

Подземный нейтринный эксперимент DUNE – расчёт чувствительности к измерению параметров осцилляций

Deep underground neutrino experiment DUNE – calculation of sensitivity
to the measurement of oscillation parameters

Автор: Степанова Анна
Соавторы: Гончар Максим, Колупаева Людмила,
Тресков Константин

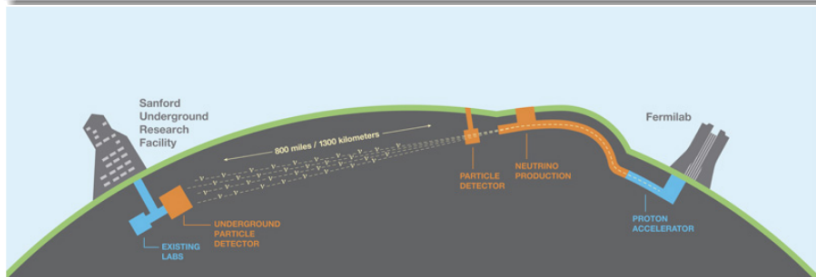
Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова, ОИЯИ

15 декабря 2021

DUNE - Deep Underground Neutrino Experiment

Преимущества DUNE:

- работа с широким энергетическим диапазоном: 0.5 - 8 ГэВ
- длинная база осцилляций: 1284.9 км
- доверительный объём дальнего детектора: 40 кт ^{40}Ar



Основная цель:

выполнение программы по изучению осцилляций нейтрино в парадигме 3-х флейворных состояний нейтрино Стандартной Модели

Осцилляции нейтрино в вакууме

Матрица Понтекорво – Маки – Накагавы – Сакаты:

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

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

Частота осцилляций зависит от расщепления масс:

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2, (i, j = 1, 2, 3) \text{ и выполняется соотношение:}$$

$$\Delta m_{31}^2 = \Delta m_{32}^2 + \Delta m_{21}^2$$

Параметры осцилляций:

- 3 угла смешивания – θ_{12} , θ_{13} , $\theta_{23} \in [0, \frac{\pi}{2}]$
- CP-фаза: $\delta_{CP} \in [0, 2\pi]$
- 2 расщепления масс – Δm_{21}^2 , Δm_{31}^2 и знак Δm_{31}^2

Задачи DUNE

На сегодняшний день весь комплекс нейтринных экспериментов измерил 5 осцилляционных параметров: θ_{12} , θ_{13} , θ_{23} , Δm_{21}^2 , Δm_{31}^2 .

Но пока неизвестны:

- иерархия масс нейтрино (знак Δm_{31}^2)
- фаза комбинированной чётности δ_{CP}
- октант, в котором находится угол смешивания θ_{23}

Измерить неизвестные параметры – одна из задач DUNE, поэтому необходимо оценить его чувствительность к ним. А также задача DUNE – уточнить *все* известные параметры осцилляций.

Изучение чувствительности эксперимента

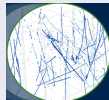
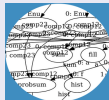
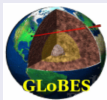
Основывается:

- на моделировании сигнальных и фоновых событий: ν , $\bar{\nu}$ режимы:
 - ν_e появление: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ сигнал, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ фон, $\nu_e \rightarrow \nu_e$ фон, ...
 - $\bar{\nu}_e$ появление: $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ сигнал, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ фон, $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ фон, ...
 - ν_μ исчезновение: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ сигнал, НС фон, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ фон, ...
 - $\bar{\nu}_\mu$ исчезновение: $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ сигнал, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ фон, ...
- на методах и инструментах анализа данных

Проведено в:

- GLoBES - General Long Baseline Experiment Simulator (classic)
- GNA - Global Neutrino Analysis (new)

Взяты во внимание результаты [Technical Design Report](#): arxiv:2002.03005



GNA. Разработано в ЛЯП, ОИЯИ



Программное обеспечение, созданное для **проведения полного осцилляционного анализа** в экспериментах разного типа: реакторных, ускорительных и др.

Особенности:

- **независимые вычислительные блоки, объединенные в граф**
- вычисления через особые функции – преобразования, реализованные на языке **C++**
- интерфейс на языке **Python**
- управление моделью через командную строку
- доступны функции и методы **ROOT**

Возможности:

- удобство задания модели и внесения изменений в неё
- все операции: от умножения массивов до построения карты доверительных интервалов
- **высокая скорость вычислений и эффективность работы**
- варьирование параметров, минимизация и фитирование, построение графиков ⇒ проведение полного осцилляционного анализа

Задача работы – ускорительная оболочка в GNA

Соавторами широко развит анализ данных реакторных экспериментов в GNA: JUNO, Daya Bay

Цели:

- разработать удобную структуру входного файла для ускорительных экспериментов;
- создать оболочку с классическими функциями для проведения осцилляционного анализа;
- моделировать другие ускорительные эксперименты в ней: NOvA, T2K и др.

```

FLOXES:
Nu:
  name: input_data/dune/flax/flax_fhc_nu0.txt
  nu0: input_data/dune/flax/flax_fhc_nu0.txt
  number: input_data/dune/flax/flax_fhc_nu0bar.txt
  nu0bar: input_data/dune/flax/flax_fhc_nu0bar.txt

nu1:
  name: input_data/dune/flax/flax_fhc_nu1.txt
  nu1: input_data/dune/flax/flax_fhc_nu1.txt
  number: input_data/dune/flax/flax_fhc_nu1bar.txt
  nu1bar: input_data/dune/flax/flax_fhc_nu1bar.txt

CROSS_SECTION:
CC:
  name: input_data/dune/xsec/xsec_nue_cc.txt
  name: input_data/dune/xsec/xsec_nu0_cc.txt
  number: input_data/dune/xsec/xsec_nu0bar_cc.txt
  number: input_data/dune/xsec/xsec_nu0bar_cc.txt
  ntau0: input_data/dune/xsec/xsec_nu0bar_cc.txt
  ntau0bar: input_data/dune/xsec/xsec_nu0bar_cc.txt

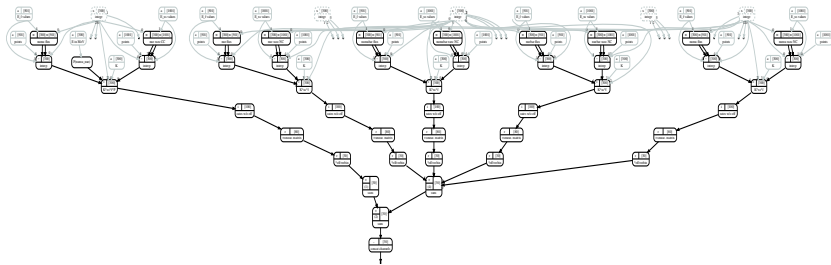
NC:
  name: input_data/dune/xsec/xsec_nue_nc.txt
  name: input_data/dune/xsec/xsec_nu0_nc.txt
  number: input_data/dune/xsec/xsec_nu0bar_nc.txt
  number: input_data/dune/xsec/xsec_nu0bar_nc.txt
  ntau0: input_data/dune/xsec/xsec_nu0bar_nc.txt
  ntau0bar: input_data/dune/xsec/xsec_nu0bar_nc.txt]

SPREADING_MATRIX:
APP:
  nu0_sig: input_data/dune/smeat/app_nu0_sig.txt
  nu0bar_sig: input_data/dune/smeat/app_nu0bar_sig.txt
  nue_bkg: input_data/dune/smeat/app_nue_bkg.txt
  nu0bar_bkg: input_data/dune/smeat/app_nu0bar_bkg.txt
  nu0_bkg: input_data/dune/smeat/app_nu0_bkg.txt
  nu0bar_bkg: input_data/dune/smeat/app_nu0bar_bkg.txt
  ntau0_bkg: input_data/dune/smeat/app_nu0_bkg.txt
  ntau0bar_bkg: input_data/dune/smeat/app_nu0bar_bkg.txt
  NC: input_data/dune/smeat/app_NC_bkg.txt

DIS:
  nu0u_sig: input_data/dune/smeat/dis_nu0u_sig.txt
  nu0bar_sig: input_data/dune/smeat/dis_nu0bar_sig.txt
  nu0u_bkg: input_data/dune/smeat/dis_nu0u_bkg.txt
  nu0bar_bkg: input_data/dune/smeat/dis_nu0bar_bkg.txt

MODE:
app_nue:
ch:
sig:
  1.1:
  type: sig
  horn_current: fhc
  initial_flavor: nu0
  final_flavor: nue
  xsec_type: CC
  eff: input_data/dune/effic/app_sig_nue_fhc.txt
  1.2:
  type: sig
  horn_current: fhc
  initial_flavor: nu0bar
  final_flavor: nuebar
  xsec_type: CC
  eff: input_data/dune/effic/app_sig_nu0bar_fhc.txt
bkg:
  1.1:
  horn_current: fhc
  initial_flavor: nue
  final_flavor: nue
  xsec_type: CC
  eff: input_data/dune/effic/app_bkg_nue_fhc.txt
  1.2:
  horn_current: fhc
  initial_flavor: nu0bar
  final_flavor: nuebar
  xsec_type: CC
  eff: input_data/dune/effic/app_bkg_nu0bar_fhc.txt
  1.3:
  horn_current: fhc
  initial_flavor: nu0
  final_flavor: nu0
  xsec_type: NC
  eff: input_data/dune/effic/app_bkg_nc_fhc.txt
  1.4:
  horn_current: fhc
  initial_flavor: nue
  final_flavor: nue
  xsec_type: NC
  eff: input_data/dune/effic/app_bkg_nc_fhc.txt
  1.5:
  horn_current: fhc
  initial_flavor: nu0bar
  final_flavor: nu0bar
  
```

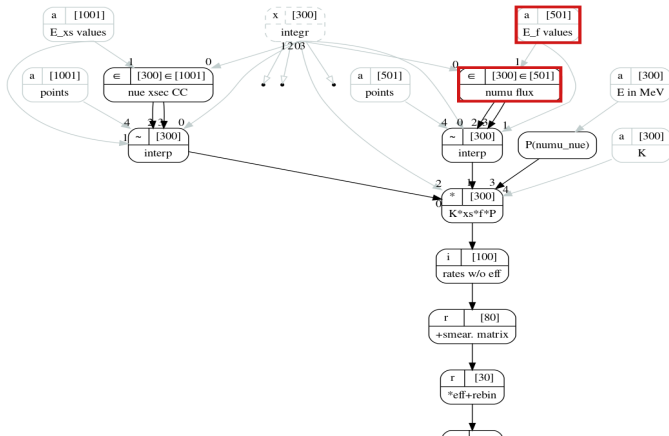
Фрагмент графа модели DUNE в GNA



$$N_{CC} = K \int f(E) \cdot P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e)(E) \cdot xs(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$

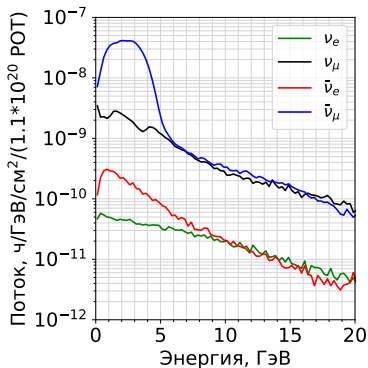
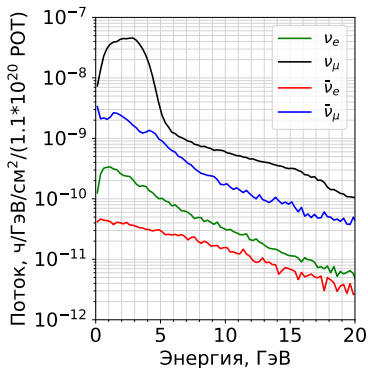
$$N_{NC} = K \int f(E) \cdot xs(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$

Фрагмент графа модели DUNE в GNA



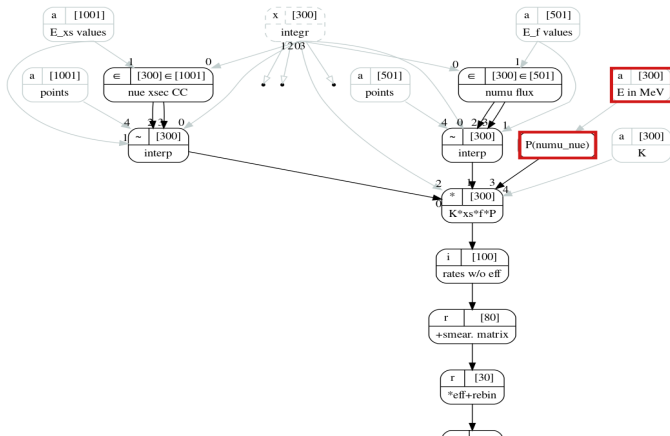
$$N_{CC} = K \int f(E) \cdot P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)(E) \cdot xs(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$

Потоки в режиме нейтрино (слева) и антинейтрино (справа)



Взяты из Монте – Карло моделирования DUNE

Фрагмент графа модели DUNE в GNA

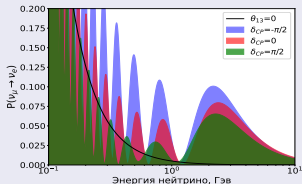


$$N_{CC} = K \int f(E) \cdot P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e)(E) \cdot xs(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$

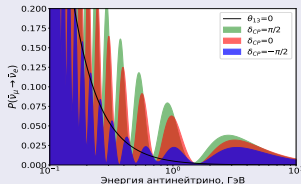
Вероятность осцилляций в веществе из ν_μ в ν_e :

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

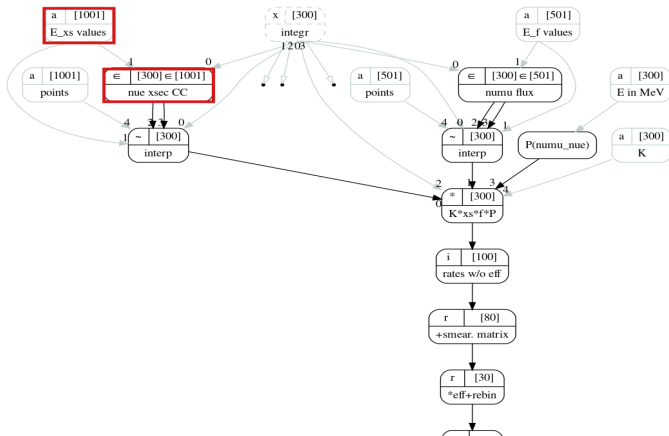
где $\Delta_{ij} = 1,27 \cdot \Delta m_{ij}^2 L/E$ ($i, j = 1, 2, 3$), $a = G_F N_e / \sqrt{2}$ – эффект вещества, G_F – константа Ферми, N_e – плотность количества электронов в Земле.



Нормальная иерархия

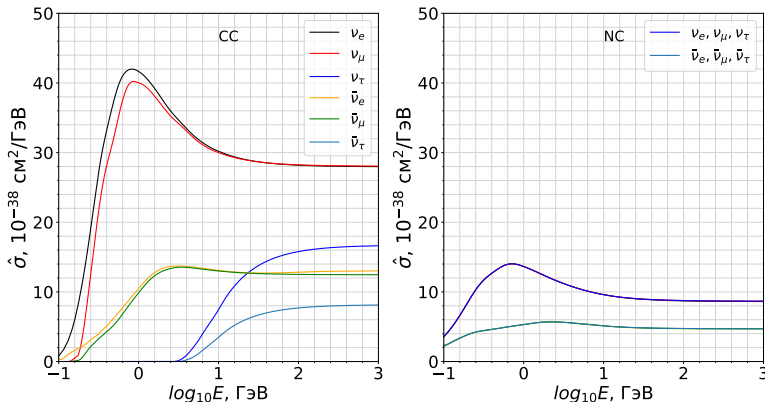


Фрагмент графа модели DUNE в GNA



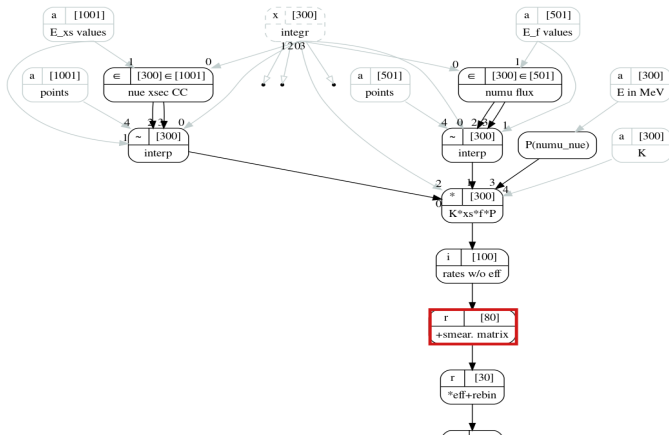
$$N_{CC} = K \int f(E) \cdot P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e)(E) \cdot xs(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$

Сечения взаимодействия нейтрино и антинейтрино с ^{40}Ar через CC (слева) и NC (справа)



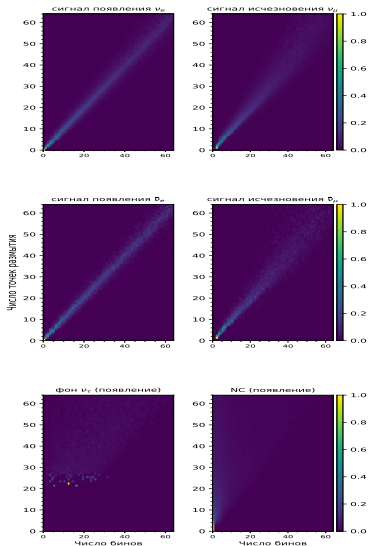
Взяты из нейтринного Монте – Карло генератора GENIE

Фрагмент графа модели DUNE в GNA



$$N_{CC} = K \int f(E) \cdot P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e)(E) \cdot xs(E) \cdot \mathbf{SM} \cdot eff(E) \cdot dE$$

Матрицы размытия

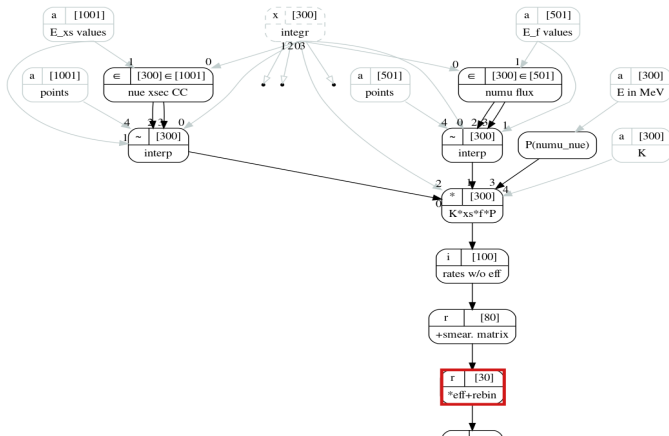


Они показывают то, насколько правильно восстанавливается энергия относительно истинных значений энергий в диапазоне от 0 до 8 ГэВ.

Восстановленной энергией нейтрино считается сумма лептонной и адронной энергии.

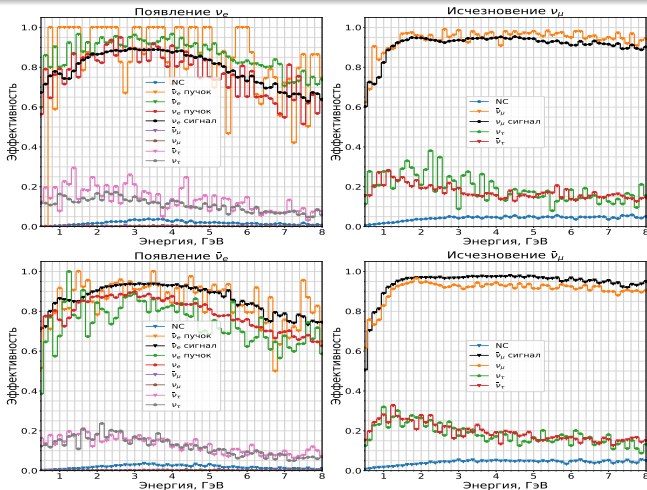
Взяты из Монте – Карло моделирования DUNE

Фрагмент графа модели DUNE в GNA



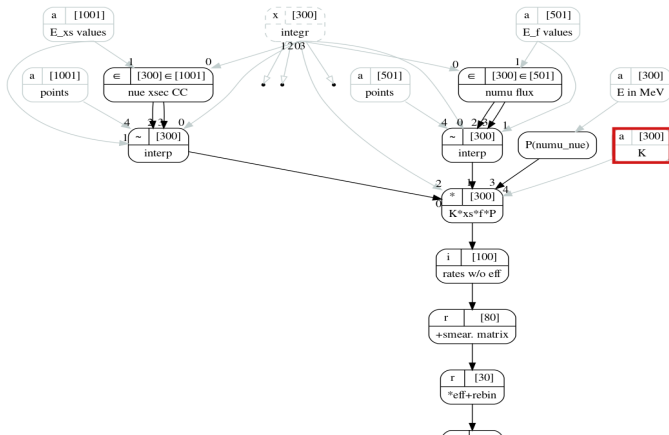
$$N_{CC} = K \int f(E) \cdot P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e)(E) \cdot xs(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$

Эффективности отбора для всех каналов



Взяты из Монте – Карло моделирования DUNE

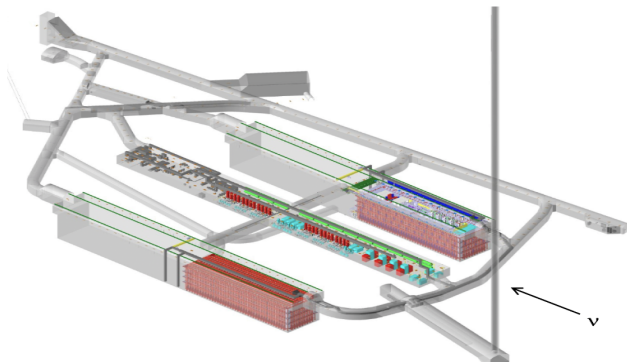
Фрагмент графа модели DUNE в GNA



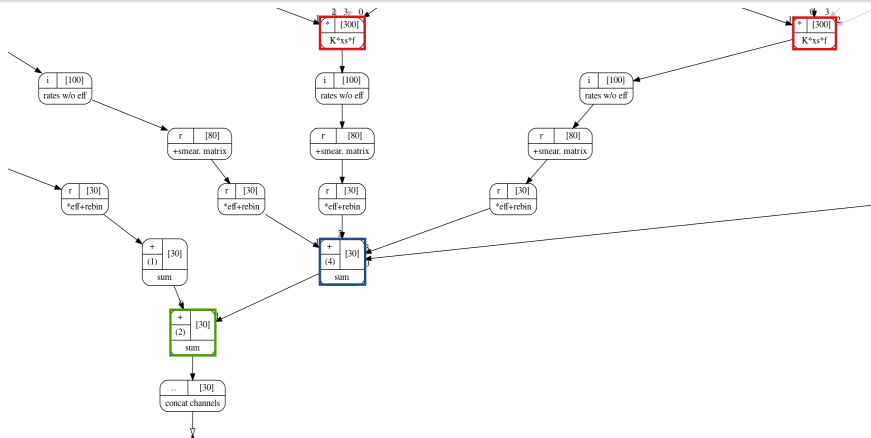
$$N_{CC} = K \int f(E) \cdot P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e)(E) \cdot xs(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$

Параметр эксперимента

$$K = \text{нормировочный коэффициент } k \times \\ \times \text{ число протонов на мишень } POT \times \text{ время работы } t \times \\ \times \text{ масса } {}^{40}\text{Ar } m$$

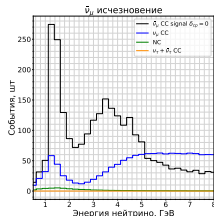
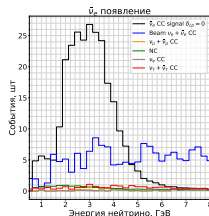
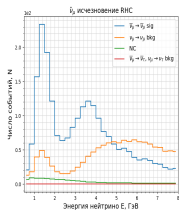
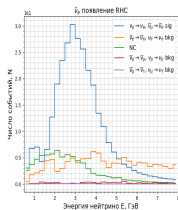
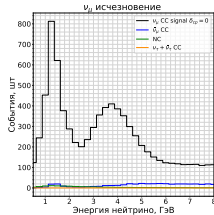
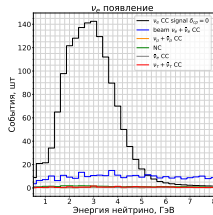
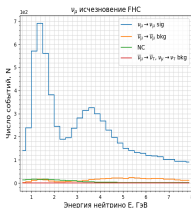
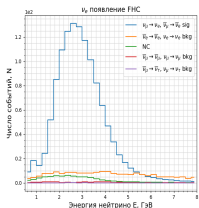


Фрагмент графа модели DUNE в GNA



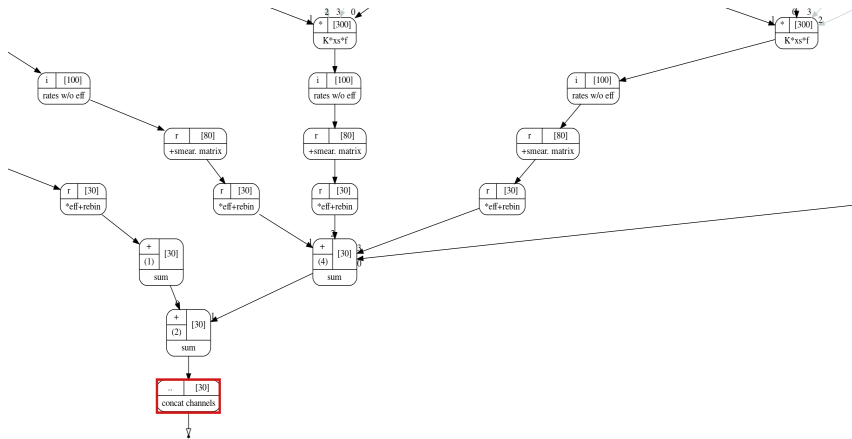
$$N_{NC} = K \int f(E) \cdot xs(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$

Гистограммы чисел событий в GNA (слева) и в GLoBES (справа)



Появление: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Исчезновение: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$

Фрагмент графа модели DUNE в GNA



Расчёт чувствительности к иерархии масс нейтрино

$$\bullet \sigma_{MO} = \sqrt{\Delta\chi_{MO}^2} = \sqrt{\chi_{IO}^{2(test)} - \chi_{NO}^{2(true)}}$$

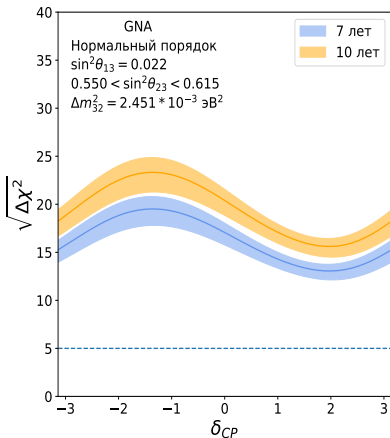
$$\bullet \sigma_{\delta_{CP}} = \sqrt{\Delta\chi_{\delta_{CP}}^2} = \sqrt{\min(\chi_{\delta_{CP}=0}^{2(test)}, \chi_{\delta_{CP}=\pi}^{2(test)}) - \chi_{\delta_{CP}}^{2(true)}}$$

$$\bullet \sigma_{octant, < \pi/4} = \sqrt{\Delta\chi_{octant, < \pi/4}^2} = \sqrt{\min(\chi_{> \pi/4}^{2(test)}) - \chi_{< \pi/4}^{2(true)}}$$

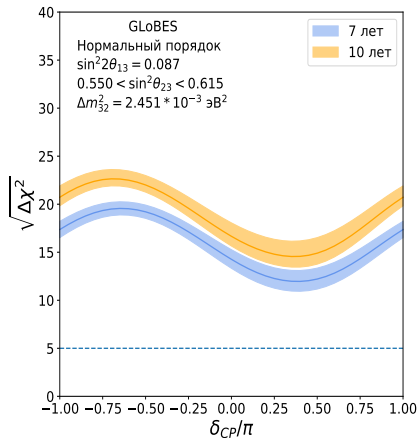
$$\sigma_{octant, > \pi/4} = \sqrt{\Delta\chi_{octant, > \pi/4}^2} = \sqrt{\min(\chi_{< \pi/4}^{2(test)}) - \chi_{> \pi/4}^{2(true)}}$$

Чувствительность к иерархии масс нейтрино

GNA



GLoBES



Расчёт чувствительности к CP-фазе

$$\bullet \sigma_{MO} = \sqrt{\Delta\chi_{MO}^2} = \sqrt{\chi_{IO}^{2(test)} - \chi_{NO}^{2(true)}}$$

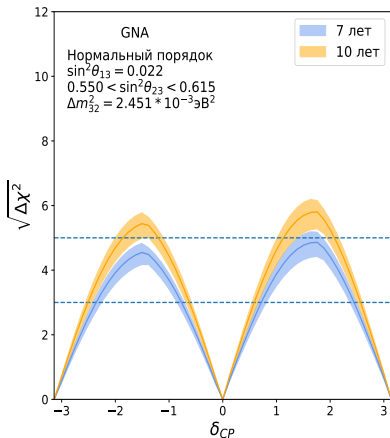
$$\bullet \sigma_{\delta_{CP}} = \sqrt{\Delta\chi_{\delta_{CP}}^2} = \sqrt{\min(\chi_{\delta_{CP}=0}^{2(test)}, \chi_{\delta_{CP}=\pi}^{2(test)}) - \chi_{\delta_{CP}}^{2(true)}}$$

$$\bullet \sigma_{octant, < \pi/4} = \sqrt{\Delta\chi_{octant, < \pi/4}^2} = \sqrt{\min(\chi_{> \pi/4}^{2(test)}) - \chi_{< \pi/4}^{2(true)}}$$

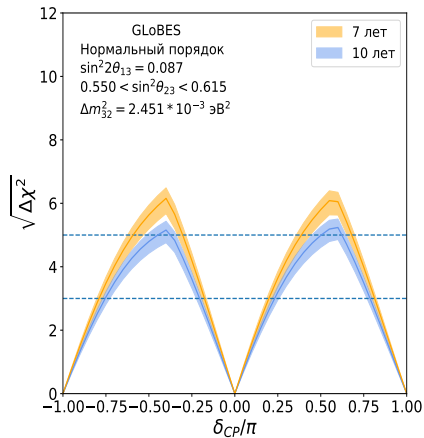
$$\sigma_{octant, > \pi/4} = \sqrt{\Delta\chi_{octant, > \pi/4}^2} = \sqrt{\min(\chi_{< \pi/4}^{2(test)}) - \chi_{> \pi/4}^{2(true)}}$$

Чувствительность к CP-фазе

GNA



GLoBES



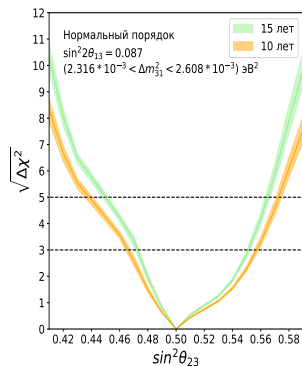
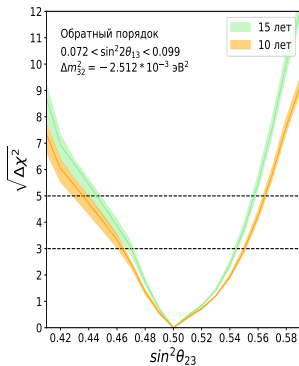
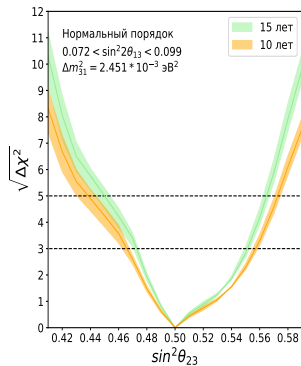
Расчёт чувствительности к октанту угла θ_{23}

- $\sigma_{MO} = \sqrt{\Delta\chi_{MO}^2} = \sqrt{\chi_{IO}^{2(test)} - \chi_{NO}^{2(true)}}$

- $\sigma_{\delta_{CP}} = \sqrt{\Delta\chi_{\delta_{CP}}^2} = \sqrt{\min(\chi_{\delta_{CP}=0}^{2(test)}, \chi_{\delta_{CP}=\pi}^{2(test)}) - \chi_{\delta_{CP}}^{2(true)}}$

- $\sigma_{octant, < \pi/4} = \sqrt{\Delta\chi_{octant, < \pi/4}^2} = \sqrt{\min(\chi_{> \pi/4}^{2(test)}) - \chi_{< \pi/4}^{2(true)}}$
- $\sigma_{octant, > \pi/4} = \sqrt{\Delta\chi_{octant, > \pi/4}^2} = \sqrt{\min(\chi_{< \pi/4}^{2(test)}) - \chi_{> \pi/4}^{2(true)}}$

Чувствительность к октанту угла θ_{23} в GLoBES



Физический результат

В соответствии с полученными чувствительностями DUNE сможет измерить неизвестные параметры осцилляций нейтрино и приблизит расширенную Стандартную Модель элементарных частиц к завершению.

Технический результат

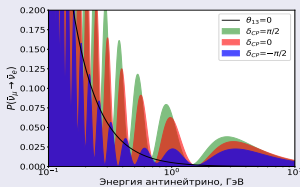
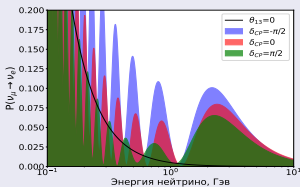
Разработана универсальная оболочка для проведения осцилляционного анализа в ускорительных экспериментах с длинной базой в GNA. Получено согласие результатов GNA с GLoBES на примере эксперимента DUNE.

Спасибо за внимание!

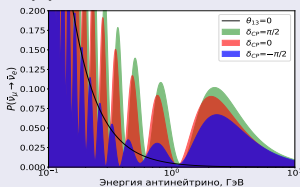
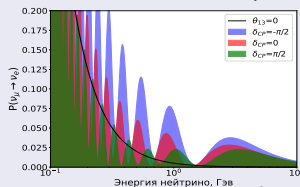
Данные глобального фитирования NuFIT 4.0

Параметр	Центральное значение	Относительная погрешность, %
θ_{12}	0.5903	2.3
θ_{23} (NO)	0.866	4.1
θ_{23} (IO)	0.869	4.0
θ_{13} (NO)	0.150	1.5
θ_{13} (IO)	0.151	1.5
Δm_{21}^2	$7.39 \cdot 10^{-5} \text{ эВ}^2$	2.8
Δm_{31}^2 (NO)	$2.451 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$	1.3
Δm_{31}^2 (IO)	$-2.512 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$	1.3

Вероятность осцилляций

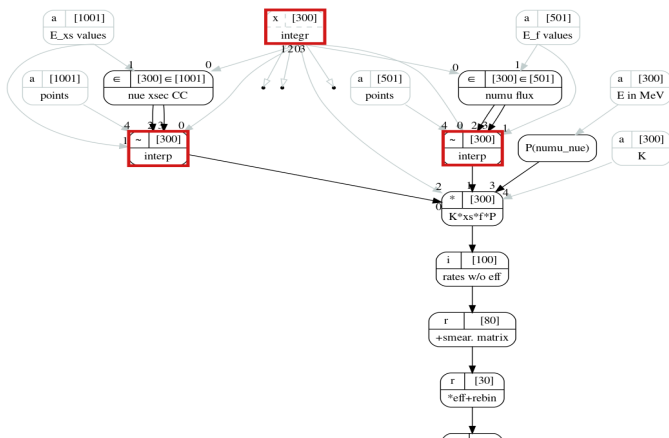


Нормальная иерархия



Обратная иерархия

Фрагмент графа модели DUNE в GNA



$$N_{CC} = K \int x_s(E) \cdot f(E) \cdot P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)(E) \cdot SM \cdot eff(E) \cdot dE$$