

Оптимизация чувствительности нейтринных ускорительных экспериментов для измерения иерархии масс нейтрино

Колупаева Л.

под руководством:
д.ф.-м.н., профессора Ольшевского А.Г.
к.ф.-м.н. Самойлова О.Б.

Осцилляции нейтрино

матрица PMNS

$$U = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{23}c_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{23}s_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - c_{23}c_{12}s_{13}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - c_{23}s_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}$$

параметры: $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$, CP фаза δ , $|\Delta m_{31}^2|$, Δm_{21}^2 , знак Δm_{31}^2

Используемые значения параметров (NOW 2014)

$$\Delta m_{21}^2 = 7.5_{-0.17}^{+0.19} \times 10^{-5} \text{ eV}^2,$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.3_{-0.012}^{+0.013},$$

$$\Delta m_{32}^2 = 2.457_{-0.047}^{+0.047} \times 10^{-3} \text{ eV}^2,$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.452_{-0.028}^{+0.052},$$

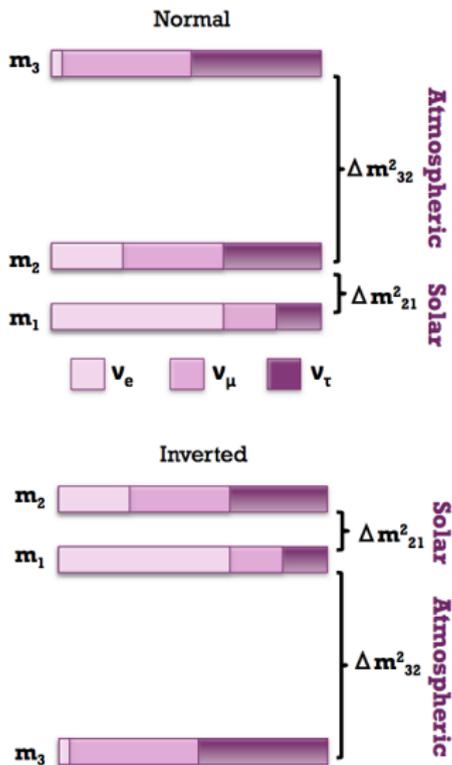
$$\delta_{\text{CP}} \in [0; 2\pi],$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.0218_{-0.0010}^{+0.0010}.$$

Проблема иерархии масс нейтрино

1) нормальная иерархия нейтринных масс $m_1 < m_2 \ll m_3$

2) обратная иерархия нейтринных масс $m_3 \ll m_1 < m_2$



Проблема иерархии масс нейтрино

1) нормальная иерархия нейтринных масс $m_1 < m_2 \ll m_3$

$$m_1 \ll \sqrt{\Delta m_{21}^2}$$

$$m_2 \simeq \sqrt{\Delta m_{21}^2} (\sim 8.6 \cdot 10^{-3} \text{eV})$$

$$m_3 \simeq \sqrt{\Delta m_{32}^2} (\sim 5 \cdot 10^{-2} \text{eV})$$

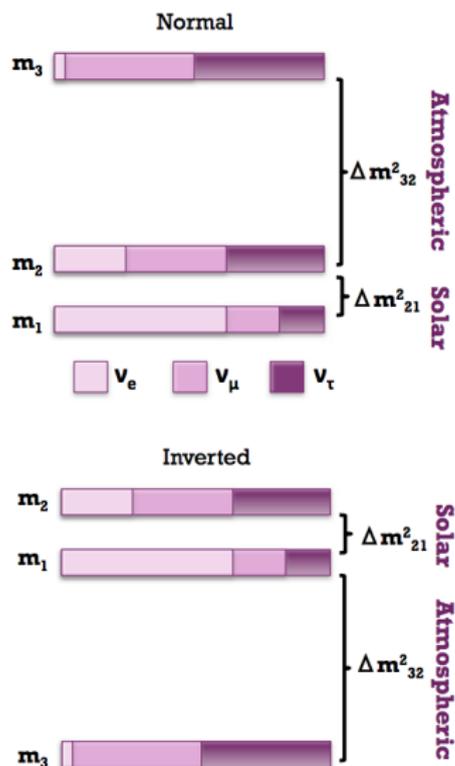
2) обратная иерархия нейтринных масс $m_3 \ll m_1 < m_2$

$$m_3 \ll \sqrt{|\Delta m_{31}^2|}$$

$$m_1 \simeq \sqrt{|\Delta m_{31}^2|} (\sim 5 \cdot 10^{-2} \text{eV})$$

$$m_2 \simeq \sqrt{|\Delta m_{31}^2|} \left(1 + \frac{\Delta m_{21}^2}{2|\Delta m_{31}^2|}\right)$$

$$(\sim 5.1 \cdot 10^{-2} \text{eV})$$



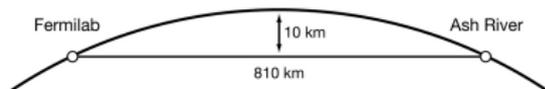
The NuMI Off-Axis ν_e Appearance Experiment

NuMI FermiLab

Цели эксперимента *NO ν A* :

- 1) иерархии нейтринных масс (эффект вещества для $\nu, \bar{\nu}$)
- 2) нарушения CP фазы в лептонном секторе
- 3) угол смешивания θ_{13} из матрицы PMNS
- 4) и октант для θ_{23} (больше 45° или меньше).

810 km, 14mrad вне оси,
14kt, 300t



General Long Baseline Experiment Simulator

$N \sim \text{Probability} \times \text{Flux} \times \text{Cross Section} \times \text{Detector Efficiency}$

$$\chi^2 = 2 \sum_{\text{exp}} \sum_{\text{rules}} \sum_{\text{bins}} \left(N^{\text{th}} - N^{\text{obs}} + N^{\text{obs}} \log \frac{N^{\text{obs}}}{N^{\text{th}}} \right) + \chi_{\text{pull}}^2 + \chi_{\text{prior}}^2$$

$$\chi_{\text{pull}}^2 = \frac{a^2}{\sigma_a^2} + \frac{b^2}{\sigma_b^2} + \frac{c^2}{\sigma_c^2} + \frac{d^2}{\sigma_d^2}$$

pull-method:

$$N_i^{\text{obs}} = s_i(a, b) + b_i(c, d)$$

$$s_i(a) = (1 + a) \cdot s_i$$

$$s_i(a, b) = s_i(a) + b \cdot s_i \cdot \frac{E_i - E_{\text{mean}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}$$

Чувствительность

$$\sigma = \sqrt{\Delta\chi^2} = \sqrt{\chi_{hyp}^2 - \chi_{hyp2}^2}$$

Иерархия масс (МН):

- нормальная иерархия (NH: $\Delta m_{32}^2 > 0$) или
- обратная иерархия (IH: $\Delta m_{32}^2 < 0$)

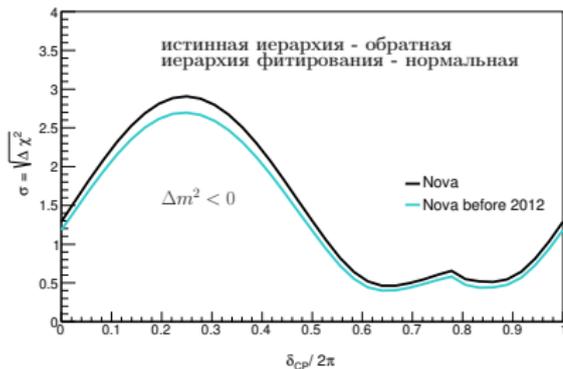
МН:

$$\Delta\chi^2 = |\chi_{MN}^{2test} - \chi_{MN}^{2true}|$$

Рассматриваются два случая:

- 1) истинная иерархия - нормальная, иерархия фитирования - обратная
- 2) истинная - обратная, иерархия фитирования - нормальная

Чувствительность $NO\nu A$ к измерению иерархии

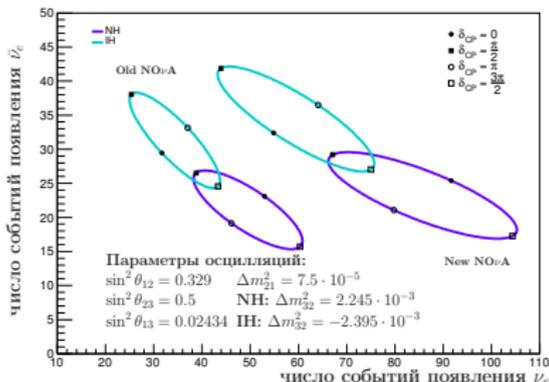


ожидаемые числа событий $NO\nu A$ (до 2012) $NO\nu A$	появление ν_e фон сигнал		исчезновение ν_μ фон сигнал	
		52	90	2
	11	36	20	210

$NO\nu A$ (до 2012): $\sin \theta_{13} \sim 0.001$

$NO\nu A$: $\sin \theta_{13} \sim 0.15$ (Daya Bay)

Число событий для $NO\nu A$ и $NO\nu A$ (до 2012)



Изучение точности теоретических приближений

уравнение для осцилляций в веществе:

$$i\dot{S}(t) = (UH_0U^\dagger + W(t))S(t) = H(t)S(t)$$

$$U = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{23}c_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{23}s_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - c_{23}c_{12}s_{13}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - c_{23}s_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}$$

$$H = U \begin{pmatrix} 0 & & \\ & \frac{\Delta m_{21}^2}{2E} & \\ & & \frac{\Delta m_{31}^2}{2E} \end{pmatrix} U^\dagger + \begin{pmatrix} \pm\sqrt{2}G_f N_e & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

$$S = Q \begin{pmatrix} e^{-iL\lambda_1} & & \\ & e^{-iL\lambda_2} & \\ & & e^{-iL\lambda_3} \end{pmatrix} Q^\dagger$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |S_{\beta\alpha}|^2$$

[1 α]

формула из: [Jianming Bian, The $NO\nu A$ Experiment: Overview and Status, DPF2013, arXiv:1309.7898]

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2(A-1)\Delta}{(A-1)^2} +$$
$$+ 2\alpha \sin \theta_{13} \cos \delta \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \frac{\sin A\Delta \sin(A-1)\Delta}{A(A-1)} \cos \Delta -$$
$$- 2\alpha \sin \theta_{13} \sin \delta \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \frac{\sin A\Delta \sin(A-1)\Delta}{A(A-1)} \sin \Delta$$

$$\alpha = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2}, \quad \Delta \equiv \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}, \quad A \equiv \pm \frac{G_f n_e L}{\sqrt{2}\Delta}, \quad A\Delta = \frac{L}{3500 \text{ km}}$$

[2 α]

формула из: [Combined Analysis of ν_μ disappearance and $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Appearance in MINOS using Accelerator and Atmospheric Neutrinos, The MINOS Collaboration, Phys. Rev. Lett. 112, 191801 (2014).]

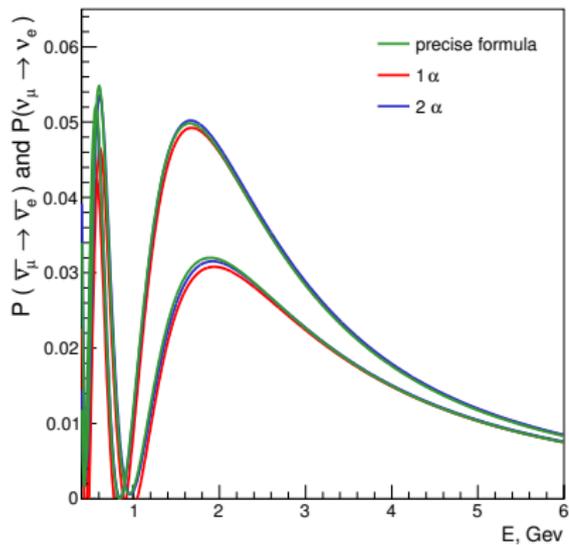
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \frac{\sin^2 \Delta(1-A)}{(1-A)^2}$$

$$+ \alpha \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \cos(\Delta \pm \delta_{CP}) \frac{\sin \Delta A}{A} \frac{\sin \Delta(1-A)}{(1-A)}$$

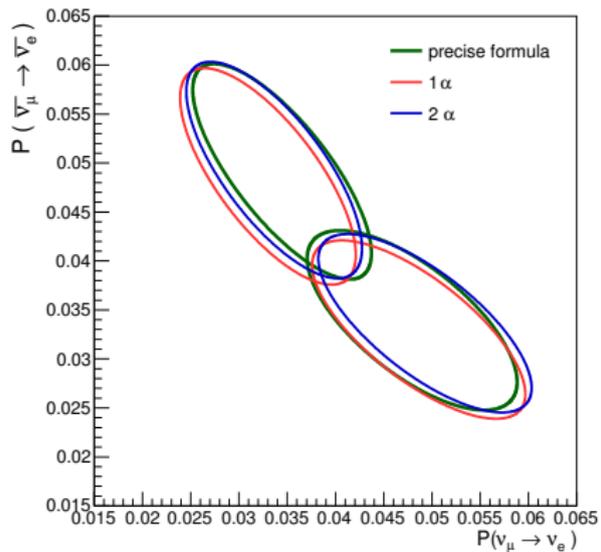
$$+ \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2 \Delta A}{A^2}$$

$$\alpha = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{32}^2}, \quad \Delta \equiv \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}, \quad A \equiv \pm \frac{G_f n_e L}{\sqrt{2}\Delta}, \quad A\Delta = \frac{L}{3500 \text{ km}}$$

Normal hierarchy, Probability



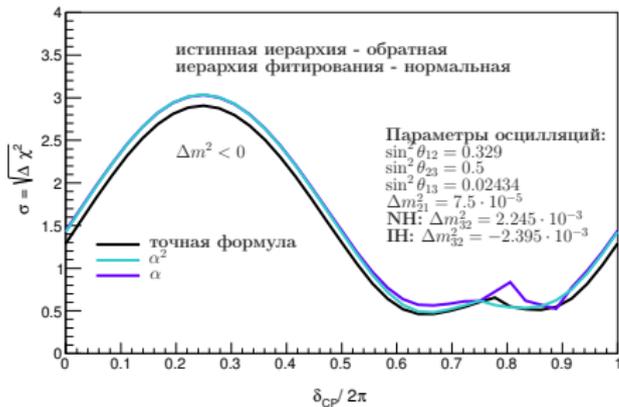
NH & IH & δ_{CP}



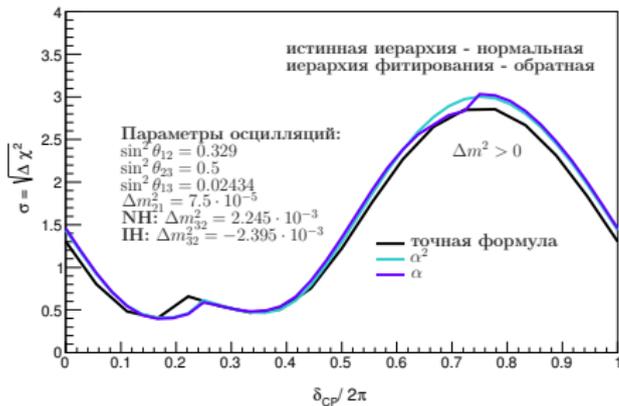
$$\delta_{CP} = \frac{3\pi}{2} :$$

стат. $\sim 10\%$
 сист. $\sim 6\%$

Чувствительность NO ν A к измерению иерархии

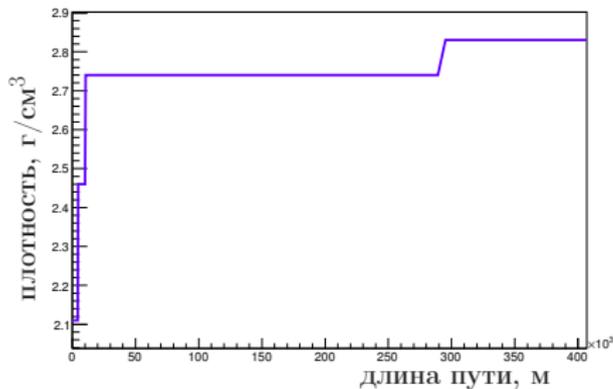


Чувствительность NO ν A к измерению иерархии

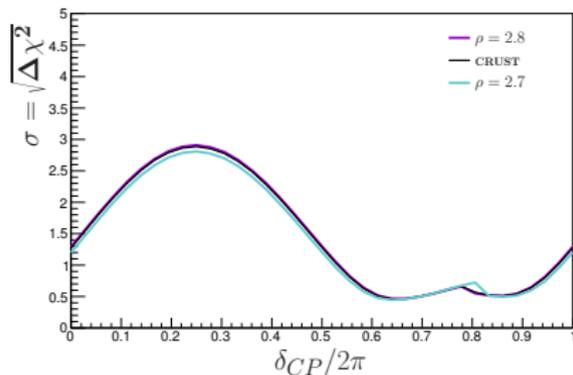


Влияние вариации плотности вещества

Плотность по CRUST

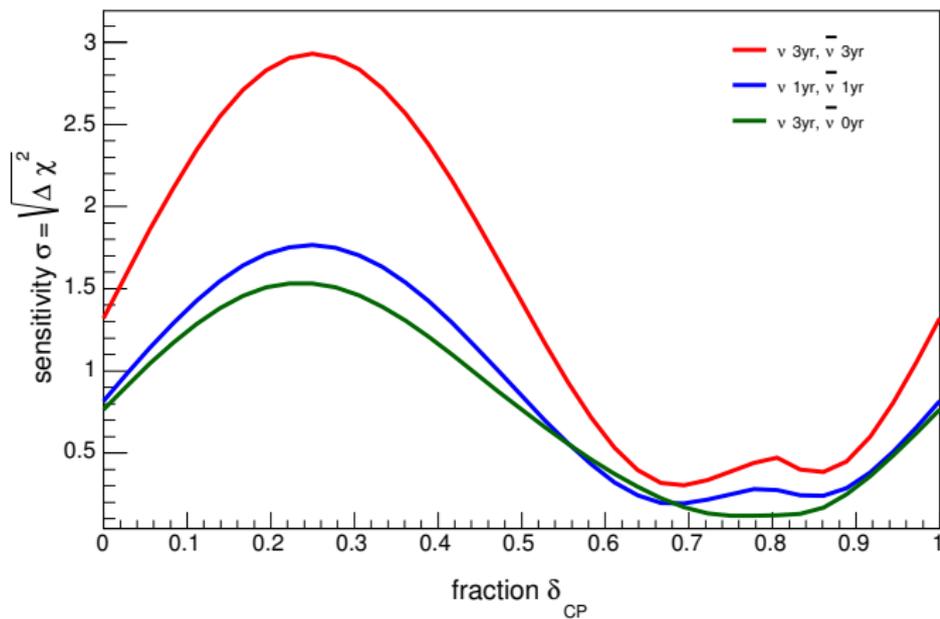


Чувствительность NO ν A и плотность



Выбор стратегии набора данных

Mass Hierarchy Sensitivity



Результаты

- ▶ Разработан аппарат для выявления влияния разных факторов на чувствительность
- ▶ Выбор формулы для обработки результатов эксперимента оказывает влияние на систематику ($\sim 6\%$)
- ▶ Возможные вариации плотности вещества на пути пучка, оцененные по существующим моделям Земли, оказывают небольшое влияние на систематические ошибки ($\sim 2\%$)
- ▶ В эксперименте используется схема $3\nu + 3\bar{\nu}$, которая действительно является самой оптимальной. Однако, работа в течение 2 лет в режимах $1\nu + 1\bar{\nu}$ является более эффективной, чем непрерывный набор 3ν .

Часть результатов работы была представлена в виде постерного доклада молодых ученых на 42-ой сессии ПКК по физике частиц 26–27 января 2015:

Lyudmila Kolupaeva, Olga Petrova, Igor Shandrov “Some theoretical uncertainties of the oscillation effect in NOvA experiment”

По результатам работы готовится к публикации статья в журнал Письма в ЖЭТФ.