

Влияние корреляций систематических неопределенностей на чувствительность совместного анализа экспериментов NOvA и T2K



Анна Степанова,
Анастасия Калиткина,
Людмила Колупаева

as592454@gmail.com

ЛЯП, ОИЯИ, Дубна



Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 70-летию со дня рождения академика РАН Валерия Анатольевича Рубакова

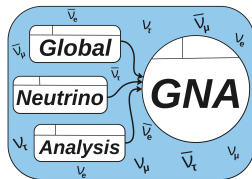
19.02.2025 г.

Global Neutrino Analysis (GNA)

GNA – ПО для выполнения анализа данных нейтринных событий

Особенности:

- функции-преобразования на C++, интерфейс на Python, а также методы и классы ROOT CERN;
- блоки, составляющие граф;
- функции для статистического анализа данных: минимизации, сканирования, фитирования и т.д.

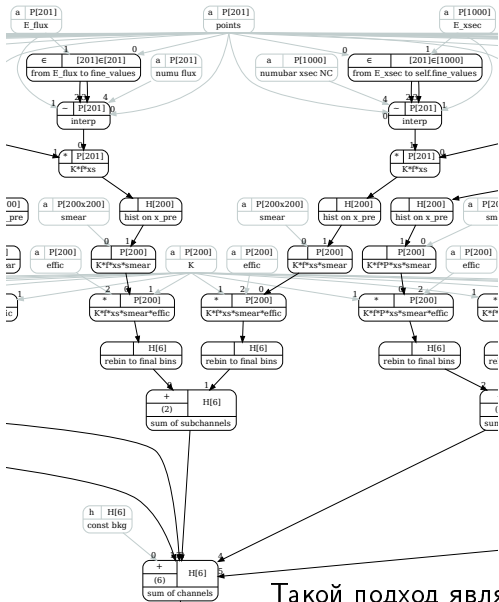


GNA разработано в Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Джелепова (ОИЯИ)

- страница GNA: <http://gna.pages.jinr.ru/gna/>
- Git репозиторий: <https://git.jinr.ru/gna/gna>



Фрагмент графа модели эксперимента в GNA



- Создание графа позволяет контролировать корректность задания модели.
- Возможность добавлять или убирать блоки во время аппроксимации → свойство «extensibility».
- Выполняется пересчёт не всей модели, а только тех частей, которые изменяются → свойство «lazy evaluation».

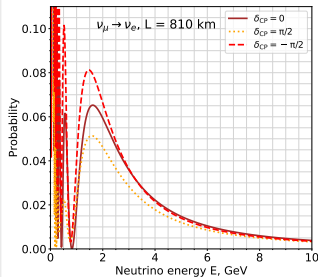
Такой подход является быстрым и эффективным.

Осцилляции нейтрино в веществе

- Смешивания нейтрино: $\nu_\alpha = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha,i}^* \cdot \nu_i$, $\alpha = e, \mu, \tau$,
 ν_α – флейворные с.с., ν_i – массовые с.с.
- Матрица Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты U – лептонная матрица смешивания: $U \sim \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{CP}$.

Вероятность осцилляций зависит от:

- параметров матрицы U ;
- расщепления квадратов масс: Δm_{21}^2 , Δm_{32}^2 ;
- иерархии масс нейтрино: знак Δm_{32}^2 ;
- плотности вещества ρ ;
- отношения базы осцилляций к энергии нейтрино $\frac{L}{E}$.



Знак Δm_{32}^2 , октант θ_{23} и δ_{CP} – неизвестные параметры осцилляций

2 ускорительных нейтринных эксперимента с длинной базой (LBL):

NOvA (NuMI Off-axis ν_e Appearance) и **T2K (Tokai to Kamioka)**

- **14 мод в FD NOvA:** 6 мод появления $\nu_e/\bar{\nu}_e$ (high, low PID, per), 8 мод исчезновения $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ (по квартилям: с различным вкладом адронной энергии в общую реконстр.-ую энергию нейтрино)
- **5 мод в FD T2K:** 2 моды появления $\nu_e/\bar{\nu}_e + 1 \nu_e$ CC1 π , 2 моды исчезновения $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ в 2-х режимах (forward horn current - FHC, reverse horn current - RHC)



```
MODES:  
fbc_app_nue:  
  Signal: nue  
  FbcRhc: fbc  
  AppDis: app  
CH:  
  bkg_beam:  
    - channel_type: beam  
      initial_flavor: nue  
      final_flavor: nue  
      xsec_type: CC
```

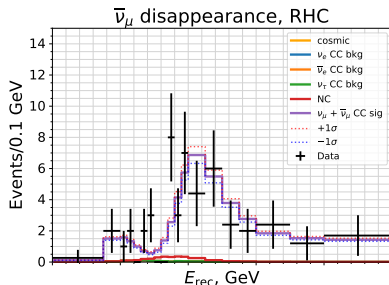
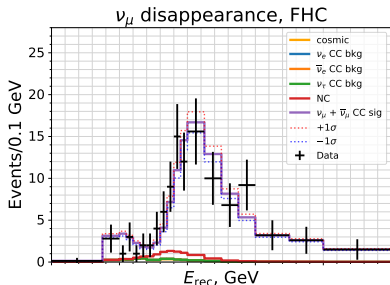
Конфигурационный файл включает:

- пути для файлов потоков, сечений взаимодействия, эффективности;
- разницу между E_{true} and E_{recon} или Гауссово размытие;
- моды с каналами;
- энергетический диапазон;
- параметры осцилляций;
- параметры эксперимента.

Конфигурационный файл является **входом** для универсальной оболочки. **Выход** – энергетические спектры дальнего детектора (FD) эксперимента.

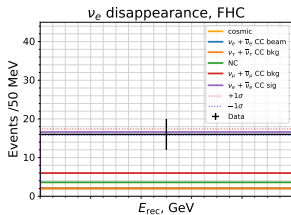
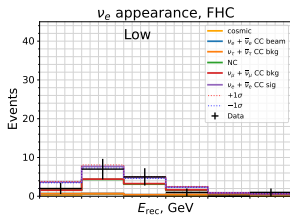
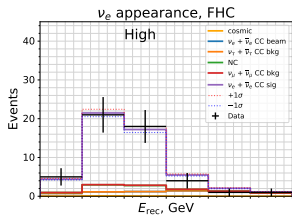
Число событий N в бине i для канала j моды m :

$$N_j^m = \sum_{i=0}^D N_{j,m}^i, \quad N_j^i = K \cdot f(E_{\text{true}})_j \cdot P(E_{\text{true}})(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)_j \cdot \sigma(E_{\text{true}})_j \cdot \sum_{k=0}^n R(E_{\text{true}}, E_{\text{rec.}})_{jk} \cdot \varepsilon(E_{\text{rec.}})_k \cdot \Delta E_{\text{rec.}, j}$$

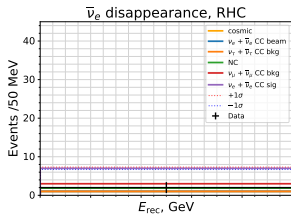
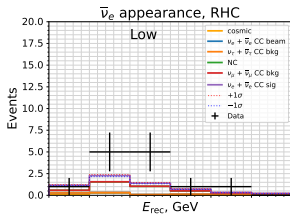
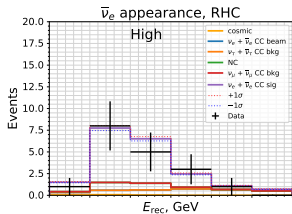


$\pm 1\sigma$ систем. неопределенности sig/bkg: 6.7/23% (ν_μ dis.), 6.9/33% ($\bar{\nu}_\mu$ dis.)

Особенности: постоянный фон от космических мюонов (cosmic),
2 моды появления $\nu_e/\bar{\nu}_e$ с 1-м периферийным бином

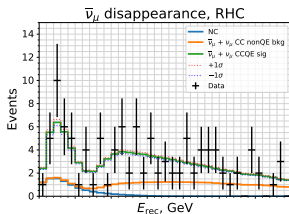
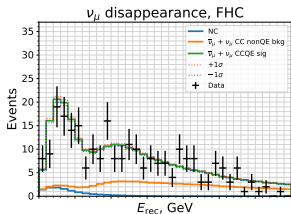


$\pm 1\sigma$ sig/bkg: 4.2/6% (ν_e app.)

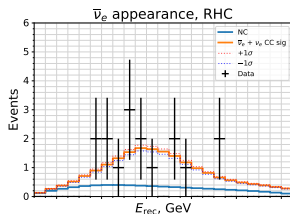
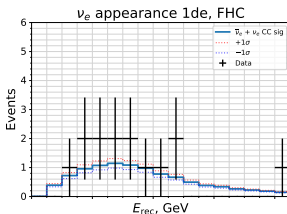
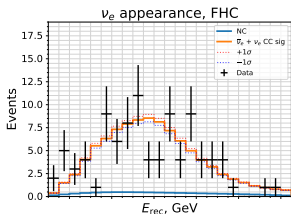


$\pm 1\sigma$ sig/bkg: 3.1/6.4% ($\bar{\nu}_e$ app.)

Энергетические спектры T2K FD в GNA



$\pm 1\sigma$ систем. неопределенности: 3% (ν_μ dis.), 4% ($\bar{\nu}_\mu$ dis.)



$\pm 1\sigma$ систем. неопределенности: 4.7% (ν_e app.), 14.3% (ν_e 1de app.) 5.9% ($\bar{\nu}_e$ app.):

Минимизация и фитирование: карты χ^2

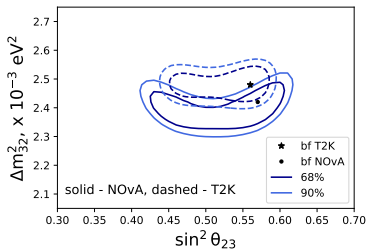
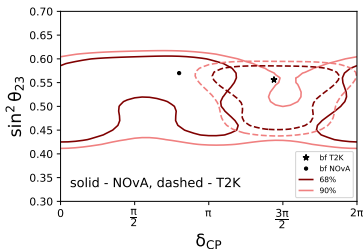
- В основе: стандартная логарифмическая функция правдоподобия распределения Пуассона с штрафными (pull) членами, рассчитанная на основе моделируемых чисел событий и данных:

$$\chi^2 = -2 \sum_{m=0}^M \sum_{j=0}^B \left(N_{j,m}^{\text{data}} \ln N_{j,m}^{\text{mod.}} - N_{j,m}^{\text{mod.}} - N_{j,m}^{\text{data}} \ln N_{j,m}^{\text{data}} + N_{j,m}^{\text{data}} \right) + \frac{(x - \mu)^2}{\sigma^2}$$

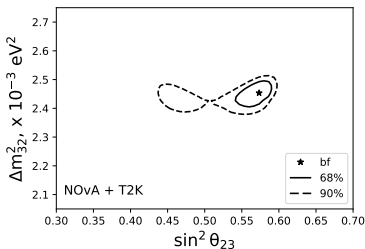
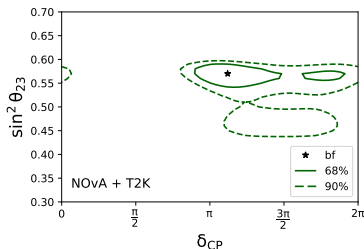
- Используется, чтобы оценить индивидуальные и совместные чувствительности экспериментов к измерению параметров осцилляций.
- Выполняется сканирование точек двумерного пространства неизвестных параметров, минимизация и строятся 1σ , 2σ , 3σ (или 68%, 90%) контуры

Двумерные контуры для NOvA и T2K в GNA

Индивидуальные чувствительности



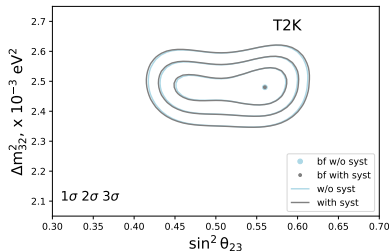
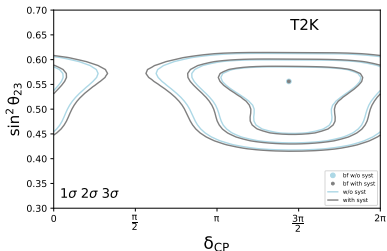
Совместные чувствительности



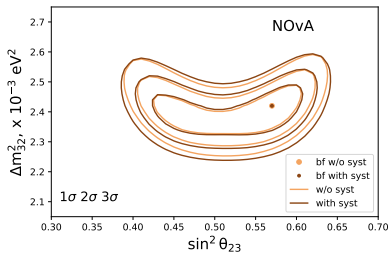
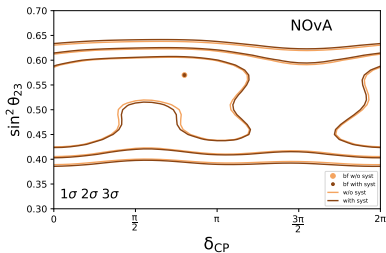
6 мод для NOvA, 5 мод для T2K. Данные Азимова
 Δm_{21}^2 , $\sin^2 \theta_{12}$ - фиксированные

Только статистические неопределенности

T2K - 10 систем. членов: см. слайд 8

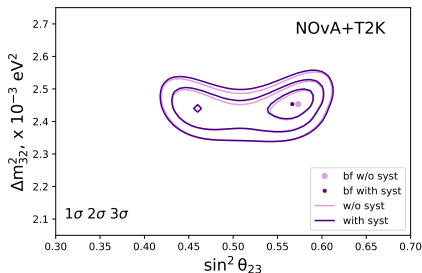
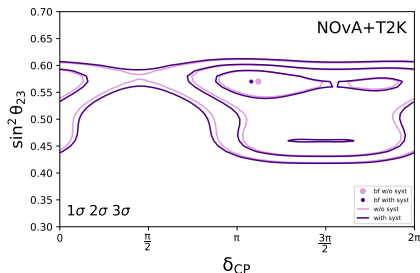


NOvA - 8 систем. членов: см. слайд 6-7



6 мод для NOvA, 5 мод для T2K. Данные Азимова.
 Δm^2_{21} , $\sin^2 \theta_{12}$ - фиксированные

NOvA + T2K - 18 систем. членов



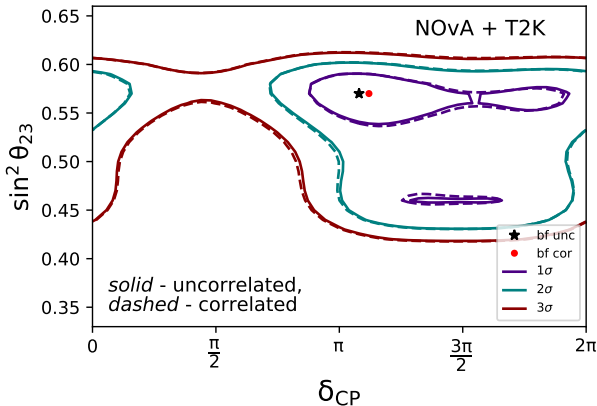
- 6 мод для NOvA, 5 мод для T2K. Данные Азимова. Δm_{21}^2 , $\sin^2 \theta_{12}$ - фиксированные.
- источники систематических неопределенностей:
 - модель потоков
 - детекторная модель
 - модель сечений взаимодействия нейтрино с веществом детекторов

Корреляции систематических неопределенностей

Модель сечений взаимодействия

NOvA + T2K - 18 систем. членов, 16 - попарно коррелированных, 6 мод для NOvA, 5 мод для T2K. Данные Азимова.

Δm_{21}^2 , $\sin^2 \theta_{12}$ - фиксированные.



Матрица корреляций:

- частично-коррелированные систем. члены:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.9 \\ 0.9 & 1 \end{pmatrix}$$

- для одинаковых мод NOvA и T2K

Двухмерные контуры с данными Азимова в GNA

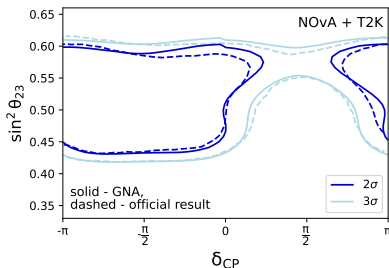
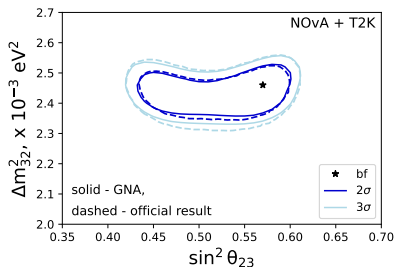
Параметры осцилляций:

δ_{CP} , $\sin^2 \theta_{23}$, Δm_{32}^2 - свободные;

прямая иерархия, $\rho = 2.84 \pm 0.05$

$\Delta m_{21}^2 = 7.53 \pm 0.18 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$, $\sin^2 \theta_{12} = 0.307 \pm 0.013$

$\sin^2 \theta_{13} = 0.0218 \pm 0.0007$ (PDG 2020)



Учет всех мод и статистических, систематических (в предположении некоррелированных) неопределенностей

В ускорительной оболочке в ПО GNA можно:

- моделировать спектры событий дальнего детектора ускорительных экспериментов;
- оценивать индивидуальные и совместные чувствительности к значениям параметров осцилляций с данными Азимова и с реальными данными;
- задавать систематические неопределенности и исследовать их влияние на результат.



Является важным этапом на пути к созданию глобального фиттера данных осцилляционных экспериментов

Будущий глобальный фиттер

- предыдущие и действующие осцилляционные эксперименты:

Тип	Эксперименты	Параметры	Энергия
Солнечные + KamLAND	Homestake, GALLEX/GNO, SAGE, Borexino, SNO, SuperK + KamLAND	$\Delta m_{21}^2, \theta_{12}$	0.1–20 МэВ
SBL реакт.-ые	RENO, Double Chooz, Daya Bay	$\Delta m_{31}^2 (\Delta m_{ee}^2), \theta_{13}$	1–8 МэВ
Ускорит.-ые	MINOS, K2K, T2K, NOvA	$\Delta m_{32}^2, \theta_{23}, \delta_{CP}$	1–10 ГэВ
Атмосфер.	IceCube DeepCore, SuperK	$\Delta m_{31}^2, \theta_{23}$	0.1–100 ГэВ

- будущие осцилляционные эксперименты: JUNO, DUNE, T2HK, KM3NeT ORCA, ESS ν SB и другие.

Цель – объединить эксперименты и оценить их совместную чувствительность к неизвестным параметрам осцилляций в ПО GNA.

Спасибо за внимание!



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда №24-72-00048.