

ЭКСПЕРИМЕНТ WAGASCI ПО ИЗМЕРЕНИЮ СЕЧЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРИНО НА ВОДЕ И УГЛЕВОДОРОДЕ НА НЕЙТРИННОМ ПУЧКЕ УСКОРИТЕЛЯ J-PARC

Т. Овсянникова^{1,2,}, М. Антонова^{1,2}, А. Измайлов^{1,3},
Ю. Куденко^{1,2}, М. Хабибуллин¹, А. Хотянцев¹, А. Мефодьев^{1,4},
О. Минеев¹, С. Суворов^{1,4}, Н. Ершов¹
от имени коллаборации WAGASCI*

¹ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³ Институт корпускулярной физики (IFIC CSIC), Валенсия, Испания

⁴ Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный, Россия

Основной целью эксперимента с длинной базой T2K (Tokai-to-Kamioka, Япония) является изучение нейтринных осцилляций на интенсивном пучке мюонных нейтрино и антинейтрино. Измерения сечений взаимодействия нейтрино в ближнем детекторном комплексе (ND280) эксперимента T2K используются для настройки параметров, определяющих моделирование событий в дальнем детекторе (Super-Kamiokande), что составляет ключевую идею эксперимента и позволяет существенно увеличить точность осцилляционного анализа. Различие в веществе мишени между дальним (вода) и ближним (сцинтиллятор, углеводород) детекторах ведет к появлению существенной систематической погрешности при анализе осцилляций. Систематическая погрешность может быть уменьшена путем проведения прямых измерений. Для этих целей предложен новый водно-сцинтилляционный детектор WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator detector). Детектор будет работать на нейтринном пучке ускорителя J-PARC, используемом в T2K, и основной целью станет определение отношения сечений взаимодействия нейтрино через заряженные токи на воде и углеводороде с точностью, достигающей нескольких процентов. В будущем в физическую программу эксперимента могут быть включены прецизионные измерения различных заряженных каналов взаимодействия нейтрино. В данной работе представлена концепция детектора и действующий план по его установке.

*E-mail: ovsyunik@inr.ru

The main goal of a long-base experiment T2K (Tokai-to-Kamioka, Japan) is studying of neutrino oscillations with an intense beam of muon neutrinos and antineutrinos. The crucial idea of T2K experiment lays in the fact that the measurements of neutrino interactions in the near detector complex (ND280) are used to tune parameters, which determine the expected number of events in the far detector (Super-Kamiokande). It allows one to significantly increase the precision of oscillation analysis. The difference in the target material between the far (water) and near (scintillator, hydrocarbon) detectors leads to the main noncanceling systematic uncertainty for the oscillation analysis. In order to reduce the contribution of this error, a recently designed WAter Grid And SCIntillator detector (WAGASCI) was proposed. The detector will operate at the J-PARC neutrino beam to measure the ratio of charged-current neutrino cross sections between water and hydrocarbon with a few percent accuracy. Further physical program may include precise measurements of various charged channels of neutrino interaction. In this article, the concept of the detector and current plan for its installation are presented.

PACS: 14.60.Pq; 29.40.Vj; 29.20.Ej

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент T2K (Tokai-to-Kamioka, Япония) является экспериментом с длинной базой. Основная задача этого эксперимента — изучение нейтринных осцилляций. В осцилляционном анализе эксперимента T2K поток нейтрино и параметры модели сечений взаимодействия в основном построены на измерениях ближнего детектора ND280 [1]. Систематические погрешности предсказанного количества сигнальных событий в детекторе Super-Kamiokande для различных осцилляционных каналов приведены в таблице [2]. Как видно из таблицы, одна из наибольших погрешностей связана с моделью сечений взаимодействий и возникает из-за разницы между веществами мишени, на которой взаимодействует нейтрино, в ближнем (углеводород CH в активной мишени) и дальнем детекторе (вода), а также ограниченности угловой чувствительности ближнего детектора по сравнению с чувствительностью дальнего (угловой аксептанс Super-Kamiokande — 4π). Для уменьшения этих систематических погрешностей предложен новый водно-сцинтилляционный

Систематические погрешности предсказанного количества сигнальных событий в детекторе Super-Kamiokande (1σ , %) для различных осцилляционных мод

Систематика	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$
Поток и сечения взаимодействия	3,1	2,7	3,4
Зависимость от состава мишени	4,7	5,0	10,0
Дальний детектор	2,4	3,0	2,1
Ядерные процессы	2,7	4,0	3,8
Общая	6,8	7,7	11,6

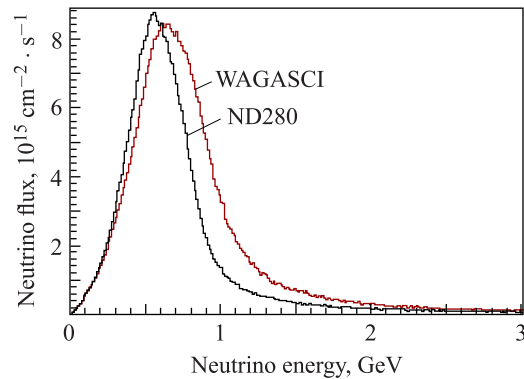


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Ожидаемый поток нейтрино для WAGASCI (красная линия) и ближнего детектора (черная линия)

детектор WAGASCI, в котором будет использован подход, ранее применявшийся при определении отношения сечений взаимодействия нейтрино на Fe и CH с помощью одного из детекторов ближнего комплекса INGRID и «протонного» модуля [3]. Основными задачами нового эксперимента являются:

- определение отношения сечений взаимодействия нейтрино через заряженные токи между водой и сцинтиллятором с точностью 3 %;
- измерение различных каналов взаимодействия нейтрино через заряженные токи с высокой точностью и большим угловым акцептансом.

Новый детектор будет располагаться в холле комплекса ближних детекторов и использовать тот же, что и ND280, пучок ускорителя J-PARC. «Внеосевой» угол, на котором будет располагаться детектор, равен $1,5^\circ$, что дает близкий к «внеосевому» потоку ND280 ($2,5^\circ$) поток нейтрино со средним значением энергии около 0,7 ГэВ, как показано на рис. 1.

1. ДЕТЕКТОР WAGASCI

На рис. 2 показана конструкция детектора WAGASCI. Детектор состоит из двух главных элементов: центральной части, которая является мишенью взаимодействия нейтрино и содержит воду и углеводород, и детекторов мюонного пробега (MRDs), которые окружают мишень. Мишень состоит из четырех чередующихся модулей, заполненных водой или сцинтиллятором. Дочерние частицы, рожденные в результате взаимодействия нейтрино в мишени, детектируются с помощью 3D-решетчатой структуры, сделанной из тонких сцинтилляционных счетчиков. Размер одного сцинтилляционного счетчика — $1000 \times 25 \times 3$ мм, в свою очередь, общий размер мишени — $1 \times 1 \times 2$ м.

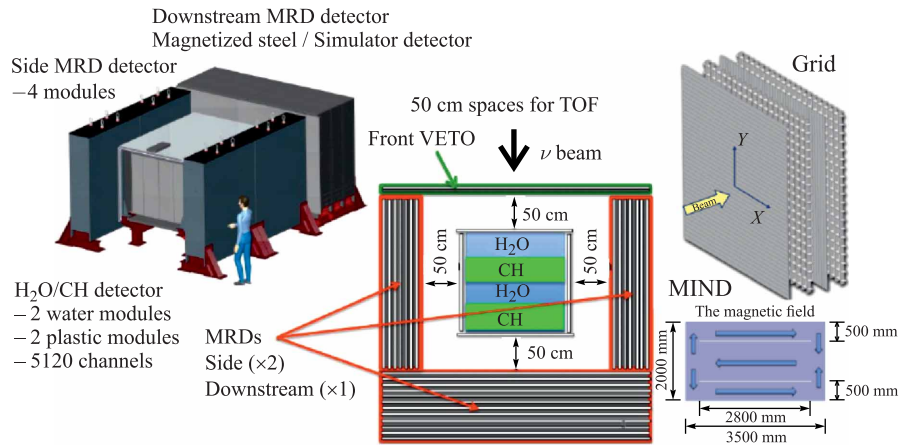


Рис. 2. Конструкция детектора WAGASCI

В решетчатой структуре ячейки между активными счетчиками заполнены веществом мишени (водой или CH). Такая конструкция позволяет максимизировать долю вещества мишени до 80 %, а также обеспечивает хорошую способность отслеживать частицы, что, в свою очередь, позволяет реконструировать треки, возникающие под большими углами по отношению к направлению пучка ν . Идентификация мюонов и измерение их импульса обеспечивается с помощью детекторов MRD, имеющих «сэндвич»-структуру из слоев железа и сцинтилятора. Для уменьшения фона, связанного с взаимодействием нейтрино в детекторах MRD и стенах детекторного холла, будет использоваться информация о времени пролета частицы между мишенью и детекторами MRD.

Активными элементами как в мишени, так и в окружающих ее детекторах MRD являются сцинтилляционные счетчики. Сбор сцинтилляционного света производится с помощью спектросмещающего оптоволоконна, встроенного в специальные канавки в сцинтилляционных счетчиках, которое передает свет фотосенсорам. В качестве последних используется Hamamatsu MPPCs. Для эксперимента WAGASCI были разработаны фотодетекторы нового поколения MPPC, имеющие низкий темновой шум и низкий уровень послеимпульсов, а также широкий диапазон рабочего перенапряжения (≈ 4 В, что позволяет увеличить эффективность) и низкий «cross-talk» между пикселями.

Получение высокой эффективности детектирования с помощью тонких сцинтилляторов в центральном детекторе имеет решающую роль для выполнения физической задачи. С этой целью эксплуатационные качества пластиковых сцинтилляторов были измерены на позитронном пучке с энергией 600 МэВ. Средний световой выход находится в пределах 10–18 фотоэлектронов,

а эффективность регистрации ожидается лучше чем 99 % для порога регистрации 1,5 фотоэлектрона.

Детектор WAGASCI будет работать при обеих полярностях магнитной фокусирующей системы T2K. При эксплуатации детектора с отрицательной полярностью (антинейтринным пучком) требуется уменьшение нейтринного фона, который в этом случае находится на уровне 30 %. Для того, чтобы обеспечить зарядовую дискриминацию дочерних частиц, было предложено использовать магнетизированный детектор MIND (Magnetized Iron Detector) [4], располагающийся позади мишени по отношению к направлению пучка (вместо детекторов MRD, расположенных в этой части). Структура MIND состоит из чередующихся слоев сцинтиллятора и железных пластин, намагниченных с помощью проводящих катушек, намотанных на поверхность каждой пластины. Анализ кривизны траектории частицы в магнитном поле позволит определить знак заряда частицы. Ожидаемая эффективность корректного определения заряда находится на уровне 90 %, что позволяет снизить фон от нейтринных взаимодействий (мюонов) до уровня 2,9 %, после отбора событий.

2. ОЖИДАЕМАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕТЕКТОРА

Ожидаемая эффективность детектора WAGASCI была исследована с помощью методов Монте-Карло. Нейтринный пучок и взаимодействие нейтрино внутри детектора были смоделированы с помощью пакетов JNUBEAM [5] и NEUT [6]. Дальнейшее моделирование включает в себя распространение вторичных частиц через пространство детектора (с помощью инструментария GEANT4), излучение сцинтилляционного света, его распространение внутри спектросмещающего волокна и сбор света с помощью фотодетекторов. Взаимодействие нейтрино по заряженному току в центральной части детектора определяется по траекториям частиц, начинающихся в чувствительном объеме центральной части и входящих в детекторы MRD, в этом случае MRDs используются для определения длинных мюонных треков. Треки частиц, пересекающие центральную часть и MRD, должны останавливаться в детекторе. Ожидаемое количество событий для заряженных токов в углеводородной и водной мишени при статистике 10^{21} протонов на мишень (POT) — $3 \cdot 10^3$ и $2,5 \cdot 10^3$ соответственно. А чистота реконструкции событий от взаимодействий нейтрино через заряженные токи в углеводороде и воде — 91,0 и 75,5 % соответственно. Основные распределения для отобранных событий приведены на рис. 3.

Для проверки основных характеристик мишени WAGASCI предложен пилотный эксперимент. Прототип мишени будет установлен перед центральным модулем детектора INGRID и будет работать на «осевом» нейтринном

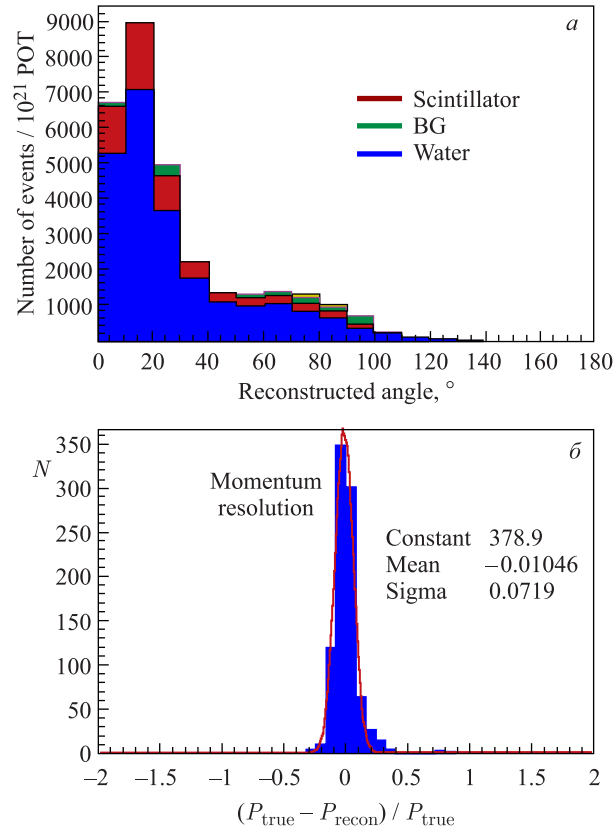


Рис. 3. *a*) Реконструированный угол для мюонного кандидата для отобранных событий в водной мишени, события разделены на категории, основанные на известных координатах вершины. *б*) Разрешение по импульсу (около 7%), полученное для треков, остановившихся в детекторах MRD

пучке. Общий размер прототипа — $125 \times 125 \times 46$ см с общей массой 1,2 т. Ожидается, что отношение сечений взаимодействия нейтрино на воде и сцинтилляторе будет определено с общей погрешностью 5% при статистике $1 \cdot 10^{20}$ POT и 3% при статистике $2 \cdot 10^{20}$ POT в положительной и отрицательной (антинейтринный пучок) полярности фокусирующих магнитов соответственно, однако угловой акцептанс прототипа будет значительно ограничен в сравнении с полной сборкой WAGASCI. В 2016 г. завершена сборка и установка прототипного модуля и получены первые данные. На данный момент ведется сборка полного детектора. Полностью собраны и готовы к работе два модуля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для уменьшения систематических погрешностей осцилляционного анализа эксперимента T2K и измерения различных каналов взаимодействия нейтрино через заряженные токи был предложен новый эксперимент WAGASCI. Конструкция детектора позволит определить отношение сечений взаимодействия нейтрино на воде и сцинтилляторе с точностью 3%. Сборка и установка всех модулей детектора WAGASCI была начата в ноябре 2016 г. К августу 2017 г. были полностью собраны два рабочих модуля.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-32-00795 «Изучение нейтринных взаимодействий с помощью сегментированного (вода–сцинтиллятор) детектора WAGASCI на нейтринном пучке J-PARC», а также при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-12-00560) и частично выполнена в рамках центра «Фундаментальные исследования и физика частиц» (ФИФЧ) при государственной поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (соглашение с Минобрнауки РФ № 02.а03.21.0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abe K. *et al.* (T2K Collab.). The T2K Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 659. P. 1–602.
2. Abe K. *et al.* (T2K Collab.). Neutrino Oscillation Physics Potential of the T2K Experiment // Prog. Theor. Exp. Phys. 2015. P. 043C01.
3. Abe K. *et al.* (T2K Collab.). Measurement of the Inclusive ν_μ Charged Current Cross Section on Iron and Hydrocarbon in the T2K On-Axis Neutrino Beam // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. P. 052010.
4. Asfandiyarov R. *et al.* Proposal for SPS Beam Time for the Baby MIND and TASD Neutrino Detector Prototypes. arXiv:1405.6089v1.
5. Abgrall N., Blondel A. Constraining Neutrino Flux Predictions with Hadron Production Data: The NA61/SHINE Measurements for the T2K Experiment. CERN-THESIS-2011-165. 2011.
6. Hayato Y. A Neutrino Interaction Simulation Program Library NEUT // Acta Phys. Polon. B. 2009. V. 40. P. 2477–2489.