

## ИЗУЧЕНИЕ НЕЙТРОНОВ, РОЖДАЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЮОННЫХ АНТИНЕЙТРИНО В БЛИЖНЕМ НЕЙТРИННОМ ДЕТЕКТОРЕ ND280 ЭКСПЕРИМЕНТА T2K

А. А. Шайкина<sup>1,2</sup>

*Проведено исследование нейтронов, рождающихся в процессе рассеяния мюонных антинейтрино через заряженные токи в ближнем нейтринном детекторе ND280 эксперимента T2K. На основе Монте-Карло моделирования пучка ускорительных антинейтрино с энергией около 0.6 ГэВ восстановлена кинематика квазиупругого взаимодействия. Получены энергетические и угловые распределения нейтронов, рассчитана эффективность их регистрации с помощью метода, учитывающего время пролёта частиц.*

**Ключевые слова:** антинейтрино, нейтрон, заряженные токи, ближний нейтринный детектор.

*Введение.* Эксперимент T2K в Японии [1] – это ускорительный эксперимент с длинной базой второго поколения для изучения нейтринных осцилляций. Источником нейтрино служит 30 ГэВ-ный протонный синхротрон ускорительного комплекса J-PARC в городе Токай, откуда нейтрино направляются в Супер-Камиоканде. Первичные протоны (или каоны) сталкиваются с графитовой мишенью, в результате чего образуются вторичные пионы, из распадов которых появляются (анти)нейтрино. Длина пролётной базы составляет 295 км. Принципиально новым подходом является использование квазимоноэнергетического “off-axis” пучка, настроенного на первый осцилляционный максимум и направленного под углом  $2.5^\circ$  к оси детектора.

Эксперимент был разработан с целью исследования появления электронных нейтрино в пучке мюонных, а также исчезновения части мюонных нейтрино из пучка. В

<sup>1</sup> МФТИ, 141701 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: shaykina@inr.ru.

<sup>2</sup> ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, пр-кт 60-летия Октября, 9А.

данный момент T2K также работает на антинейтринной моде для изучения осцилляций мюонных антинейтрино, что особенно важно в рамках данной работы. Для ускорительных экспериментов второго поколения приоритетными задачами являются измерение угла смешивания  $\theta_{13}$  и определение знака  $\Delta m_{23}^2$ . Кроме того, важнейшим направлением является поиск нарушения CP-симметрии в лептонном секторе [2] и измерение дираковской фазы  $\delta$ . Последнее требует использования данных как от нейтринного, так и от антинейтринного пучка, рассматриваемого в данной работе. Величина CP-нарушения определяется по следующей формуле:

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\text{anti } \nu_\mu \rightarrow \text{anti } \nu_e)}{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\text{anti } \nu_\mu \rightarrow \text{anti } \nu_e)}. \quad (1)$$

На данный момент сохранение CP-симметрии исключено на уровне  $2\delta$  согласно последним результатам эксперимента T2K [3].

Комплекс детекторов T2K представлен дальним водным черенковским детектором Супер-Камиоканде и ближними детекторами, расположенными на расстоянии 280 м от мишени. Ближний детектор INGRID (Interactive Neutrino GRID) служит для определения параметров пучка до взаимодействий, ближний детектор ND280 [4] предназначен для измерения потока нейтрино, определения состава нейтринного пучка до осцилляций, а также для определения энергетического спектра нейтрино и измерения сечения взаимодействия нейтрино с веществом. Кроме того, использование ND280 позволяет значительно уменьшить систематические ошибки.

Цель данной работы – исследовать взаимодействия мюонных антинейтрино через заряженные токи и рождённые в этих взаимодействиях нейтроны в ближнем нейтринном детекторе ND280 эксперимента T2K, провести анализ кинематики нейтронов на основе времени пролёта. Рассматриваются взаимодействия, происходящие в первом высоко-сегментированном сцинтилляционном детекторе FGD1 (Fine Grained Detector), а также объекты в электромагнитном калориметре ECal (Electromagnetic Calorimeter).

*Анализ характеристик нейтронов.* В данной работе рассматриваются взаимодействия мюонных антинейтрино через заряженные токи (CC) в треке ближнего детектора ND280 на основе Монте-Карло симуляции, использующей генератор NEUT версии 5.3.2. Число протонов на мишени (POT) составляет  $2 \times 10^{21}$ . Антинейтринные события определяются как CC взаимодействия в чувствительном объёме FGD1. Инклюзивный анализ включает все возможные конечные состояния после рассеяния антинейтрино на нуклоне. Как и в случае нейтринного анализа [5], он подразделяется на 3 категории: без заряженных пионов в конечном состоянии (CC0 $\pi$ ), с одним отрицательно заряженным

пионом в конечном состоянии ( $CC1\pi^-$ ) и все другие возможные комбинации с большим числом пионов ( $CCOther$ ).

При энергиях, характерных для Т2К, доминирующим является квазиупругое рассеяние ( $CCQE$ ):

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n. \quad (2)$$

В этом случае в конечном состоянии наблюдаются только заряженный мюон и нейтрон. Рассмотрим кинематику таких нейтронов, образовавшихся в результате антинейтринного взаимодействия с вершиной в FGD1 FV. Энергетическое и угловое распределения представлены на рис. 1.

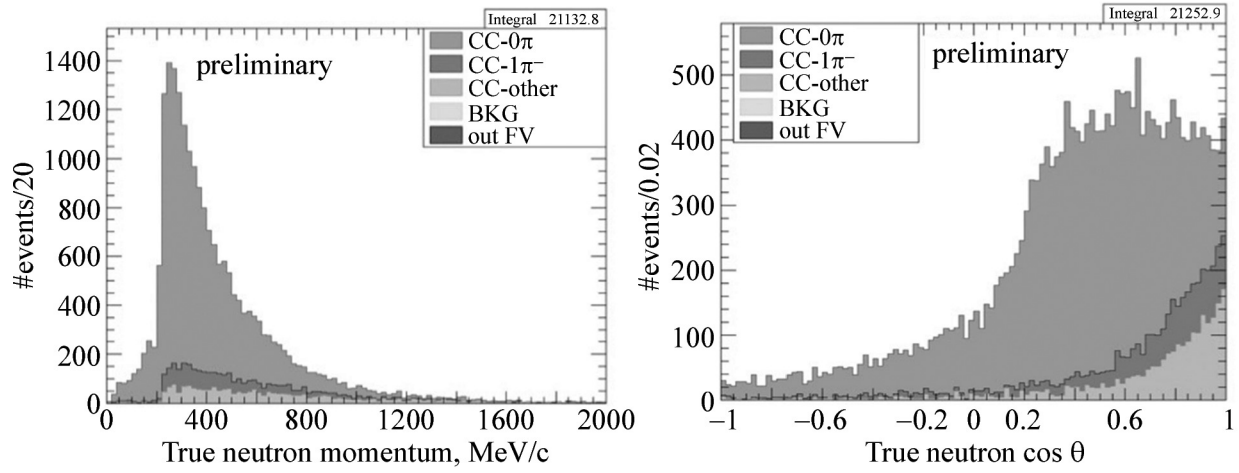


Рис. 1: Энергетическое (слева) и угловое (справа) распределения нейтронов, образовавшихся в антинейтринном взаимодействии в FGD1 FV, Монте-Карло симуляция. Последние две позиции (BKG и out FV) указаны по традиции, в данных условиях не проявляются.

Видно, что нейтроны присутствуют преимущественно в  $CC0\pi$  топологии и имеют достаточно широкое угловое распределение. Вследствие этого нейтроны в основном останавливаются не в DsECal, расположенном перпендикулярно оси пучка, а в BrECal, окружающем детектор и имеющем меньшую толщину, что снижает эффективность детектирования. Последние 2 топологии (BKG – фоновые события и out FV – события вне чувствительного объёма) на графике не представлены, такие события не могут встречаться в распределениях истинных величин.

На следующем этапе были рассмотрены все восстановленные изолированные объекты в ECal (треки и ливни) и выбраны те из них, которые вызваны нейтронами. Таким

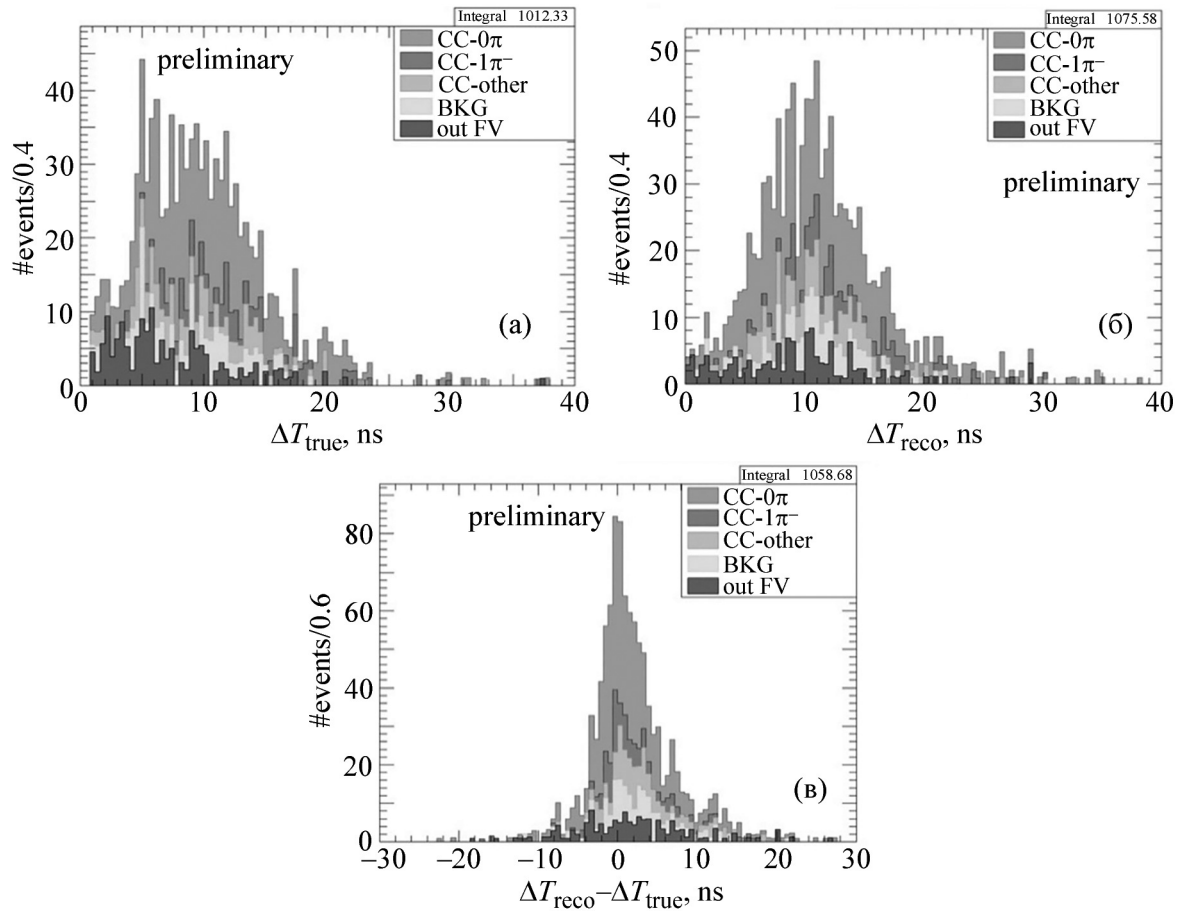


Рис. 2: Истинная (а) и восстановленная (б) временная задержка между рождением нейтрона в FGD1 FV и возникновением трека или ливня от нейтрона в ECal и их разность (в).

образом было получено 1419 объектов на 8749 нейтронов, пересекающих ECal. Эффективность регистрации составляет около 16%. В табл. 1 представлена информация о процентном соотношении количества нейтронов, рождённых в антинейтринных взаимодействиях в FGD1 FV и вызвавших трек или ливень в ECal, к общему числу антинейтринных взаимодействий в FGD1 FV, разделённая по топологиям инклюзивного анализа. Кроме того, указаны аналогичные процентные соотношения для различных селекций, т.е. после применения дополнительных критериев, направленных на отбор CC0π, CC1π<sup>-</sup> и CCOther событий. В рамках данной работы особенно важна информация о CC0π селекции, поскольку в силу малости фонов она позволяет в дальнейшем отбирать нейтроны с наибольшей чистотой при наибольшей эффективности.

Т а б л и ц а 1

Процентное соотношение нейтронов, вызвавших изобъект в ECal, к общему числу антинейтринных взаимодействий в FGD1 FV по топологиям инклюзивного анализа (вверху) и по селекциям (внизу)

Инклюзивный анализ	CC0 $\pi$	CC1 $\pi^-$	CCOther
Процентное соотношение, %	3.58	3.86	11.44
Число событий в ECal	608.67	145.72	309.13
Число взаимодействий в FGD1 FV	16986.95	3771.04	2702.91
Анализ по селекциям	CC0 $\pi$	CC1 $\pi^-$	CCOther
Процентное соотношение, %	3.09	3.58	10.67
Число событий в ECal	661.91	54.84	739.78
Число взаимодействий в FGD1 FV	21406.79	1532.99	6930.28

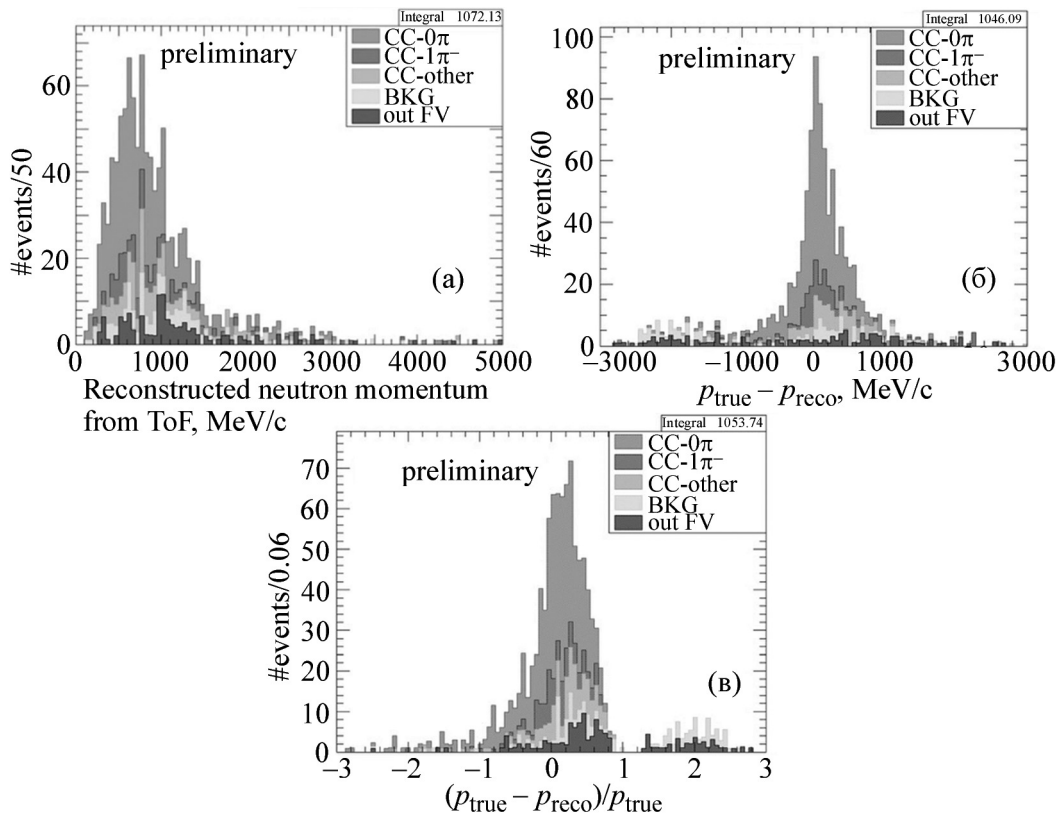


Рис. 3: Импульс нейтрона, восстановленный по времени пролёта (а), разность восстановленного и истинного импульсов (б), относительная разность (в).

Рассмотрим временной промежуток между рождением нейтрона в антинейтринном взаимодействии в FGD1 FV и моментом возникновения трека или ливня в ECal, вызванного этим нейтроном. В качестве истинного (true) времени примем разницу во времени между начальной и конечной точками трека нейтрона, в качестве восстановленного (reco) – разницу между точкой начала восстановленного мюонного трека и точкой начала изолированного объекта в ECal, который представляет собой электромагнитный ливень или трек. Соответствующие графики представлены на рис. 2.

Основным источником фона для данного анализа служат гамма-кванты от распада нейтрального пиона, рождённого в антинейтринном взаимодействии вместе с нейтроном. Временное разрешение ближнего детектора составляет около 3 нс, следовательно, согласно вышеприведённым распределениям детектор может позволить отделить нейтроны от гамма-квантов по времени пролёта. Кроме того, зная время пролёта и массу нейтрона, можно восстановить его импульс и сравнить с истинным значением, предсказанным симуляцией (рис. 3).

*Заключение.* В настоящей работе было показано, что нейтроны, рождённые в антинейтринных взаимодействиях, могут быть отделены от гамма-квантов на основе информации о времени пролёта частиц. Следующим этапом данного анализа является отбор нейтронов, но этот вопрос выходит за рамки данной статьи.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] K. Abe et al. (T2K Collaboration), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **659**(1), 106 (2011). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.067>.
- [2] C. Jarlskog, Phys. Rev. Lett. **55**(10), 1039 (1985). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1039>.
- [3] K. Abe et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. **17**, 171802 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.171802>.
- [4] Yu. Kudenko (Representing the T2K Collaboration), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **598**(1), 289 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.029>.

- [5] K. Abe et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. D **91**(7), 072010 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.072010>.

Поступила в редакцию 13 декабря 2019 г.

После доработки 26 мая 2020 г.

Принята к публикации 27 мая 2020 г.

*Публикуется по рекомендации Московской международной школы физики-2019 (ФИАН, Москва).*