

АППРОКСИМАЦИЯ ДАННЫХ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ GNA

A. B. Степанова^{a, 1}, Л. Д. Колупаева^a

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Физика нейтрино активно развивается в течение последних нескольких десятилетий, однако до сих пор существует ряд открытых вопросов. Одной из актуальных задач является измерение параметров нейтриноных осцилляций, таких как фаза комбинированной четности δ_{CP} , иерархия масс нейтрино и октант угла смешивания θ_{23} . Одним из способов достичь высокого уровня значимости для этих величин стало объединение данных, полученных в различных экспериментах. Работающие в настоящее время ускорительные нейтриноные эксперименты, NOvA и T2K, регистрируют взаимодействия нейтрино в модах появления электронных (анти-)нейтрино и в модах исчезновения мюонных (анти-)нейтрино, и их данные на сегодняшний день являются основным источником информации для оценки неизвестных параметров осцилляций. В программном обеспечении GNA создан метод аппроксимации данных ускорительных нейтриноных экспериментов и построены двумерные контуры индивидуальных и совместных чувствительностей к Δm_{32}^2 , δ_{CP} и $\sin^2 \theta_{23}$ для экспериментов NOvA и T2K на основе моделирования методом Монте-Карло и данных Азимова.

Neutrino physics has been actively developing for the last few decades, but there are still some questions to answer. One of the actual tasks is to measure neutrino oscillation parameters such as the charge-parity phase δ_{CP} , the neutrino mass ordering and the octant of mixing angle θ_{23} . One of the ways to reach a high significant level for these values is to combine data taken from different experiments. Currently working neutrino accelerator experiments, NOvA and T2K, have been detecting neutrino interactions in electron (anti-)neutrino appearance and muon (anti-)neutrino disappearance modes and nowadays these data are the main set to estimate unknown neutrino oscillation parameters. The data fitter of accelerator neutrino experiments is created within the GNA software, and two-dimensional contours of individual and joint sensitivities to Δm_{32}^2 , δ_{CP} and $\sin^2 \theta_{23}$ for NOvA and T2K experiments are plotted based on Monte Carlo simulation and Asimov data.

PACS: 14.60.Lm; 14.60.Pq

ВВЕДЕНИЕ

GNA (Global Neutrino Analysis) [1] — это программное обеспечение (ПО) для выполнения анализа данных, полученных в экспериментах разного типа: ускорительных, реакторных, атмосферных и солнечных. ПО GNA было разработано в Лаборатории

¹E-mail: as592454@gmail.ru

ядерных проблем ОИЯИ и включает функции-преобразования, написанные на языках программирования C++ и Python, а также использует методы и классы пакета ROOT CERN [2]. Для проведения статистического анализа данных в ПО GNA реализованы необходимые функции, такие как функции минимизации, сканирования и т. д. [3]. Во время задания модели нейтринного эксперимента в ПО GNA создается граф, состоящий из блоков и имеющий ряд особенностей. Во-первых, создание графа позволяет контролировать корректность задания модели, поскольку каждому этапу вычислений соответствует наглядное представление. Во-вторых, возможно добавлять или убирать блоки во время аппроксимации (свойство «extensibility»). Также в каждой точке выполняется пересчет не всей модели, а только тех частей, которые изменяются (свойство «lazy evaluation»). Такой подход делает процесс вычислений более быстрым и эффективным.

МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ В ПО GNA

Для выполнения осцилляционного анализа данных на первом этапе рассчитываются энергетические спектры нейтрино. Для этого в ПО GNA задается конфигурационный файл эксперимента в формате YAML, где указываются пути для файлов, содержащих значения потоков нейтрино и антинейтрино различных флейворов, величины возможных типов сечений взаимодействия нейтрино с веществом детектора и эффективности регистрации детектора, а также характеристики для размытия энергии в бинах. В данном файле описывается и деление на моды с сигнальными и фоновыми каналами, а также задаются параметры эксперимента (доверительный объем детектора, длина базы осцилляций, т. е. расстояние между ближним и дальним детекторами, диапазон энергий и т. д.) и осцилляционные параметры, которые во время аппроксимации могут быть фиксированными, ограниченными или свободными. На втором этапе полученные числа событий вместе с внешним набором данных появляются в стандартную логарифмическую функцию Пуассона, реализованную в ПО GNA, для расчета значений χ^2 в различных точках пространства осцилляционных параметров. Учет ограниченных параметров добавляется в виде штрафных членов. Таким образом, с помощью аппроксимации данных в ПО GNA можно рассчитать чувствительности экспериментов к измерению неизвестных параметров осцилляций. Такими параметрами в парадигме трех флейворов нейтрино Стандартной модели физики элементарных частиц являются знак расщепления масс нейтрино Δm_{32}^2 («+» соответствует нормальней иерархии масс нейтрино, а «-» — обратной), фаза комбинированной четности δ_{CP} и октант угла смешивания θ_{23} . Одновременно три эти параметра измеряются в ускорительных нейтринных экспериментах с длинной базой. На сегодняшний день набирают данные два таких эксперимента: NOvA (NuMI Off-axis ν_e Appearance), расположенный в США [4], и T2K (Tokai to Kamioka) в Японии [5].

В ПО GNA для эксперимента NOvA были рассчитаны энергетические спектры нейтрино в 6 модах (рис. 1): 4 моды появления $\nu_e/\bar{\nu}_e$ в соответствии с большими и малыми значениями классификатора нейтринных взаимодействий (High/Low PID) и 2 моды исчезновения $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$. Для эксперимента T2K были рассчитаны числа событий для 5 мод (рис. 2): 2 моды появления $\nu_e/\bar{\nu}_e$, 1 мода появления ν_e с сигнатурой одного запаздывающего электрона в детекторе от процесса с рождением одного пиона и 2 моды исчезновения $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$.

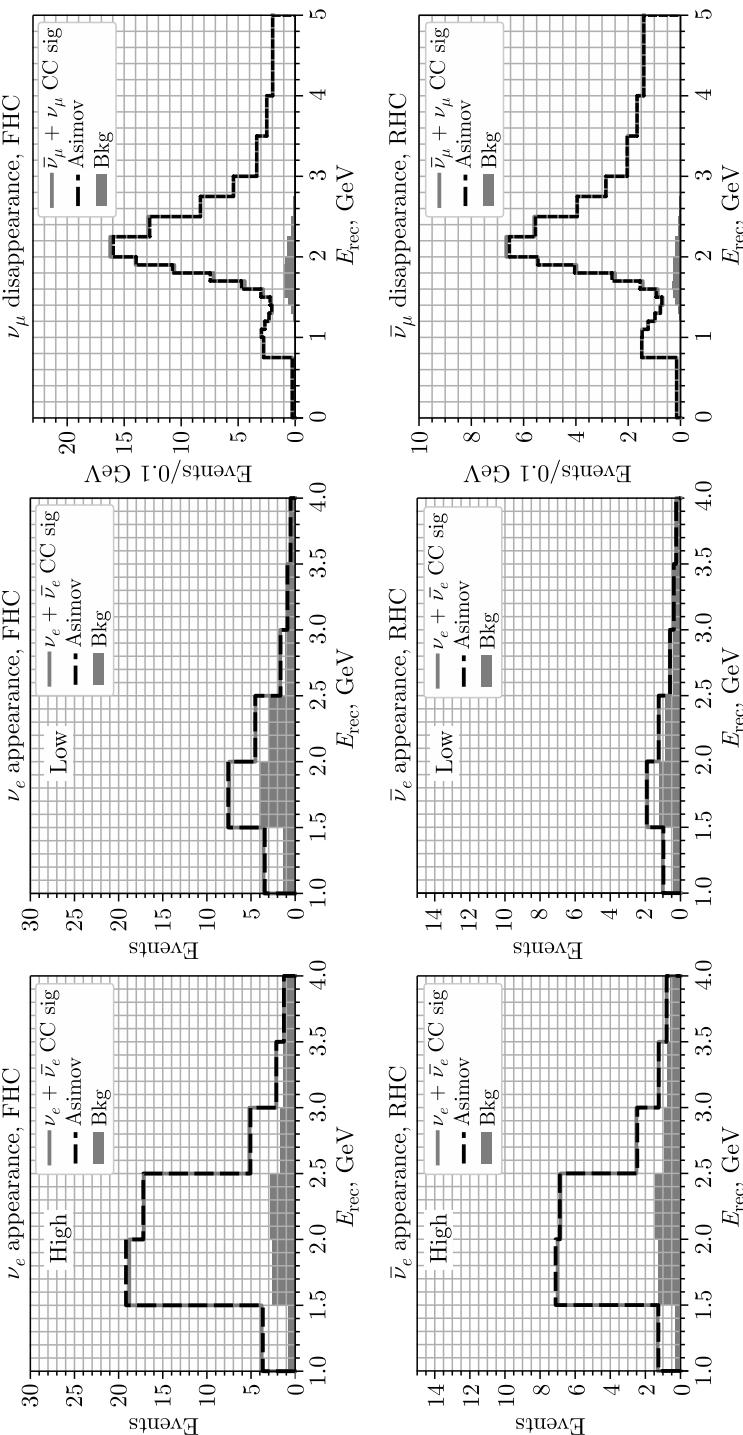


Рис. 1. Энергетические спектры для эксперимента NOvA, полученные в ПО GNA с набором данных Азимова на 2020 г.

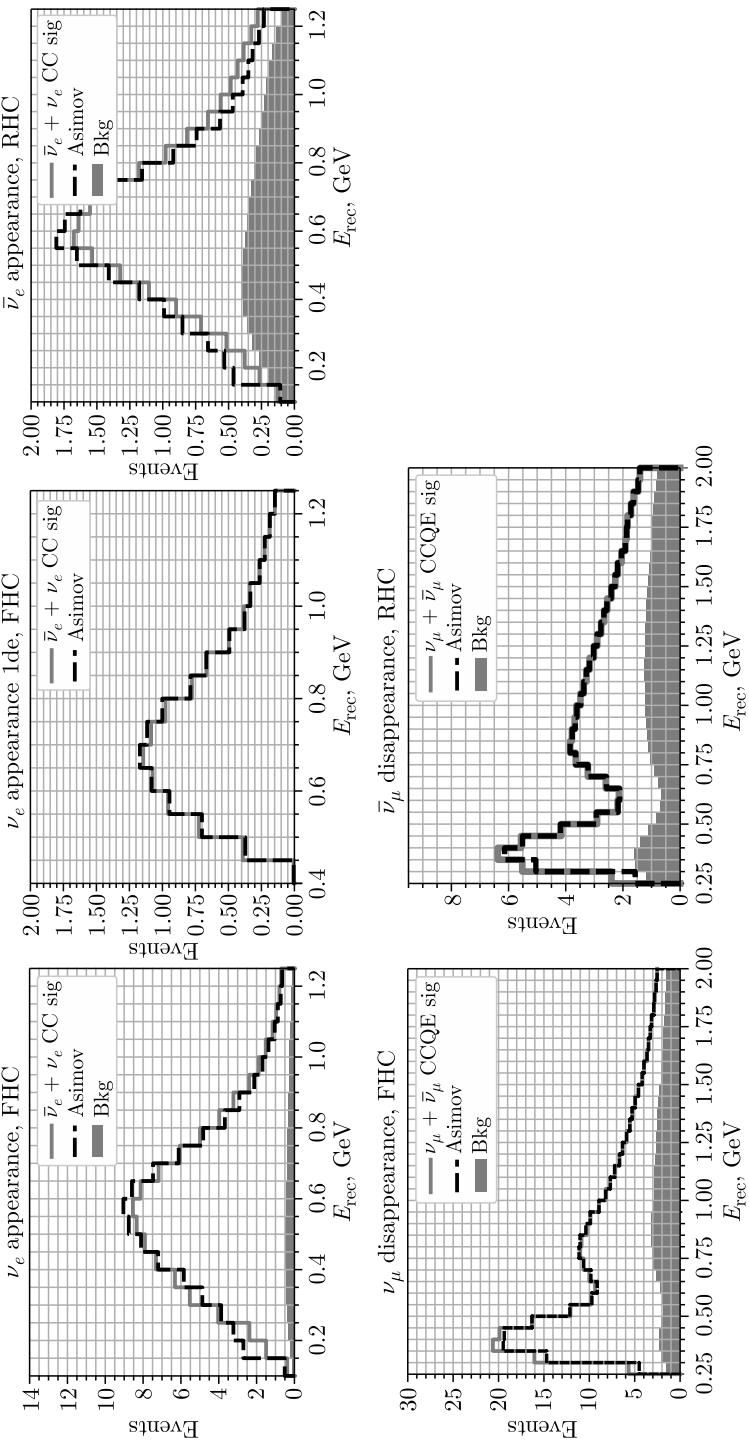


Рис. 2. Энергетические спектры для эксперимента T2K, полученные в ПО GNA с набором данных Азимова на 2020 г.

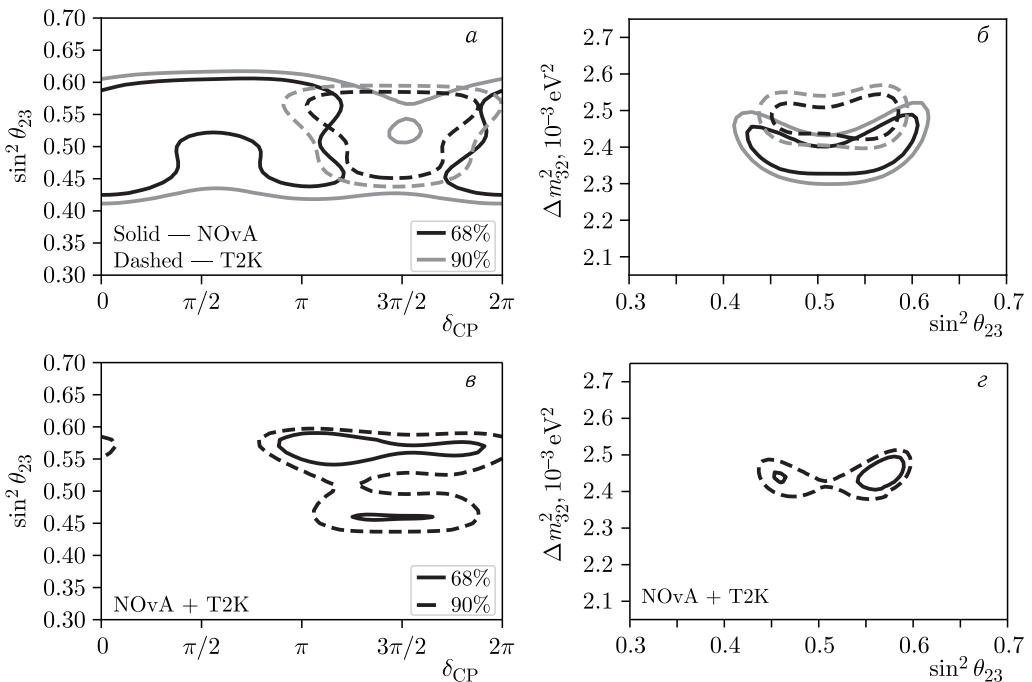


Рис. 3. Двумерные контуры с уровнями значимости 68, 90 % в предположении нормальной иерархии масс нейтрино для экспериментов NOvA и T2K: индивидуальные (*а*, *б*) (сплошная линия — для NOvA, штриховая — для T2K) и совместные (*в*, *г*), полученные в ПО GNA с набором данных Азимова на 2020 г.

На рис. 3 представлены двумерные контуры на плоскости неизвестных параметров осцилляций, полученные в ПО GNA, для NOvA и T2K. В качестве данных использовались данные Азимова с параметрами осцилляций, которые соответствуют наилучшим значениям аппроксимации экспериментов в 2020 г. Индивидуальные модели экспериментов предпочитают различные наилучшие значения аппроксимации параметров осцилляций. Например, NOvA исключает значение $\delta_{CP} = 3\pi/2$, в то время как наилучшее значение δ_{CP} для T2K находится в этой области (см. рис. 3, *а*). Тем не менее статистическая значимость этого расхождения небольшая. Выполненная совместная аппроксимация NOvA + T2K (см. рис. 3, *в*, *г*) с данными Азимова является важной вехой на пути к первому совместному анализу данных этих экспериментов в ПО GNA.

БУДУЩАЯ ГЛОБАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ В ПО GNA

Реализованный в ПО GNA метод аппроксимации данных ускорительных нейтриноных экспериментов позволит проводить совместный осцилляционный анализ данных экспериментов различного типа. В таблице представлены действующие нейтриноные осцилляционные эксперименты и эксперименты, которые уже завершили свою работу.

Нейтринные осцилляционные эксперименты

Тип	Эксперимент	Параметр	Энергия
Солнеч.+KamLAND	Homestake, GALLEX/GNO, SAGE, Borexino, SNO, SuperK + KamLAND	$\Delta m_{21}^2, \theta_{12}$	0,1–20 МэВ
Реакторные	RENO, Double Chooz, Daya Bay	$\Delta m_{31}^2 (\Delta m_{ee}^2), \theta_{13}$	1–8 МэВ
Ускорительные	MINOS, K2K, T2K, NOvA	$\Delta m_{32}^2, \theta_{23}, \delta_{CP}$	0,1–10 ГэВ
Атмосферные	IceCube DeepCore, SuperK	$\Delta m_{31}^2, \theta_{23}$	0,1–100 ГэВ

Также существует целый ряд будущих нейтринных осцилляционных экспериментов, а именно JUNO, DUNE, T2HK, KM3NeT ORCA, ESS ν SB и т. д. В зависимости от энергетического диапазона и методов регистрации событий эти эксперименты нацелены на измерение различных параметров осцилляций. Совместный анализ данных нейтринных экспериментов является конечной целью данной работы и способом увеличить чувствительность к параметрам осцилляций по сравнению с индивидуальными экспериментами, а также средством избежать вырождений параметров.

Благодарности. Авторы благодарны А. И. Калиткиной и М. О. Гончару за техническую помощь при разработке метода аппроксимации данных в ПО GNA.

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

Конфликт интересов. Авторы утверждают, что они не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Neutrino Analysis, GNA. gna.pages.jinr.ru/gna.
2. Brun R., Rademakers F. ROOT: An Object Oriented Data Analysis Framework // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 389. P. 81–86.
3. Git репозиторий для ПО GNA. git.jinr.ru/gna/gna.
4. Acero M. A. et al. (NOvA Collab.). Improved Measurement of Neutrino Oscillation Parameters by the NOvA Experiment // Phys. Rev. D. 2022. V. 106, No. 3. P. 032004.
5. Abe K. et al. (T2K Collab.). Measurements of Neutrino Oscillation Parameters from the T2K Experiment Using $3.6 \cdot 10^{21}$ Protons on Target // Eur. Phys. J. C. 2023. V. 83. P. 782.

Получено 7 апреля 2025 г.