

ЭКСПЕРИМЕНТ T2K: ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2021 г. М. М. Хабибуллин*

Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Москва, Россия

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.; после доработки 07.05.2020 г.; принята к публикации 07.05.2020 г.

Международный ускорительный нейтринный эксперимент T2K (Tokai-to-Kamioka) начал набор данных в 2010 г. и с тех пор провел 10 сеансов в нейтринном и антинейтринном режимах. В настоящей работе представлены последние результаты анализа данных, включая первые ограничения CP -нарушающей фазы δ_{CP} на уровне достоверности 3σ , а также планы по модернизации ближнего детектора ND280.

DOI: 10.31857/S0044002720060185

1. ВВЕДЕНИЕ

T2K (Tokai-to-Kamioka) — это осцилляционный нейтринный эксперимент с длинной базой, в котором поток мюонных нейтрино и антинейтрино, образованных в протонном ускорительном комплексе J-PARC, направляется в сторону дальнего детектора Супер-Камиоканде (SK), расположенного в 295 км [1]. Первоначально основными задачами эксперимента T2K были открытие переходов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, т.е. подтверждение ненулевого значения угла смешивания θ_{13} , и прецизионное измерение параметров осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, однако после открытия ненулевого значения θ_{13} на передний план выступает задача поиска CP -нарушения в лептонном секторе.

В данной статье кратко описывается экспериментальная установка T2K, приводятся последние результаты эксперимента, а также планы по модернизации ближнего детектора ND280.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА T2K

Источником нейтрино в T2K является Японский протонный ускорительный исследовательский комплекс (J-PARC) в селении Токай, префектура Ибараки. Поток мюонных нейтрино и антинейтрино в T2K получается в результате распадов заряженных мезонов, образовавшихся в ядерных реакциях протонов с энергией 30 ГэВ, направленных на специальную графитовую мишень. С помощью трех последовательно расположенных

тороидальных электромагнитов, окружающих графитовую мишень, заряженные мезоны фокусируются в направлении распадной зоны, за которой расположен массивный поглотитель пучка, задерживающий всю адронную компоненту и низкоэнергетическую часть мюонной компоненты пучка. Меняя направление импульсного тока электромагнитов, можно переключаться между нейтринным и антинейтринным режимами.

T2K состоит из двух ближних детекторов, установленных на расстоянии 280 м от мишени (INGRID и ND280), и дальнего детектора SK, который располагается на расстоянии 295 км. SK и один из ближних детекторов (ND280) расположены под небольшим углом (2.5°) по отношению к оси исходного протонного пучка, благодаря чему энергетический спектр нейтринного потока имеет почти монолинию, соответствующую осцилляционному максимуму ($E_\nu \approx 600$ МэВ) на выбранном расстоянии 295 км, при этом значительно подавляется нежелательный высокоэнергичный фон.

Для контроля направления и интенсивности нейтринного пучка в реальном времени служит детектор INGRID (Interactive Neutrino GRID), установленный на оси нейтринного пучка [2]. Десятилетняя история наблюдений INGRID показывает, что направление нейтринного пучка стабильно лежит в узкой полосе ± 0.1 мрад.

Внеосевой ближний детекторный комплекс ND280 состоит из магнита UA1, внутри которого в поле 0.2 Тл помещены трекер (три времяпроекционных камеры TPC и два высокосегментированных сцинтилляционных детектора FGD) [3, 4] и другие детекторы частиц (π^0 -детектор P0D, электромагнитный калориметр ECAL и детектор

*E-mail: marat@inr.ru

мюонного пробега SMRD) [5–7]. Эта система служит для определения состава нейтринного пучка, а также для ограничения систематических ошибок, связанных с предсказанием потока нейтрино и с сечениями нейтринных взаимодействий.

Дальний детектор SK представляет собой бак с водой (диаметр 39 м, высота 41 м, полный вес воды 50 тысяч тонн), разделенный на внутреннюю часть, просматриваемую более 11000 фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) диаметром 50 см, и на внешнюю часть (~2 тысяч ФЭУ, \varnothing 20 см). SK способен различать черенковские кольца, вызванные мюонами и электронами, с эффективностью, превышающей 99% [8]. Для синхронизации работы ближних и дальнего детекторов используется спутниковая система навигации GPS (Global Positioning System).

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ И ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ T2K

T2K начал набор данных в 2010 г. и к началу февраля 2020 г. провел 10 сеансов как в нейтринном, так и в антинейтринном режимах. Всего за это время набрана статистика, соответствующая 3.64×10^{21} протонов на мишени (POT): ~55% в нейтринном (ν) режиме, ~45% — в антинейтринном ($\bar{\nu}$) режиме. Анализ в T2K представляет собой многоэтапную процедуру, включающую в себя не только обработку реальных данных, но и моделирование различных процессов: от протонных взаимодействий в графитовой мишени до нейтринных взаимодействий в детекторах [9]. К началу марта 2020 г. проанализировано около 86% всех данных (сеансы 1–9), что соответствует 1.49×10^{21} POT в ν -режиме и 1.64×10^{21} POT в $\bar{\nu}$ -режиме.

Для получения осцилляционных параметров с помощью специальных критериев отбираются события в дальнем детекторе SK и формируются пять наборов данных: три в ν -режиме (μ -CCQE, e -CCQE, e -CC1 π^+)¹⁾ и два в $\bar{\nu}$ -режиме (μ -CCQE, e -CCQE), затем строятся функции правдоподобия. Эти пять наборов данных анализируются одновременно, при этом искомые параметры определяются методом отношения функций правдоподобия. Для ограничения параметров нейтринного потока, сечений взаимодействия и систематических погрешностей используются данные ближнего детектора

¹⁾ l -CCQE (Charged-Current Quasi Elastic) — процесс квазиупругого взаимодействия нейтрино посредством заряженных токов $\nu_l N \rightarrow l N'$, где N, N' — нуклоны, l — лептон, например, $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$; e -CC1 π^+ — процесс с образованием не менее одного положительного пиона $\nu_e N \rightarrow e^- N' \pi^+$.

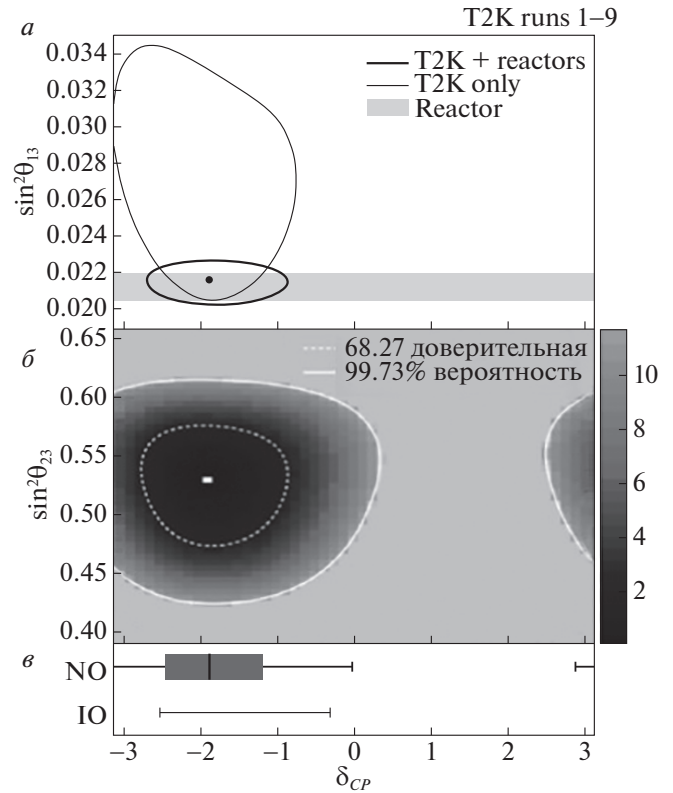


Рис. 1. Ограничения на осцилляционные параметры нейтрино, полученные в эксперименте T2K после обработки данных девяти сеансов: *a* — контуры двумерных доверительных интервалов (68.27%) на плоскости $\sin^2(\theta_{13}) - \delta_{CP}$ в предположении нормальной иерархии масс (NO); контур, обозначенный как “T2K only” (серая линия), был получен без использования ограничений на $\sin^2(\theta_{13})$ из других экспериментов, в то время как контур “T2K + reactors” (черная линия) был получен с использованием результатов реакторных экспериментов (серая полоса); *b* — контуры двумерных доверительных интервалов (68.27% и 99.73%) на плоскости $\sin^2(\theta_{23}) - \delta_{CP}$ в предположении NO с использованием результатов “T2K + reactors”; градации оттенков серого соответствуют величине функции правдоподобия ($-2 \ln \lambda$) для каждого значения осцилляционных параметров; *c* — одномерные доверительные интервалы параметра δ_{CP} для нормальной (NO) и обратной (IO) иерархий масс в случае “T2K + reactors”; закрашенная полоска соответствует доверительной вероятности 68.27%, а длина отрезков — доверительной вероятности 99.73%. Рисунок из [9].

ND280, что позволяет существенно уменьшить систематические неопределенности (например, с 13–17% до 4–9% для l -CCQE реакций).

В результате анализа данных девяти сеансов получены следующие осцилляционные параметры: $|\Delta m_{32}^2| = (2.45 \pm 0.07) \times 10^{-3}$ эВ²/c⁴ и $\sin^2(\theta_{23}) = 0.53_{-0.04}^{+0.03}$ — для нормальной иерархии масс (т.е.

для случая $m_3 > m_{1,2}$), что согласуется с результатами других осцилляционных экспериментов. Кроме того, с использованием данных для θ_{13} из реакторных экспериментов получены следующие наилучшие оценки CP -нарушающей фазы: $\delta_{CP} = -1.89_{-0.58}^{+0.70}$ для нормальной иерархии масс (НО) и $\delta_{CP} = -1.38_{-0.54}^{+0.48}$ для обратной иерархии масс (Ю). Для δ_{CP} также вычислены 3σ доверительные интервалы: $[-3.41; -0.03]$ для НО и $[-2.54; -0.32]$ для Ю, которые показывают, что с вероятностью 99.73% CP -сохраняющее значение $\delta_{CP} = 0$ исключается для обеих иерархий масс, а для обратной иерархии исключается и значение $\delta_{CP} = \pi$ [9]. Полученные результаты для $\sin^2(\theta_{13})$, $\sin^2(\theta_{23})$ и δ_{CP} графически представлены на рис. 1.

4. МОДЕРНИЗАЦИЯ БЛИЖНЕГО ДЕТЕКТОРА ND280

Основными факторами, ограничивающими чувствительность эксперимента Т2К к значению CP -нарушающей фазы δ_{CP} , являются систематические погрешности, связанные с неопределенностями сечений нейтринных взаимодействий. Улучшения точности измерения этих сечений можно достичь уменьшением сегментации активной мишени, в которой происходят нейтринные взаимодействия. Для достижения этой цели в 2021 г. планируется проведение модернизации ближнего детектора ND280 [10], которая заключается в том, что вместо детектора POD будут установлены три новые системы: 1) активная трехмерная нейтринная мишень SFGD примерно из 2 млн сцинтилляционных кубиков ($192 \times 184 \times 56$ кубиков, каждый объемом 1 см^3), свет с которых будет собираться спектросмещающими оптическими волокнами и считываться кремниевыми фотодиодами [11]; 2) две горизонтальные времяпроекционные камеры НТРС (сверху и снизу относительно SFGD); 3) шесть времяпролетных (ToF) панелей вокруг системы НТРС1 + SFGD + НТРС2.

Ожидается, что эти новшества приведут к уменьшению систематики Т2К до 3–4%; расширят акцептанс регистрации мюонов до 4π ; снизят порог регистрации протонов до 300 МэВ/с; позволят детектировать нейтроны и подавить фон частиц, попадающих в ближний детектор снаружи.

Автор выражает благодарность Российскому научному фонду за поддержку в виде гранта РФФ № 19-12-00325.

Автор выражает благодарность Российскому научному фонду за поддержку в виде гранта РФФ № 19-12-00325.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Abe *et al.* (T2K Collab.), Nucl. Instrum. Methods A **659**, 106 (2011).
2. K. Abe *et al.* (T2K Collab.), Nucl. Instrum. Methods A **694**, 211 (2012).
3. N. Abgrall *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **637**, 25 (2011).
4. P. A. Amaudruz *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **696**, 1 (2012).
5. S. Assylbekov *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **686**, 48 (2012).
6. D. Allan *et al.*, JINST **8**, P10019 (2013).
7. S. Aoki *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **698**, 135 (2013).
8. S. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collab.), Nucl. Instrum. Methods A **501**, 418 (2003).
9. K. Abe *et al.* (T2K Collab.), Nature **580**, 339 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2177-0>; arXiv:1910.03887.
10. K. Abe *et al.*, arXiv:1901.03750.
11. A. Blondel *et al.*, JINST **13**, P02006 (2018).

EXPERIMENT T2K: LATEST RESULTS AND PERSPECTIVES

M. Khabibullin

Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The long-baseline accelerator neutrino experiment T2K (Tokai-to-Kamioka) in Japan has started data taking in 2010 and carried out 10 runs in neutrino and antineutrino modes. In this talk the latest results, including the first 3σ constraints on the CP -violating phase δ_{CP} , and future plans on the upgrade of the near detector ND280 are presented.