

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЮОННЫХ НЕЙТРИНО С РАСШИРЕННЫМ ФАЗОВЫМ ПРОСТРАНСТВОМ В БЛИЖНЕМ ДЕТЕКТОРЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ T2K

Д. В. Федорова^{1,2,*}, *А. О. Измайлов*²

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

Использование данных ближнего детектора ND280 играет ключевую роль в снижении систематических ошибок и увеличении точности анализа осцилляций нейтрино в ускорительном эксперименте с длинной базой T2K. Существенным ограничением является относительно малое фазовое пространство, доступное для проведения измерений в ND280. Рассматривается использование новых методов восстановления и отбора продуктов нейтринных реакций, что позволяет значительно расширить кинематический диапазон анализа.

Data from the near detector ND280 of the T2K experiment play a crucial role in reducing systematic uncertainties and enhancing the accuracy of the neutrino oscillation analysis. A notable limitation is a relatively small phase space available for ND280 measurements. The paper describes a set of new methods developed for the analysis of muon neutrino events in ND280. Thanks to these new methods of signal events selection, it is possible to significantly expand the kinematic range of the analysis.

PACS: 14.60.Pq; 07.77.—n

ВВЕДЕНИЕ

T2K (Tokai-to-Kamioka) [1] — ускорительный нейтринный эксперимент с длинной базой, который проводится в Японии. Основными задачами проекта являются прецизионное измерение параметров нейтринных осцилляций и поиск возможного CP-нарушения в нейтринном (лептонном) секторе.

Общая схема эксперимента приведена на рис. 1. В T2K используется нейтринный пучок высокой интенсивности и чистоты, созданный на ускорительном протонном комплексе J-PARC. Смена полярности тока в импульсных магнитных «горнах» позволяет работать в двух режимах (модах) пучка: с преобладанием мюонного нейтрино или, соответственно,

* E-mail: fedorova@inr.ru

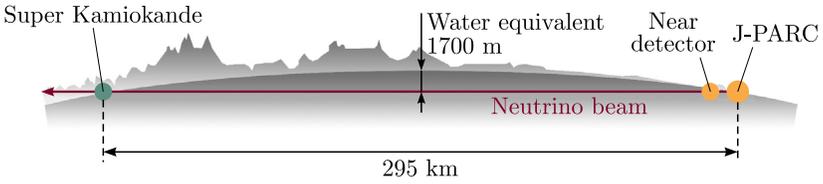


Рис. 1. Общая схема нейтринного эксперимента T2K

антинейтрино. В T2K применяется концепция «внеосевого» (off-axis) пучка, использование которой дает возможность работать с узким энергетическим спектром в области осцилляционного максимума (пик энергии — около 600 МэВ), а также дополнительно подавлять фоновые процессы. Основные элементы экспериментальной установки T2K — это ближний детектор ND280 [1] и дальний водный черенковский детектор Super-Kamiokande (Супер-Камиоканде, Супер-К) [2].

БЛИЖНИЙ НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР ND280 В ЭКСПЕРИМЕНТЕ T2K

Ближний «внеосевой» детектор ND280 (рис. 2) имеет комплексную структуру. Он состоит из модулей, расположенных в магните UA1 (магнитное поле 0,2 Тл). Настоящая работа основывается на использовании данных ND280, набранных в 2010–2022 гг. В этот период детектор работал в следующей конфигурации:

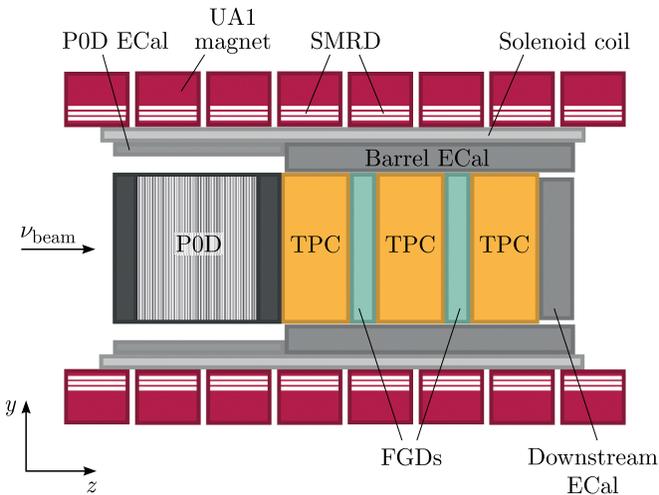


Рис. 2. Ближний детектор ND280. Конфигурация 2010–2022 гг.

— трековая часть включала в себя три времяпроекционные камеры (TPC), разделенные двумя сцинтилляционными детекторами (FGD1 и FGD2), последние выступали в качестве нейтринной мишени;

— перед первой TPC находился детектор нейтральных пионов P0D;

— «трекер» и P0D были окружены элементами электромагнитного калориметра ECal;

— ярмо магнита было оборудовано сцинтилляционными пластинами для создания детектора мюонного пробега SMRD.

Основными задачами ND280 являются: измерение параметров взаимодействия (анти)нейтрино с веществом в различных каналах реакций, изучение состава и спектра нейтринного потока до процесса осцилляции. Эти исследования позволяют получить ограничения на параметры моделей потока и взаимодействий нейтрино для использования в конечном анализе по поиску и измерению осцилляций (ОА). Включение в анализ данных ближнего детектора существенно снижает соответствующие систематические ошибки. Например, в нейтринной моде пучка для событий в дальнем детекторе с одним мюонным кольцом полная ошибка уменьшается с 16,7 до 3,4 %, с одним электронным — с 17,3 до 5,2 %.

ОБНОВЛЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В T2K

В 2024 г. коллаборация запланировала представить новые данные по измерению параметров нейтринных осцилляций. Результат будет получен с учетом следующих условий:

- обновление модели взаимодействия нейтрино с веществом;
- улучшение алгоритмов восстановления треков частиц в ближнем детекторе;
- новая параметризация детекторных систематических ошибок в ND280 и новая матрица детекторной систематики в Супер-К;
- 4 π -образцы для отбора событий в ближнем детекторе в нейтринной моде пучка;
- включение в анализ данных дальнего детектора, набранных в 2021 г.: первые данные с гадолинием (0,01 %), увеличение статистики в нейтринной моде на 9 %;
- введение нового сигнального образца для событий $\nu_e \text{CC}1\pi$ в дальнем детекторе — приблизительно +60 % статистики.

4 π -АНАЛИЗ В ДЕТЕКТОРЕ ND280

Основным сигналом эксперимента являются взаимодействия между нейтринным пучком и материалом детектора, проходящие через заряженный ток (Charged-Current, CC), в результате которых рождаются заряженные лептоны соответствующих типов. Дальний детектор, благодаря своей симметричной геометрии, позволяет восстанавливать треки частиц ориентированные вдоль любого направления. В то же время ND280 на-

строен на отбор частиц, преимущественно вылетающих по направлению пучка. Использование в анализе ближнего детектора мюонных треков, выходящих под большими углами к оси пучка (4 π -образцы), позволит эффективнее сравнить данные двух детекторов и расширит возможности получения ограничений на параметры модели потока и нейтринных взаимодействий с ближним детектором. Весной 2024 г. ближний детектор был успешно запущен в обновленной конфигурации — ND280 Upgrade [3] с детектором 3D SuperFGD, двумя горизонтальными камерами HA-TPC и временными модулями TOF. Такая структура позволяет получать высокую эффективность отбора событий по всему фазовому пространству. Для данных ND280 2010–2022 гг., в свою очередь, разработаны и применены дополнительные методы отбора, рассмотренные далее.

НОВЫЕ ОБРАЗЦЫ СОБЫТИЙ В БЛИЖНЕМ ДЕТЕКТОРЕ ND280

Новые образцы сигнальных событий в ND280 подготовлены для нейтринной моды. Для отбора мюонного кандидата включаются события с треками трех топологий из мишени FGD 1/2: вперед по направлению пучка (Forward — FWD), такие треки использовались в анализе ранее [4], и новые — в обратном направлении (Backward — BWD) и под большим углом к оси пучка (High-Angle — HA). Для определения направления частицы (в/из FGD) используется разность между временными отметками в модулях ND280. Импульс частицы восстанавливается с использованием кривизны трека в TPC (малый (абсолютный) угол, трек близок к оси пучка — наличие трека в камерах) или информации о длине трека в FGD-ECal-(SMRD) (большой угол к оси пучка, нет трека в камерах). Идентификация типа частицы, т. е. мюона, также происходит в зависимости от топологии: с использованием либо TPC (FWD, BWD), либо FGD, ECal, SMRD (HA). Далее идентифицируются другие восстановленные продукты реакции (протоны, пионы, фотоны). Они

Детекторная и полная систематические ошибки для событий с вершиной в FGD1

Группа	Детекторная ошибка, %	Полная ошибка, %
CC0 π 0 p FWD	1,35	16,0
CC0 π 0 p BWD	4,13	15,5
CC0 π 0 p HA	5,15	14,5
CC0 π N p FWD	4,55	14,8
CC0 π N p BWD	4,62	21,8
CC0 π N p HA	7,33	17,8
CC1 π FWD	2,58	12,0
CC1 π FWD-HA	5,72	14,5
CC-other FWD	4,79	11,4
CC-photon FWD	2,68	10,5

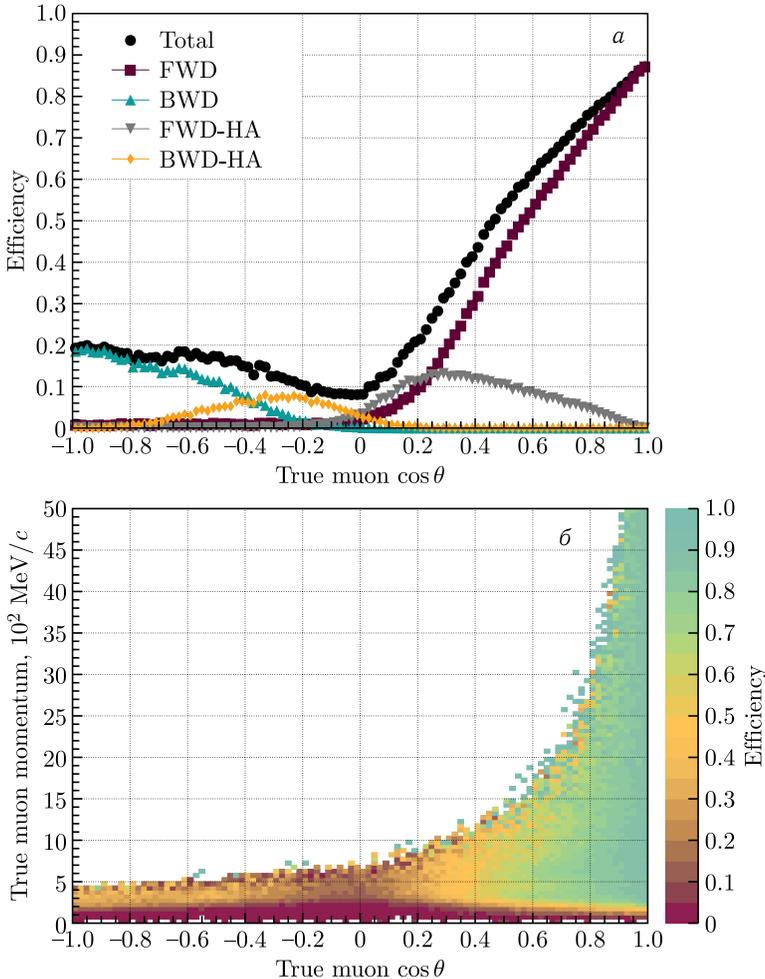


Рис. 3. Эффективность отбора событий ν_μ CC в FGD1 в зависимости от угла вылета мюона (а) и импульса и угла вылета мюона (б)

определяют, в какой образец, соответствующий определенным каналам CC взаимодействий нейтрино, попадет конкретное событие. Для каждого детектора FGD 1/2 сформировано 10 групп (образцов), представленных в таблице. В $CC0\pi0p$ попадают события, в которых восстановлен только мюонный трек; $CC0\pi Np$ — события без пионной активности, но хотя бы с одним протонным треком; $CC1\pi$ — один трек положительного пиона; $CC\text{-photon}$ — идентифицированы фотон(ы) в «трекере» или ECal; $CC\text{-other}$ — трек отрицательного пиона или два и более трека положительных пионов.

Эффективность отбора сигнальных событий в зависимости от кинематики CS -реакции показана на рис. 3. Введение двух дополнительных топологий мюонных треков позволяет расширить область фазового пространства, доступную для анализа: случай FWD примерно соответствует эффективности до обновления анализа. Чистота отобранных образцов находится в пределах от 75 (FGD2 BWD — большая примесь фона снаружи детектора, связанная с точностью определения направления) до 92 % (FGD1 FWD).

Для всех новых образцов проведено детальное исследование вклада систематических ошибок, связанных с моделированием и восстановлением продуктов нейтринных реакций в детекторе. Эффект систематики оценивался численным методом: параметры, соответствующие различным источникам ошибок, многократно варьировались, итоговая ошибка оценивалась как стандартное отклонение полученных распределений. Учтен вклад 29 источников. Полная систематическая ошибка (см. таблицу) в ND280 для анализа данных включает также неопределенности моделей потока и взаимодействий нейтрино. Отметим дополнительно, что конечной целью последующего «фитирования» данных ND280 является как раз снижение последних.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом работы является разработка методов отбора новых образцов сигнальных событий мюонных нейтрино в ближнем детекторе ND280 и их подготовка к использованию в обновлении анализа данных ускорительного эксперимента T2K по измерению параметров осцилляций нейтрино. Новый результат T2K был запланирован на 2024 г. Данные ближнего детектора важны для настройки параметров модели нейтринных реакций и потока нейтрино — уменьшения систематических ошибок и увеличения точности эксперимента. Новые критерии отбора событий мюонных нейтрино в ближнем детекторе с различными топологиями трека конечного мюона позволяют существенно расширить исследуемое фазовое пространство продуктов реакций, что дополнительно увеличивает общее число событий в анализе ($\sim 15\%$), включает в анализ взаимодействия с большим переданным импульсом, а также уменьшает дисбаланс между эффективностью регистрации частиц, выходящих под различными углами относительно оси пучка, в ближнем и дальнем детекторах.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00358).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abe K. et al. (T2K Collab.). The T2K Experiment // Nucl. Instr. Meth. 2011. V. 659. P. 106–135.

2. *Fukuda S. et al. (Super-Kamiokande Collab.)*. The Super-Kamiokande Detector // Nucl. Instr. Meth. 2003. V. 501.
3. *Abe K. et al. (T2K Collab.)*. T2K ND280 Upgrade. Technical Design Rep. arXiv:1901.03750. 2019.
4. *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, No. 782.