

Новый высокосегментированный нейтринный детектор SuperFGD для эксперимента T2K

С. А. Федотов,* А. Е. Дергачева, Н. В. Ершов, Ю. Г. Куденко, А. В. Мефодьев, О. В. Минеев, Д. В. Федорова, М. М. Хабибуллин, А. Н. Хотянцев, А. А. Чвириова
Институт ядерных исследований Российской академии наук
Россия 117312, Москва В-312, проспект 60-летия Октября, 7а
(Поступила в редакцию 24.10.2022; подписана в печать 29.11.2022)

Высокосегментированный сцинтилляционный детектор SuperFGD находится на финальной стадии своего создания. Он призван уменьшить систематическую ошибку в эксперименте T2K, что крайне важно для увеличения чувствительности эксперимента при поиске CP-нарушения в нейтринных осцилляциях. Детектор SuperFGD будет состоять из около 2×10^6 маленьких ($10 \times 10 \times 10$ мм³) оптически изолированных пластиковых сцинтилляционных кубиков с тремя ортогональными отверстиями диаметром 1.5 мм. Сцинтилляционный свет с каждого кубика будет сниматься по средством трех ортогональных спектросмещающих волокон, проходящих через три отверстия в каждом кубике, и фотосенсоров Hamamatsu MPPC. В работе представлены результаты исследования сцинтилляционных элементов детектора SuperFGD, результаты тестов двух прототипов детектора на пучке заряженных частиц в CERN, а также планы по финальной сборке детектора и его установке в месте проведения эксперимента.

PACS: 29.40.Mc УДК: 539.1.074.3

Ключевые слова: детектор нейтрино, детектор ND280, детектор SuperFGD, нейтринный эксперимент T2K, высокосегментированный сцинтилляционный детектор.

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью ускорительного нейтринного эксперимента с длинной базой T2K является точное измерение параметров нейтринных осцилляций и поиск CP-нарушения в лептонном секторе. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Основными элементами экспериментальной установки являются дальний детектор Super-Kamiokande (SK) [1], расположенный в 295 км от мишени и ближний комплекс детекторов [2, 3], расположенный на расстоянии 280 м от мишени, а также нейтринный канал. В эксперименте впервые в мире была использована технология смещенного нейтринного пучка, предложенная для эксперимента E889 BNL. Идея этой технологии заключается в том, что дальний детектор находится не на оси протонного пучка, падающего в мишень, а под небольшим углом. В эксперименте T2K этот угол установлен на 2.5° . Использование данной технологии позволяет добиться достаточно моноэнергетического нейтринного пучка [4].

В 2017 г. коллаборация T2K запустила проект по модернизации ближнего детектора. Эта модернизация нацелена на уменьшение систематических ошибок в эксперименте T2K при поиске CP-нарушения в лептонном секторе. Мотивация модернизации ND280 обуславливается следующими причинами:

1. Текущий треккер FGD разработан в первую очередь для заряженных частиц, образованных от нейтринных взаимодействий и летящих в прямом/обратном направлении, в то время как эф-

фективность регистрации таких частиц в детекторе SK не зависит от их направления;

2. Для повышения точности восстановления спектра нейтрино вблизи мишени (до осцилляций), важно регистрировать все заряженные частицы, рожденные в результате нейтринных взаимодействий, в частности, регистрировать протоны с маленьким энергетическим порогом. При нынешней конфигурации этот порог достаточно высок и спектр нейтрино восстанавливается только из измеренных мюонов;
3. При работе с пучком мюонных антинейтрино, для повышения точности осцилляционных параметров, важно регистрировать нейтроны, которые рождаются при взаимодействии через заряженный ток;
4. Чувствительность экспериментов T2K и Нурег-Kamiokande [5] к CP-нарушению требует улучшения систематических погрешностей, для чего необходимо точное измерение сечений нейтринных взаимодействий.

Для решения данных задач был предложен концепт нового высокосегментированного детектора нейтрино SuperFGD.

1. ДЕТЕКТОР SuperFGD

Главным элементом детектора SuperFGD (рис. 2) является маленький сцинтилляционный кубик с размером грани в 1 см. Каждый кубик покрыт отражателем и имеет три ортогональных отверстия диамет-

* fedotov@inr.ru

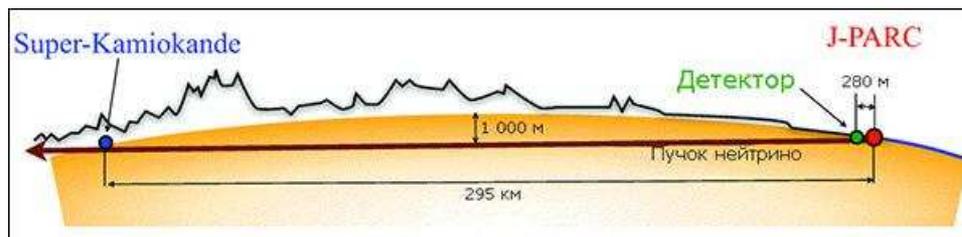


Рис. 1. Схема эксперимента T2K

ром 1.5 мм под WLS-волокна. Количество кубиков в детекторе около двух миллионов. Размеры детектора $192 \times 182 \times 56$ кубиков. При такой конфигурации общая масса детектора достигнет порядка 2 т. Сигнал с каждого из кубиков будет сниматься с помощью трех ортогональных волокон 1.0 мм в диаметре Kuraray Y11, один конец каждого волокна будет просматриваться фотосенсором Hamamatsu MPPC.

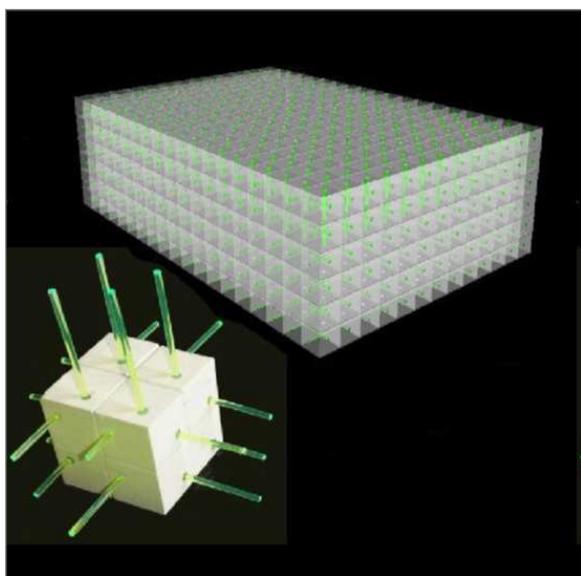


Рис. 2. Схема детектора SuperFGD

Как показывают результаты МК-моделирования, детектор SuperFGD значительно увеличит эффективность регистрации частиц, вылетающих под большими углами (рис. 3, слева), а также такая конфигурация детектора поможет снизить порог регистрации протонов с текущего уровня в 400–500 МэВ до 200–300 МэВ (рис. 3, справа).

Помимо этого, детектор SuperFGD сможет регистрировать мюон и нейтрон, которые рождаются в результате антинейтринных взаимодействий. Мюон образует мгновенную сцинтилляционную вспышку, а в результате взаимодействия нейтрона может родиться протон, поэтому времяпролетный метод может быть использован для восстановления энергии нейтрона. Эффективность регистрации нейтронов данным методом в детекторе SuperFGD достаточно высока (рис. 4). Предпола-

гается что это позволит улучшить энергетическое разрешение для антинейтрино до 7% относительно 15%, которые ожидаются при использовании традиционных технологий восстановления энергии нейтрино [6].

2. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЕТЕКТОРА SuperFGD

Сцинтилляционные элементы детектора SuperFGD (кубики с размером грани в 1 см) изготавливались компанией Унипласт, расположенной в городе Владимир (Россия), используя технологию литья под давлением. Сцинтиллятор состоит из полистирола с добавлением 1.5% паратерфенила и 0.01% РОРОР. После пресс-формы прозрачные кубики имеют точные размеры граней 10.026 мм. На следующем этапе изготовления кубики подвергались травлению химическим агентом для образования белого микропористого слоя отражателя. Флуктуации размеров граней кубиков после данного шага менее чем 30 мкм. На финальном этапе изготовления каждый кубик помещался на приспособление, предназначенное для удержания кубика на месте в процессе сверления трех ортогональных отверстий диаметром 1.5 мм. Точность позиционирования отверстия относительно стороны кубика порядка 40 мкм, относительно угла кубика порядка 50 мкм, а точность позиционирования отверстия относительно отверстия на противоположной стороне кубика порядка 40 мкм (рис. 5). Достигнутая геометрическая точность позволяет осуществить полную сборку детектора с WLS-волокнами диаметром 1 мм.

В настоящее время изготовление кубиков для детектора SuperFGD завершено и все они доставлены в J-PARC (место проведения эксперимента и финальной сборки детектора SuperFGD). 95% кубиков были отобраны по геометрическим параметрам для сборки в детекторе. Контроль за геометрическими параметрами осуществлялся в процессе первичной сборки детектора на лесках, которые формируют 3D структуру детектора с указанной позицией для каждого кубика. Полноразмерные прототипы использовались для проверки данного метода сборки. Один из прототипов состоял из 5 полноразмерных плоскостей 192×184 кубика. Другой полноразмерный прототип состоял из 56 плоскостей 192×15 кубиков. Тесты показали, что леска может быть легко заменена на WLS-волокно. Все про-

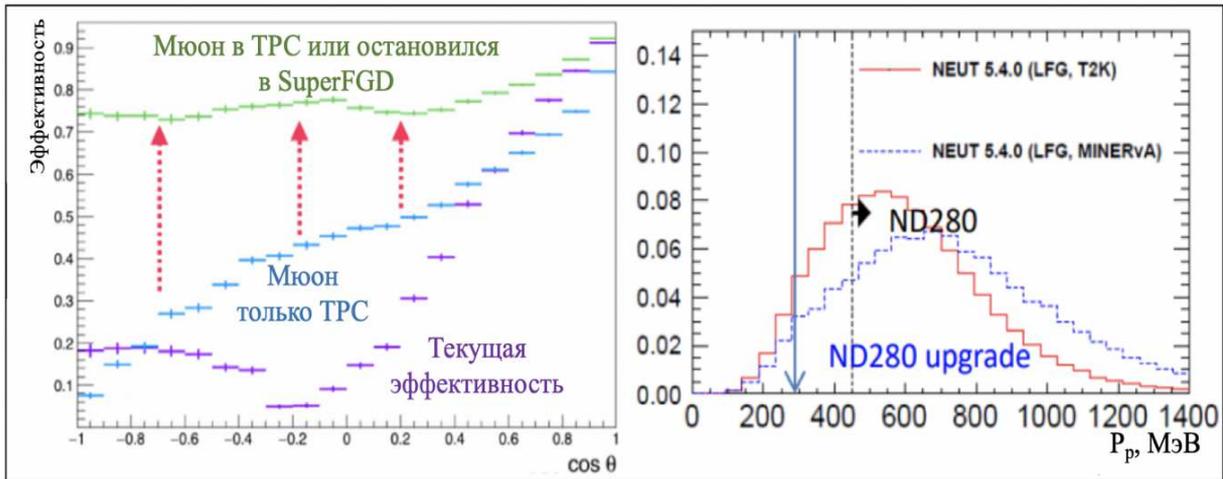


Рис. 3. Слева: эффективность регистрации мюонов в зависимости от их угла вылета относительно пучка. Справа: порог регистрации протона

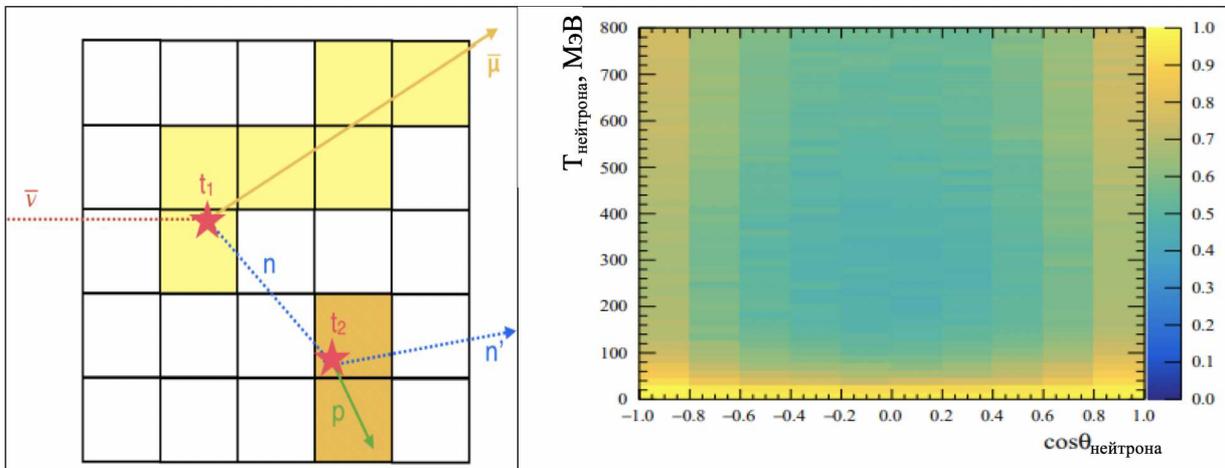


Рис. 4. Слева: схема регистрации нейтрона в детекторе SuperFGD. Справа: эффективность регистрации нейтрона в зависимости от его угла вылета и энергии

тестированные лески менялись легко без каких-либо трудностей. В общей сложности было протестировано более 100 каналов.

2.1. Расстояние между отверстиями в детекторе

Важным моментом является расстояние между отверстиями в детекторе, потому что отверстия должны быть изготовлены в механическом боксе заранее, перед сборкой. Этот шаг в горизонтальной плоскости был измерен на двух полноразмерных прототипах. Первый состоял из собранных первыми пяти плоскостей (192 × 184 кубика), второй состоял из собранных последними пяти полноразмерных плоскостей. Горизонтальный шаг оказался равен 10.30 мм. Вертикальный шаг более сложный для измерений, потому что

нижние слои кубиков испытывают давление от массы верхних слоев. Этот шаг измерялся на нескольких полноразмерных прототипах, но наиболее точные результаты были получены в тесте прототипа, который показан на рис. 6. Этот прототип состоял из 56 плоскостей 16 × 18 кубиков каждая. Прототип был собран на лесках в трех компонентах. На первом шаге на вершину прототипа была установлена дополнительная нагрузка (14 кг) для более быстрого сжатия прототипа с течением времени. Когда сжатие перестало увеличиваться, дополнительная нагрузка была убрана. И был измерен вертикальный шаг 10.28 мм. На рис. 6 можно также заметить достаточно сильную зависимость размеров прототипа от температуры. Это крайне важно и было учтено при выборе материалов для механического бокса.

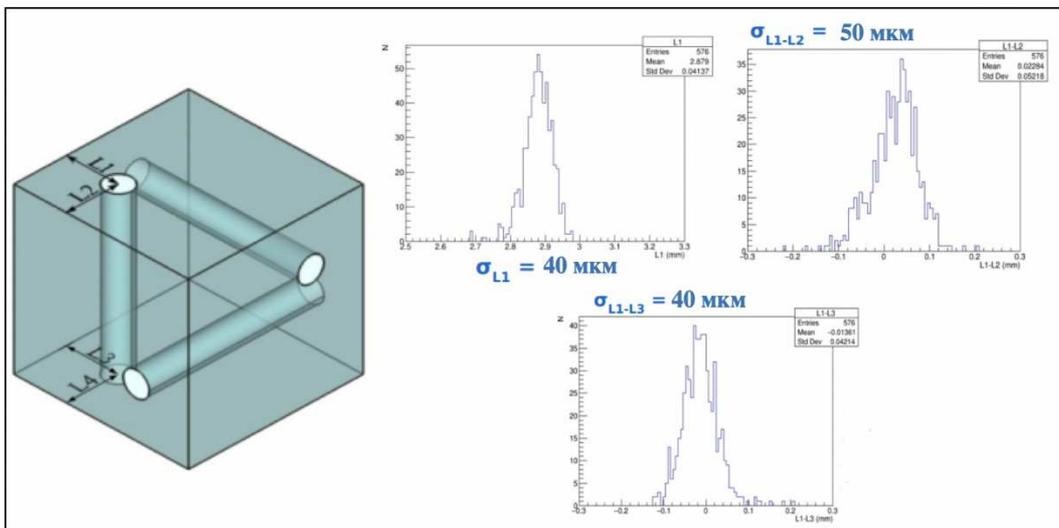


Рис. 5. Точность позиционирования отверстий в кубике

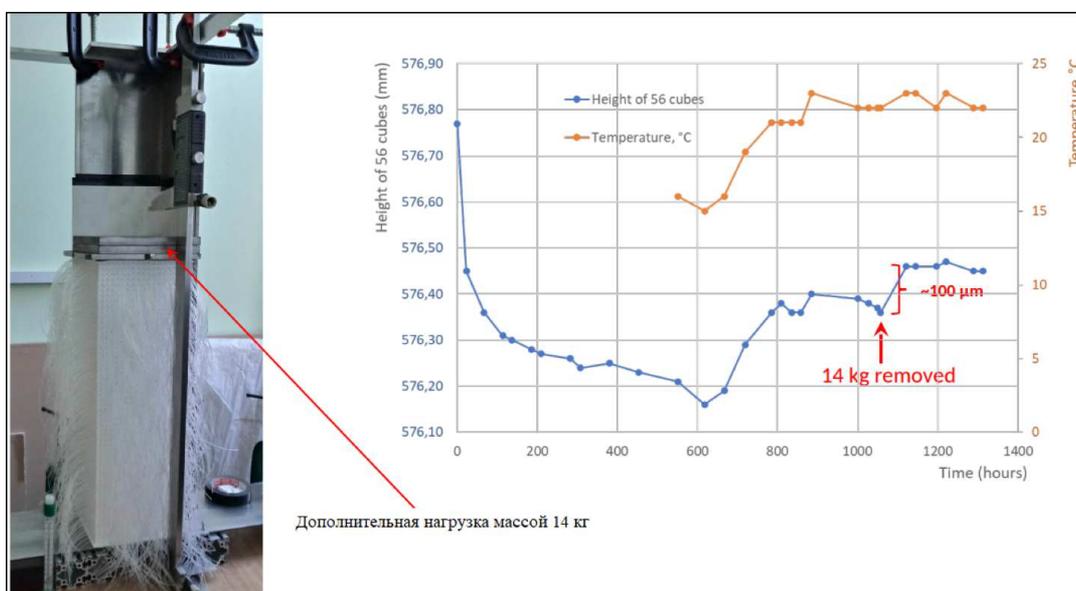


Рис. 6. Установка и результаты измерения вертикального шага между кубиками

2.2. Контроль за сцинтилляционными свойствами кубиков

Сцинтилляционные свойства кубиков находились под постоянным контролем. Для этого кубики случайным образом выбирались из каждой доставленной партии и тестировались на космических мюонах. Одновременно тестировались 8 волокон Kuragau Y11 с тремя кубиками на каждом. Длина волокон 35 см. Один из концов каждого волокна просматривался Hamamatsu MPPC S13081-050C, другой был просто отполирован без использования каких-либо покрытий. Результаты теста показаны на рис. 7. В течение двух лет в тестах не было найдено кубиков с низким значением световы-

хода. Более 2000 кубиков было протестировано, средний световыход составил 37 ф.э./МIP.

2.3. Температурные тесты кубиков и кубики большего размера

В температурных тестах использовалось 6 групп кубиков. Одна группа была опорной, другие нагревались при температуре в 50, 60, 70, 80 и 90°C в течение 8 ч. Результаты представлены на рис. 8. Падение световыхода в данных тестах объясняется химическими свойствами сцинтиллятора. После достижения температуры в 80–90°C запускается необратимая химиче-

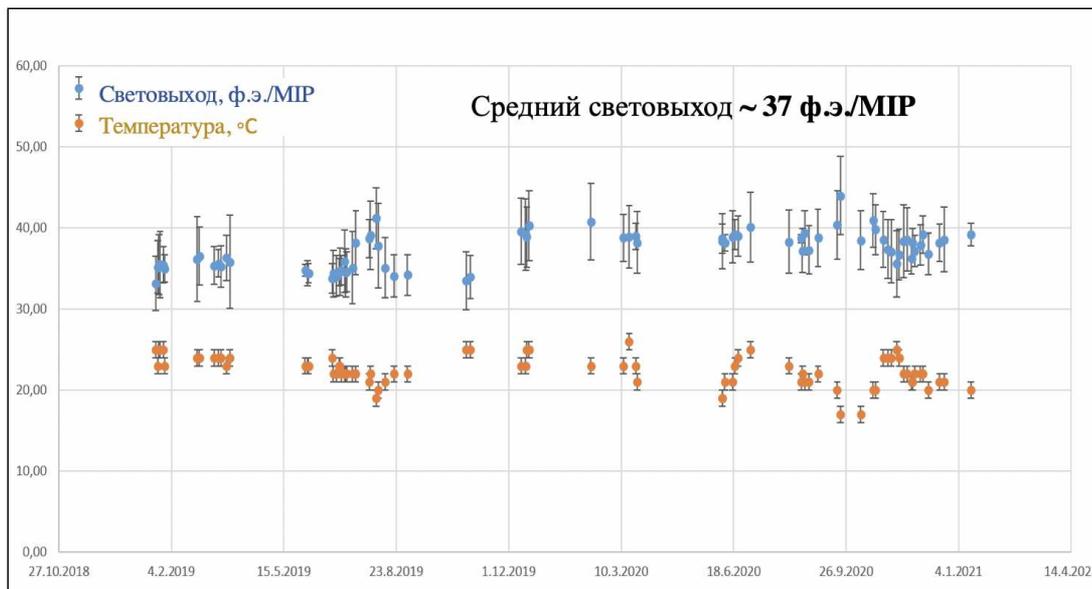


Рис. 7. Результаты тестов по контролю сцинтилляционных свойств кубиков

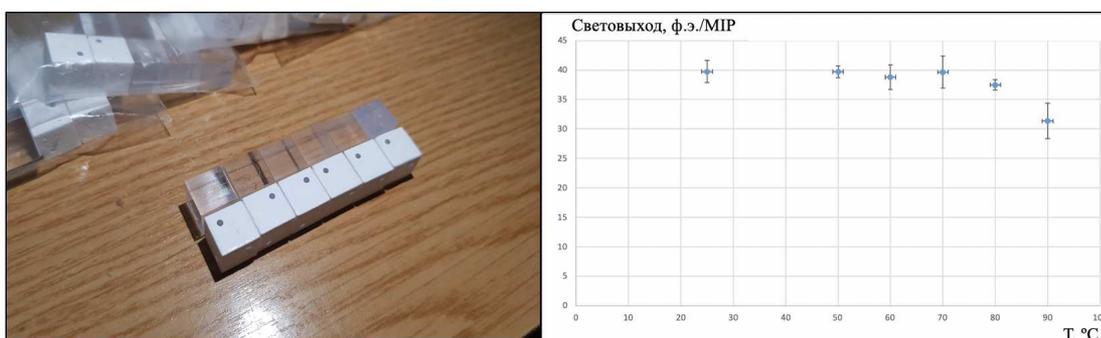


Рис. 8. Фотография и результаты тестирования кубиков нагретых на 50, 60, 70, 80 и 90°C в течение 8 часов

ская реакция, и сцинтилляционные свойства начинают ухудшаться. Это можно заметить даже визуально на кубиках без отражателя. Кубики становятся мутными после подогривания на температуру больше, чем 70°C. Это особенно заметно на кубиках, подогретых до 90°C (крайние правые на рис. 8). В связи с этим представляется опасным нагревание детектора на температуру превышающую 70°C. Поэтому для транспортировки кубиков из России в Японию (в место проведения эксперимента) использовался воздушный, а не водный транспорт.

Большие кубики (рис. 9) с размером грани в 1.5 и 2.0 см могут быть использованы в других детекторах со схожими характеристиками. Например, в ближнем детекторе эксперимента DUNE [7]. Большие кубики для этого теста были сделаны по технологии экструзии (кубики для детектора SuperFGD изготавливались методом литья под давлением). Световыход был получен в тестах с космическими мюонами. Нормализованный на выделенную энергию световыход оказался

таким же, как и световыход с кубиков, применяемых в детекторе SuperFGD.

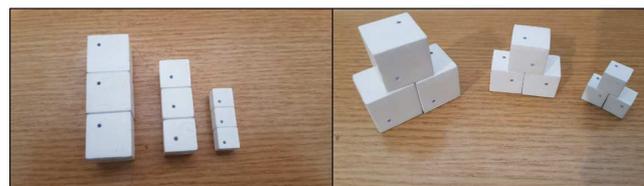


Рис. 9. Фотографии кубиков с размером грани в 2.0, 1.5 и 1.0 см

2.4. Новая технология изготовления кубиков

В настоящее время происходит разработка и исследование новой технологии создания сцинтилляцион-



Рис. 10. Фотографии первого (слева) и второго (справа) прототипов детектора SuperFGD

ных кубиков для новых детекторов со схожей геометрии. Она заключается в изготовлении кубиков с помощью пресс-формы с готовыми отверстиями. Это должно значительно повысить геометрическую точность расположения отверстий в кубике, а также значительно сократить человеческие трудозатраты. По старой технологии все отверстия сверлились вручную, и недостаточная точность позиционирования отверстий была основной причиной отбраковки кубиков. Однако, использование пресс-формы с готовыми отверстиями ставит вопрос о нанесении отражателя на поверхность кубиков. По старой технологии отражатель наносился путем травления химическим агентом поверхностей кубиков до изготовления отверстий. По новой технологии отражатель необходимо будет наносить уже на кубики с готовыми отверстиями. Для этого предлагается использовать специальный материал, имеющий высокий коэффициент температурного сжатия и расширения. С помощью него предполагается закрывать отверстия при травлении поверхности кубиков для избежания попадания отражателя внутрь отверстий. Первые тесты показали перспективность использования данной технологии нанесения отражателя, поэтому сейчас осуществляется разработка тестовой пресс-формы с готовыми отверстиями, а также исследования большой тестовой партии кубиков, отражатель на которые наносился после изготовления отверстий по новой методике.

3. ТЕСТЫ ПРОТОТИПОВ ДЕТЕКТОРА SuperFGD

Тесты двух прототипов детектора SuperFGD (рис. 10) были осуществлены на пучке заряженных частиц ускорителя PS в CERN. Первый прототип был протестирован осенью 2017 г., (результаты представлены в [8, 9]), а второй прототип был протестирован летом 2018 г. (результаты представлены в [10]).

Первый прототип состоял из 125 кубиков и имел размеры $5 \times 5 \times 5$ кубиков. Сигнал считывался с помо-

щью волокон Kuraray Y11 диаметром 1 мм и длиной 1.3 м и с помощью фотосенсоров Hamamatsu MPPC 12571-025C с активной площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Диджитайзер с частотой $\sim 5 \text{ ГГц}$ использовался для считывания двенадцати волокон для измерения основных параметров прототипа. Второй прототип имел размеры $24 \times 8 \times 48$ кубиков. При такой конфигурации прототип состоял из 9216 кубиков и имел 1728 каналов для считывания сигнала. Длины волокон Kuraray Y11 в прототипе равнялись длинам его сторон. А считывающая электроника на основе ASIC CITIROC была максимально приближена к той, что будет использоваться в детекторе SuperFGD. Результаты измерения основных параметров двух прототипов хорошо согласуются между собой (с поправками на разную электронику, длины волокон и т.д.). Типичное значение световыхода с одного кубика на волокно составило 40 ф.э./MIP, два волокна дают значение световыхода 80 ф.э./MIP. Временное разрешение для одного волокна составило 0.95 нс, два волокна обеспечивают временное разрешение 0.65–0.71 нс. Оптический crosstalk через сторону кубика оценивается на уровне 3%.

Крайне интересными являются результаты изучения временного разрешения второго прототипа детектора, подробно представленные в статье [11]. Оказывается, несовершенство электроники детектора SuperFGD (невозможность ее полной синхронизации) позволяет добиться улучшения временного разрешения по N каналам как $\sim 1/\sqrt{N}$. Так усреднение времени для двух кубиков с двумя волокнами в каждом улучшает временное разрешение до 0.47 нс, что значительно лучше, чем собственное временное разрешение электроники в 0.72 нс. Это, в частности, указывает, что при регистрации в детекторе SuperFGD нейтронов можно добиться очень высокого временного разрешения, поскольку они обычно взаимодействуют с несколькими кубиками и производят сигналы большой амплитуды.



Рис. 11. Схема и фотография платформы для сборки детектора SuperFGD

4. СБОРКА И УСТАНОВКА ДЕТЕКТОРА SuperFGD

В настоящее время (октябрь 2022 г.) осуществляется финальная сборка детектора SuperFGD в месте его установки J-PARC (Япония). Для ее осуществления в ОИЯИ была разработана и создана специальная платформа для сборки (рис. 11), она изготовлена для того, чтобы при сборке иметь доступ с любой из сторон детектора.

Сборка детектора SuperFGD будет осуществляться в несколько этапов. На первом этапе будет осуществлена сборка детектора в трех компонентах на лесках в механическом боксе. Далее по одной каждая леска будет заменена на спектросмещающее волокно. После установки всех волокон будет осуществлена установка калибровочной системы и считывающей электроники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все основные элементы детектора (сцинтилляционные кубики, спектросмещающие волокна и механический бокс) уже доставлены в J-PARC, где осуществляется финальная сборка детектора. В процессе изготовления детектора были проведены тесты как отдельных элементов детектора, так и нескольких прототипов, в которых были определены основные параметры будущего детектора SuperFGD. Планируемое время окончания сборки детектора SuperFGD март-апрель 2023 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ грант 19-12-00325. В статью вошли результаты работ, поддержанных Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука», грант «Нейтрино и астрофизика частиц», номер 075-15-2020-778.

- [1] *Fukuda S. et al. (Super-Kamiokande Collaboration). // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 2003. 501. P. 418.*
- [2] *Kudenko Yu. et al. (T2K Collaboration). // Nucl. Instrum. Meth., A 2009. 598. P. 289.*
- [3] *Abe K. et al. (T2K Collaboration). // Nucl. Instrum. Meth., A 694. 2012. P. 211.*
- [4] *Hayato Y. et al. (T2K Collaboration). // Nuclear Physics B. 2005. 143. June. P. 269.*
- [5] *Abe K. et al. Hyper-Kamiokande Design Report // e-Print 1805.04163 [physics.int-det].*
- [6] *Munteanu L. et al. // Phys. Rev. D. 2020. 101, 9. 092003.*
- [7] *Yang G. on behalf of the DUNE collaboration. The APS*

- Division of Particles & Fields (DPF2019) / 3DST - S as a sub-system in DUNE ND. Boston, USA. 29 July - 2 August 2019.*
- [8] *Mineev O. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2019. 923. P. 134.*
- [9] *Mineev O. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2019. 936. P. 136.*
- [10] *Blondel A. et al. // JINST. 2020. No. 15, December. P. 12003.*
- [11] *Alekseev I. et al. SuperFGD prototype time resolution studies / e-Print 2206.10507 [physics.ins-det].*

New highly granular neutrino detector SuperFGD for T2K experiment

S. Fedotov^a, A. Chvirova, A. Dergacheva, D. Fedorava, M. Khabibullin, A. Khotjantsev, Yu. Kudenko,
A. Mefodev, O. Mineev, N. Yershov

*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences
Moscow, 117312, Russia
E-mail: ^afedotov@inr.ru*

SuperFGD, a highly granular scintillator detector, is under final stage of construction to reduce systematic uncertainties in the T2K experiment in order to improve the sensitivity to CP-violation in neutrino oscillations. SuperFGD will be comprised of about 2×10^6 small ($10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$) optically isolated polystyrene based plastic scintillator cubes with three orthogonal holes 1.5 mm in diameter. The readout of scintillating light from each cube is provided by three wavelength shifting fibers inserted into the three holes and coupled to Hamamatsu MPPC. The results of the study of scintillation elements of the SuperFGD detector, the results of charged particle beam tests at CERN of two prototypes of SuperFGD detector and plans for the final assembly of the detector and its installation at the experimental site are presented in this paper.

PACS: 29.40.Mc.

Keywords: neutrino detector, ND280 detector, SuperFGD detector, T2K neutrino experiment, highly granular scintillator detector.
Received 24 October 2022.

Сведения об авторах

1. Федотов Сергей Андреевич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; e-mail: fedotov@inr.ru.
2. Дергачева Анна Евгеньевна — мл. науч. сотрудник; e-mail: dergacheva@inr.ru.
3. Ершов Николай Викторович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 850-42-48, e-mail: yershov@inr.ru.
4. Куденко Юрий Григорьевич — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, профессор; e-mail: kudenko@inr.ru.
5. Мefодьев Александр Владимирович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; e-mail: aleksandr.mefodev@cern.ch.
6. Mineev Олег Викторович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 850-42-47, e-mail: oleg@inr.ru.
7. Федорова Дарья Валерьевна — лаборант; e-mail: fedorova@inr.ru.
8. Хабибуллин Марат Марсович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; (495) 850-42-47, e-mail: marat@inr.ru.
9. Хотянцев Алексей Николаевич — науч. сотрудник; тел.: (495) 850-42-01, e-mail: alex@inr.ru.
10. Чвиrowa Ангелина Александровна — лаборант; e-mail: chvirova@inr.ru.