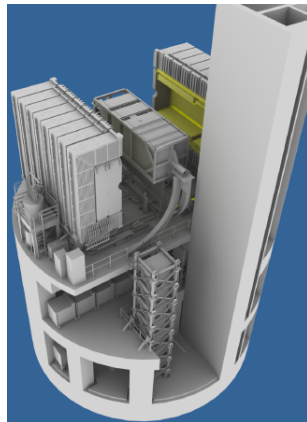
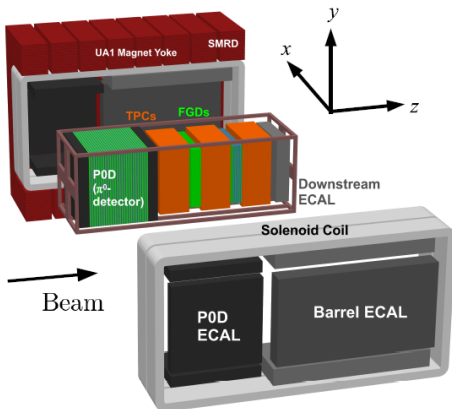


Ускорительный центр J-PARC



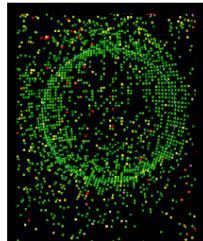
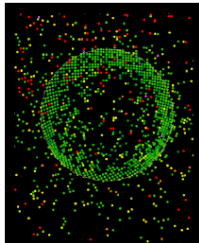
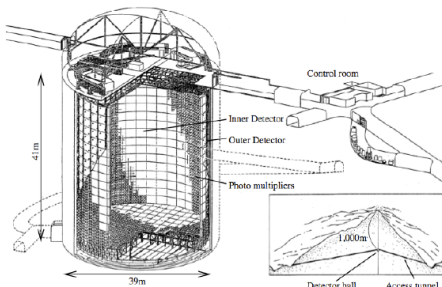
Ближний детектор ND280

1. Off-axis детектор ND280
 - 1.1 Детектор нейтральных пионов P0D
 - 1.2 3 время-проекционные камеры TPC
 - 1.3 2 высокосегментированных сцинтилляционных детектора FGD
 - 1.4 Электромагнитный калориметр ECAL
 - 1.5 Детектор мюонов SMRD (ИЯИ)
 - 1.6 Магнит UA1 (0.2T)
2. On-axis детектор INGRID



Дальний детектор Super-Kamiokande

- Оптимизован для работы в области энергий Т2К (~ 1 ГэВ)
- Высокая эффективность регистрации одиночных событий
- Нейтринный сигнал в Т2К - CCQE-взаимодействия (образование μ , e)
- Разделение мюонов и электронов по форме черенковского кольца



Основные фоны в эксперименте:

- **Примесь электронных нейтрино в исходном пучке**
- Рождение нейтральных пионов, распадающихся на гамма-кванты, в случае, если один из них не регистрируется

Результаты эксперимента T2K

- 2011 — 6 кандидатов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, что указало на $\theta_{13} \neq 0$ (2.5σ).
- Май 2012 — всего 10 кандидатов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (3.2σ).
- $\sin^2 \theta_{13} = 0.104^{+0.060}_{-0.045}$ для $\Delta m_{32}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$, $\theta_{23} = \frac{\pi}{4}$, $\delta = 0$.

Анализ данных

Программное обеспечение

Используется информация экспериментальных данных и Монте-Карло после калибровки и реконструкции. Файлы Монте-Карло содержат также истинную информацию.

1. NEUT

- Генерация нейтринных событий в T2K

2. oaAnalysis

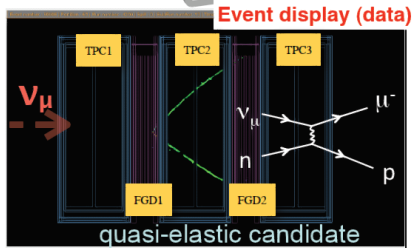
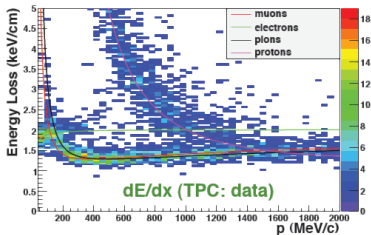
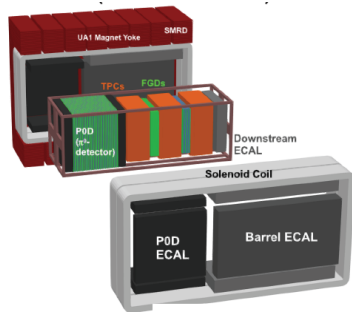
- Файлы, содержащие данные после калибровки и реконструкции
- Инструменты для анализа событий

3. ROOT

- Построение гистограмм

Трекер ND280

- Магнит UA1 (0.2T)
- FGD1, FGD2
 - сцинтилляторы и вода в FGD2
 - эффективная масса 1.6T
- TPC1, TPC2, TPC3
 - Разрешение dE/dx выше 10%
 - Разрешение импульса 10% при 1 ГэВ



Алгоритм отбора ν_μ и ν_e событий

Алгоритм применяется к каждому событию (spill).

1. Число треков ≥ 1 , FGD1-TPC2 или FGD2-TPC3. Максимальный импульс среди отрицательных треков.
2. Точка взаимодействия - в эффективном объеме FGD.
3. Импульс трека ≥ 50 МэВ.
4. Ограничение на pull:
 - Электрон: $|\delta_E(\mu)| < 2.5$, $|\delta_E(e)| > 2$,
 - Мюон: $|\delta_E(\mu)| > 2.5$, $|\delta_E(e)| < 1.5$.

$$\delta_E(i) = \frac{C_T - C_E}{\sigma(i)},$$

i - тип частицы (e , μ , π , K , p), C_T - ожидаемые энергетические потери в TPC, C_E - измеренные энергетические потери в TPC, $\sigma(i)$ - энергетическое разрешение TPC.

5. Для электронов: отсутствие в событии еще положительного трека с инвариантной массой между ними < 200 МэВ.
6. Quality ($\chi^2/NDoF$) < 100 .
7. TPC hits > 20 .

Использованные данные

Статистика соответствует двум сеансам эксперимента (январь 2010 — июнь 2010, ноябрь 2010 — март 2011).

- 1.06×10^{20} POT (данные)
- 1.1×10^{21} POT (MC, NEUT)

Отобранные события:

	μ MC	μ Data	e MC	e DATA
N	55337	5059	1864	261
$N / 10^{16} \text{ POT}^{-1}$	0.503 ± 0.002	0.477 ± 0.007	0.017 ± 0.001	0.025 ± 0.001

Отношение нормализованных чисел Монте-Карло и данных:

$$\frac{N_{\mu}(MC)}{N_{\mu}(Data)} = 1.125 \pm 0.065 \text{ (stat.)}; \quad \frac{N_e(MC)}{N_e(Data)} = 0.680 \pm 0.045 \text{ (stat.)}.$$

Отбор ν_μ событий

$$\text{Purity} = \frac{N_{\text{sel}}(\text{true})}{N_{\text{tot}}(\text{true})}, \quad \text{Efficiency} = \frac{N_{\text{sel}}}{N_{\text{tot}}(\text{true})},$$

где $N_{\text{sel}}(\text{true})$ - число истинных событий среди отобранных (для экспериментальных данных оценивается через Монте-Карло), $N_{\text{tot}}(\text{true})$ - общее число истинных событий.

Монте-Карло:

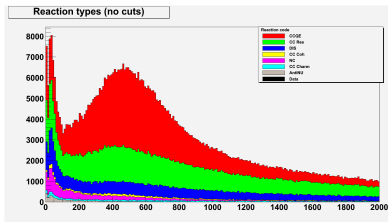
Cut	Events (%)	Efficiency	Purity
Total	16539264 (100%)	100%	
Initial selection	837658 (5.1%)	65%	12%
No TPC1	431011 (2.6%)	58%	22%
FGDFV-TPC	100250 (0.61%)	42%	68%
No low momentum	91205 (0.55%)	42%	73%
Pulls	62247 (0.38%)	35%	90%
Quality	55487 (0.34%)	32%	92%
Hits	55337 (0.33%)	32%	92%

Данные:

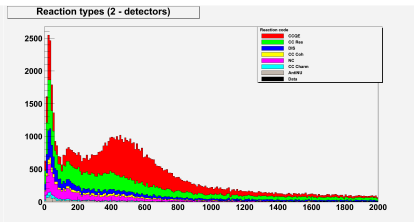
Cut	Events (%)
Total	1868106 (100%)
Initial selection	160873 (8.6%)
No TPC1	53848 (2.9%)
FGDFV-TPC	9813 (0.53%)
No low momentum	8835 (0.47%)
Pulls	5711 (0.31%)
Quality	5068 (0.27%)
Hits	5059 (0.27%)

Отбор ν_μ событий

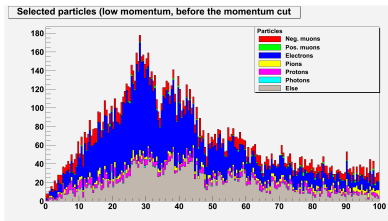
Распределения отобранных событий по импульсам [МэВ] (Монте-Карло):



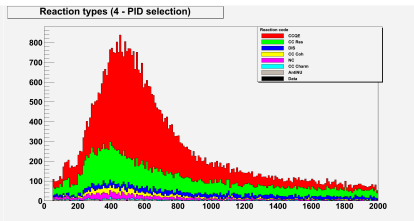
Шаг 1 (типы реакций)



Шаг 2 (типы реакций)



Шаг 2 (типы частиц, $p < 100$ МэВ)

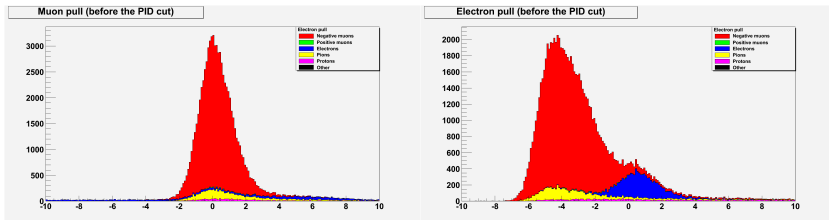


Шаг 4 (типы реакций)

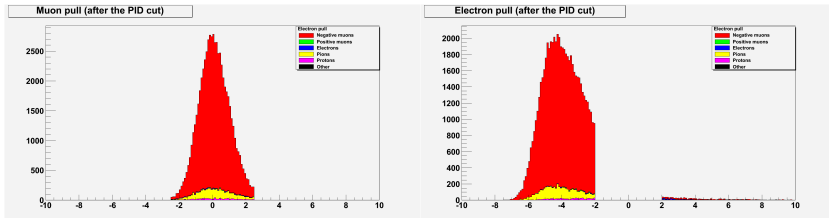
Отбор ν_μ событий

Распределение отобранных событий по pull'ам (типы частиц, Монте-Карло):

До критерия на pull'ы:

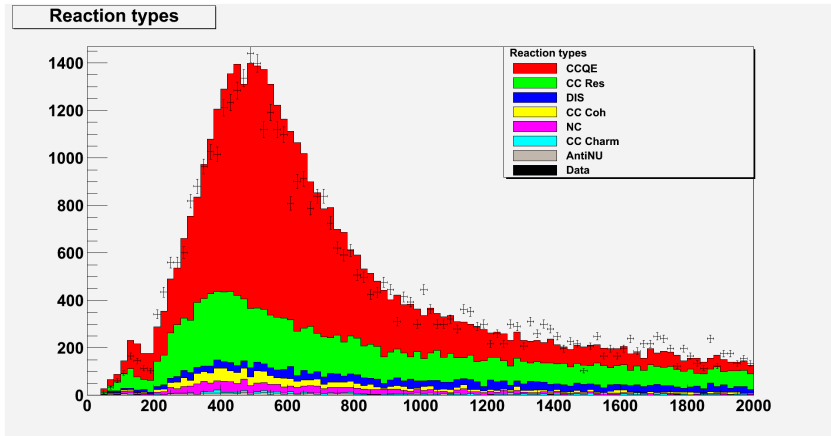


После критерия на pull'ы:



Отбор ν_μ событий

Сравнение Монте-Карло и данных после выполнения алгоритма — распределение по импульсам [МэВ] (типы реакций):



Отбор ν_e событий

Монте-Карло:

Cut	Events (%)	Efficiency	Purity
Total	16539264 (100%)	100%	
Initial selection	837658 (5.1%)	74%	0.28%
No TPC1	431011 (2.6%)	65%	0.47%
FGDFV-TPC	100250 (0.61%)	44%	1.4%
No low momentum	91205 (0.55%)	42%	1.5%
Pulls	7335 (0.044%)	27%	11%
Quality	1888 (0.011%)	12%	20%
Hits	1864 (0.011%)	12%	20%

Данные:

Cut	Events (%)
Total	1868106 (100%)
Initial selection	160873 (8.6%)
No TPC1	53848 (2.9%)
FGDFV-TPC	9813 (0.53%)
No low momentum	8835 (0.47%)
Pulls	909 (0.049%)
Quality	266 (0.014%)
Hits	261 (0.014%)

Оценка примеси ν_e

Примесь можно оценить по следующей формуле:

$$n = \frac{N_e^{CC} \epsilon_\mu}{N_\mu^{CC} \epsilon_e},$$

где N_i^{CC} — число истинных отобранных событий из экспериментальных данных (оценивается через Монте-Карло), ϵ_i — efficiency.

Итоговая оценка:

$$\frac{N_e}{N_\mu} \approx 3\%.$$

Заключение

1. Изучены программы анализа нейтринных событий в ближнем детекторе ND280.
2. Создан алгоритм анализа нейтринных событий, идущих через заряженные токи (инклюзивный анализ) в трековой части ND280 эксперимента T2K.
3. При анализе событий, идущих через заряженные токи, в трековой части ND280 для мюонных нейтрино эффективность отбора событий составила 32%, “чистота” — 92%. Для отобранных событий отношение MC/данные составило $\frac{N_{\mu}(MC)}{N_{\mu}(Data)} = 1.125 \pm 0.065 (stat.)$.
4. Для анализа ν_e CC-событий в трековой части ND280 эффективность отбора составила 12%, “чистота” — 20%, отношение MC/данные — $\frac{N_e(MC)}{N_e(Data)} = 0.680 \pm 0.045 (stat.)$.
5. Выполнена предварительная оценка примеси электронных нейтрино в первичном пучке эксперимента T2K. $\frac{N_e}{N_{\mu}} \approx 3\%$.

Дальнейшие планы

- Вычислить статистические и систематические ошибки
- Включить в анализ ECAL
- Провести подробный анализ CCQE-взаимодействий для ν_μ
- Используя статистику, собираемую в ходе 3-го сеанса эксперимента, улучшить анализ CC-взаимодействий для ν_e