

БЛИЖНИЙ НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР SuperFGD ЭКСПЕРИМЕНТА T2K

А. Е. Дергачева^{1,*}, *М. А. Колупанова*^{1,2}, *А. В. Мефодьев*¹,
Ю. Г. Куденко^{1,2,3}, *А. Н. Хотянцев*¹, *Д. В. Федорова*^{1,2},
*С. А. Федотов*¹, *А. А. Чвирова*^{1,3}, *А. С. Шварцман*^{1,2}

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Детектор SuperFGD (Super Fine-Grained Detector) — ключевой элемент модернизированного комплекса ближних детекторов ND280 в эксперименте T2K. Модернизация ND280 направлена на снижение систематических ошибок в осцилляционных измерениях с целью повышения чувствительности эксперимента к CP-нечетной фазе δ_{CP} . Статья посвящена текущему статусу детектора SuperFGD, включая результаты первых измерений с мюонными нейтрино на нейтринном пучке T2K в J-PARC.

The SuperFGD (Super Fine-Grained Detector) is a key element of the upgraded near detector complex ND280 of the T2K experiment. The ND280 upgrade is aimed at reducing systematic errors in oscillation measurements in order to increase the sensitivity of the experiment to the CP-violation phase δ_{CP} . The paper is devoted to the current status of the SuperFGD detector, including the results of the first measurements with muon neutrinos in T2K neutrino beam at J-PARC.

PACS: 14.60.Pq; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент T2K (Tokai-to-Kamioka) является первым ускорительным экспериментом с длинной базой, нацеленным на изучение нейтринных осцилляций как одного из возможных источников нарушения комбинированной зарядово-пространственной CP-четности [1]. Последние результаты T2K исключают CP-сохранение ($\delta_{CP} = 0, \pi$) на уровне достоверности более 90 % [2]. Кроме того, T2K ставит перед собой задачу прецизионного измерения параметров осцилляций для атмосферных нейтрино, таких как разность квадратов масс массовых состояний Δm_{32}^2 и угол смешивания между массовыми и активными состояниями нейтрино θ_{23} .

* E-mail: dergacheva@inr.ru

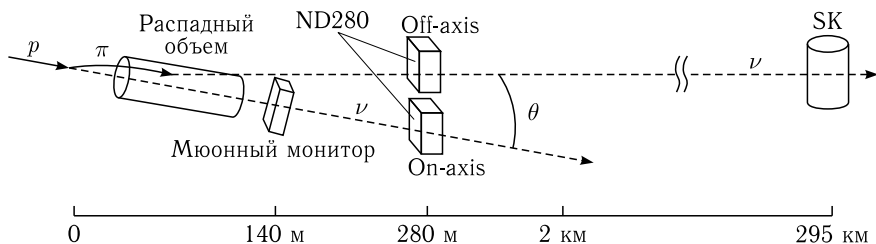


Рис. 1. Схема эксперимента T2K

Основными элементами T2K являются нейтринный канал, комплекс ближних детекторов нейтрино ND280 [3], расположенный на расстоянии 280 м от протонной мишени, и дальний детектор Super-Kamiokande [4], представляющий собой черенковский детектор на основе чистой воды общей массой 50 кт, на расстоянии 295 км от протонной мишени. Общая схема эксперимента T2K показана на рис. 1. В качестве источника нейтрино в T2K используется высокоинтенсивный пучок протонов с энергией 30 ГэВ от протонного синхротрона ускорительного комплекса J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), расположенного на западном побережье острова Хонсю в Японии. Взаимодействие протонов с ядрами графитовой мишени приводит к образованию пионов и каонов, которые фокусируются тремя тороидальными магнитами в направлении распадного объема, где претерпевают распад с образованием мюона и мюонного нейтрино.

В эксперименте T2K была впервые принята концепция внеосевого (off-axis) пучка нейтрино, т. е. отклоненного от оси протонного пучка на угол $\theta = 2,5^\circ$ (см. рис. 1). Выбор такой концепции позволяет получить достаточно чистый пучок мюонных нейтрино в узком диапазоне энергий, а также настроить его на первый осцилляционный максимум с пиковой энергией 600 МэВ.

Комплекс ближних детекторов нейтрино [3], задача которого заключается в измерении спектра нейтрино до предполагаемых осцилляций, включает в себя монитор нейтринного пучка INGRID (Interactive Neutrino GRID), расположенный непосредственно на оси протонного пучка, и внеосевой ND280, расположенный на оси, соединяющей распадный объем и дальний детектор Super-Kamiokande, т. е. под углом $2,5^\circ$ к оси протонного пучка.

В настоящее время проводится обширная программа, направленная на модернизацию ближнего внеосевого детектора ND280 [5], в качестве ожидаемого результата которой предполагается повышение чувствительности эксперимента T2K к CP-нечетной фазе δ_{CP} за счет снижения систематической ошибки осцилляционного анализа в предсказании событий на дальнем детекторе Super-Kamiokande. В рамках программы был

разработан и сконструирован новый 3D сегментированный сцинтилляционный детектор нейтрино SuperFGD (Super Fine-Grained Detector) [6].

ФИЗИЧЕСКАЯ МОТИВАЦИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ND280

До модернизации ND280 состоял из следующих элементов [1, 3]: магнита UA1, детектора нейтральных пионов P0D (π^0 -Detector), электромагнитного калориметра ECal (Electromagnetic Calorimeter), детектора пробега мюонов SMRD (Side Muon Range Detector), а также трековой части, включающей в себя три времяпроекционные камеры TPCs (Time Projection Chambers), чередующиеся с двумя высокосегментированными сцинтилляционными детекторами FGDs (Fine-Grained Detectors).

Идея модернизации, суть которой показана на рис. 2, состояла в замене P0D на новый трекер с детектором SuperFGD в его центральной части, двумя идентичными горизонтальными времяпроекционными камерами HA-TPCs (High-Angle Time Projection Chambers) [7], расположенными над и под SuperFGD, а также шестью сцинтилляционными ToF (Time-of-Flight) модулями в качестве вето-системы [8].

Физическая мотивация модернизированного ND280 подразумевает, прежде всего, повышение эффективности детектирования заряженных частиц от нейтринных взаимодействий за счет возможности их регистрации в полном телесном угле, что было доступно ранее только в дальнем детекторе Super-Kamiokande. Более того, мелкозернистая структура SuperFGD, наряду с достаточно хорошим световыходом ~ 40 ф.э./MIP (Minimum Ionizing Particle) и временным разрешением ~ 1 нс с одного оптоволокну [9], позволит детектировать короткие треки протонов и пионов с импульсом около 300 МэВ/с, остановившихся в объеме SuperFGD. Также за счет 3D изотропной структуры в SuperFGD станет возможным разделение электронов и гамма-квантов и детектирование нейтронов от

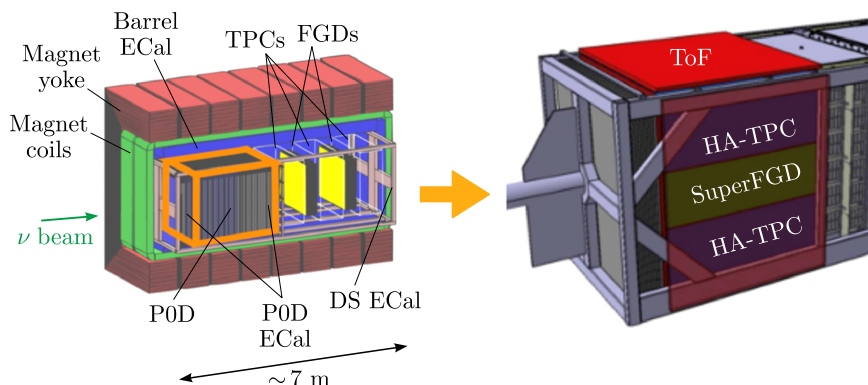


Рис. 2. Идея модернизации ближнего внеосевого детектора ND280 эксперимента T2K

антинейтринных взаимодействий методом времени пролета. В конечном счете, мы ожидаем снизить систематическую ошибку осцилляционного анализа в T2K с текущего уровня в 6–7 % до 3–4 %.

КОНЦЕПЦИЯ ДЕТЕКТОРА SuperFGD

Детектор SuperFGD, выполняющий роль полностью активной нейтринной мишени в модернизированном ND280, состоит из порядка 2 млн оптически изолированных кубических сцинтилляторов размером $1 \times 1 \times 1$ см. Общий размер SuperFGD составляет $182 \times 192 \times 56$ см. Сцинтилляторы были изготовлены на предприятии «Унипласт» (Владимир, Россия) методом литья под давлением. В качестве материала был выбран полистирол со сцинтилляционными добавками: 1,5 % паратерфенила (PTR) и 0,01 % РОРОР [10]. После изготовления поверхность каждого сцинтиллятора протравливалась в химическом веществе с образованием светоотражающего слоя толщиной 50–80 мкм. Также в каждом сцинтилляторе были просверлены три ортогональных сквозных отверстия диаметром 1,5 мм, предназначенные для установки спектро-сдвигающих WLS (Wave-Length Shifting) оптоволокон Kuraray Y-11 (200) S-типа диаметром 1,0 мм вместо калиброванной лески диаметром 1,3 мм, на которой изначально были собраны все 56 слоев детектора SuperFGD по 182×192 сцинтиллятора на слой, как показано на рис. 3.

Так, 3D-считывание сигнала с каждого из 2 млн кубиков SuperFGD обеспечивается посредством $\sim 56\,000$ WLS оптоволокон, один конец каждого из которых просматривается микропиксельным счетчиком



Рис. 3. Детектор SuperFGD, собранный с использованием калиброванной лески в ИЯИ РАН

фотонов Hamamatsu Photonics MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) серии S13360-1325PE.

ПРОТОТИП ДЕТЕКТОРА SuperFGD

Прототип детектора SuperFGD, состоящий из 9216 кубических сцинтилляторов со стороной грани 1 см, собранных в виде массива $24 \times 8 \times 48$ см, был протестирован на пучке заряженных частиц в ЦЕРН [11]. Для считывания сигнала были задействованы 1728 WLS оптоволокон Kuraray Y-11 S-типа диаметром 1,0 мм, которые просматривались тремя типами Hamamatsu Photonics MPPCs: S13360-1325CS, S13081-050CS и S12571-025C.

Для обработки данных с MPPCs использовалась считывающая электроника, изначально разработанная для детектора Baby-MIND (Magnetised Iron Neutrino Detectors) эксперимента WAGASCI [12], на основе интерфейсного ASIC-модуля CITIROC (Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip) [13].

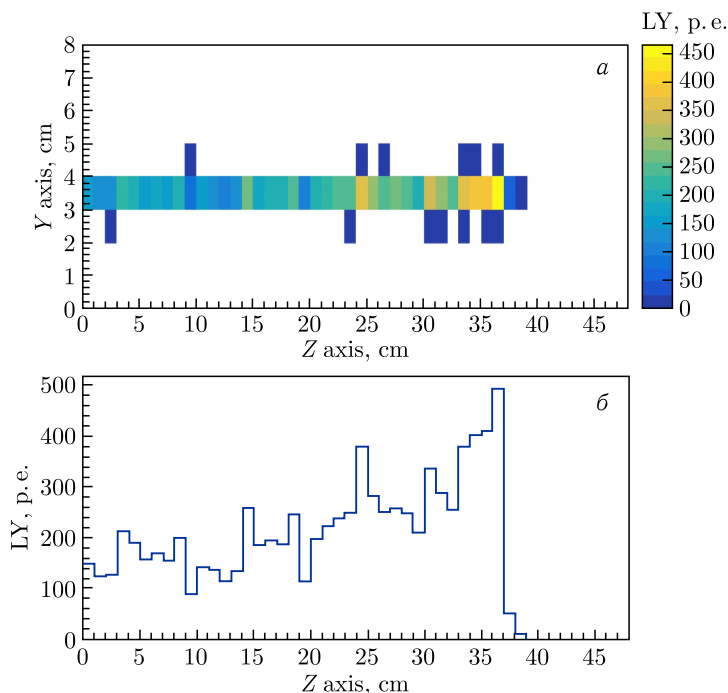


Рис. 4. а) Трек протона с импульсом 0,8 ГэВ/с в магнитном поле 0,2 Тл с остановкой в объеме прототипа SuperFGD ($24 \times 8 \times 48$ см) в плоскости YZ . б) Распределение световыхода LY (Light Yield) вдоль трека протона

В тесте было проведено исследование треков заряженных частиц с импульсами в диапазоне от $\pm 0,4$ до ± 8 ГэВ/с. По результатам теста восстановлены треки протонов с импульсом 0,8 ГэВ/с в магнитном поле 0,2 Тл с остановкой в объеме прототипа SuperFGD. В качестве примера проекция трека протона, остановка которого зарегистрирована в прототипе SuperFGD, на плоскость YZ , наряду с соответствующим ему распределением световыхода LY (Light Yield) вдоль оси Z , показаны на рис. 4.

ПОДГОТОВКА ДЕТЕКТОРА SuperFGD К УСТАНОВКЕ В ND280

Детектор SuperFGD был собран и подготовлен к установке в ND280 на базе J-PARC в здании Neutrino Assembly (NA). В первую очередь, все 56 слоев детектора SuperFGD, предварительно собранные на лесках в ИИЯ РАН (Москва), были последовательно упакованы в механический контейнер, состоящий из шести композитных панелей на основе углеродного волокна, с помощью сборочной платформы, спроектированной в ОИЯИ (Дубна), с последующим вертикальным выравниванием 3D-структуры детектора с использованием порядка 12 000 сварочных стержней длиной 94 см и диаметром 1,2 мм [6]. После чего в SuperFGD, закрепленном в раме mini Baby-Basket, была выполнена замена лесок и сварочных стержней на WLS оптоволокна, а также установлены калибровочная система на основе световодной пластины LGP (Light Guide Plate) со светодиодами LED (Light Emitted Diode) в качестве источника и печатные платы с MPPCs (MPPC64-PCBs) (рис. 5).

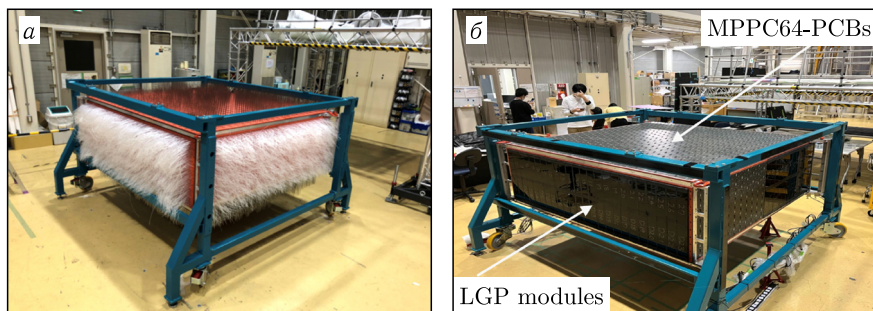


Рис. 5. а) Детектор SuperFGD в виде механического контейнера с 2 млн кубических сцинтилляторов, собранных на лесках и сварочных стержнях, закрепленный в раме mini Baby-Basket. б) Калибровочные модули на основе световодной пластины LGP (Light Guide Plate) и печатные платы с MPPCs (MPPC64-PCBs), интегрированные в конструкцию механического контейнера

СЧИТЫВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА SuperFGD

В SuperFGD используется электроника, разработанная для мюонного магнитного спектрометра Baby-MIND эксперимента WAGASCI [14], которая обеспечивает считывание данных с каждого из 55 888 MPPCs. Электроника SuperFGD распределена по 16 крейтам, каждый из которых содержит 14 интерфейсных плат FEBs (Front End Boards) и одну плату OCB (Optical Concentrator Board).

Архитектура FEB базируется на восьми чипах CITIROC [13], 8-канальном 12-разрядном аналого-цифровом преобразователе (АЦП), предназначенном для оцифровки аналоговых выходных сигналов с чипа CITIROC, а также на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), которая обеспечивает контроль и управление временем и потоком данных выходных сигналов с чипа CITIROC. Синхронизация между электроникой SuperFGD и нейтринным пучком T2K обеспечивается с помощью MCB (Master Clock Board).

Чип CITIROC представляет собой 32-канальную полностью аналоговую интерфейсную ASIC-микросхему и предназначен для регулировки усиления сигнала и для считывания данных с MPPCs. Входной канал CITIROC обеспечивает обработку сигнала с MPPC с помощью двух параллельно подключенных предусилителей переменного напряжения и медленных формирователей SSH (Slow SHaper) по двум сигнальным линиям: с высоким коэффициентом усиления HG (High Gain) и с низким коэффициентом усиления (LG). Кроме того, входной канал CITIROC обеспечивает дополнительную триггерную линию с быстрым формирователем FSH (Fast SHaper), которая позволяет измерять разницу во времени между нарастающим и спадающим фронтами одного из выходных HG- и LG-сигналов с предусилителя, иначе говоря, время превышения над порогом ToT (Time-over-Threshold).

Таким образом, для обработки сигнала с каждого MPPC существуют три различных канала считывания: HG, LG и ToT, которые предоставляют информацию об амплитуде каждого события, зарегистрированного в детекторе SuperFGD.

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА SuperFGD

Калибровка детектора SuperFGD была выполнена с использованием космических мюонов и LED калибровочной системы. Пример трека космического мюона, зарегистрированного в объеме детектора SuperFGD, представлен на рис. 6 в трех проекциях.

Типичный амплитудный спектр, полученный для одного из каналов MPPC, с одноэлектронным разрешением в единицах HG ADC со средним значением коэффициента усиления $(28,72 \pm 0,10)$ HG ADC/ф.э. представлен на рис. 7, а. Для каждого канала были получены аналогичные амплитудные спектры с разными HG-настройками для определения

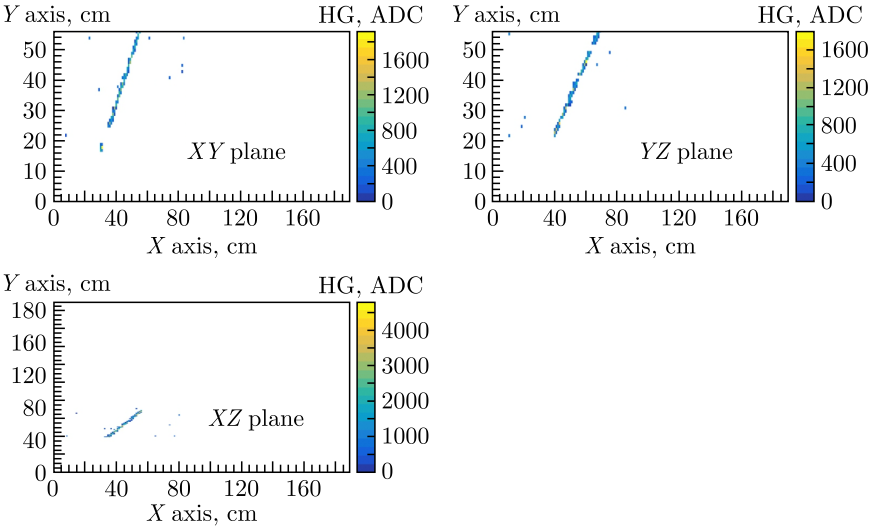


Рис. 6. Трек космического мюона, прошедшего через объем детектора SuperFGD, в трех проекциях в единицах каналов ADC

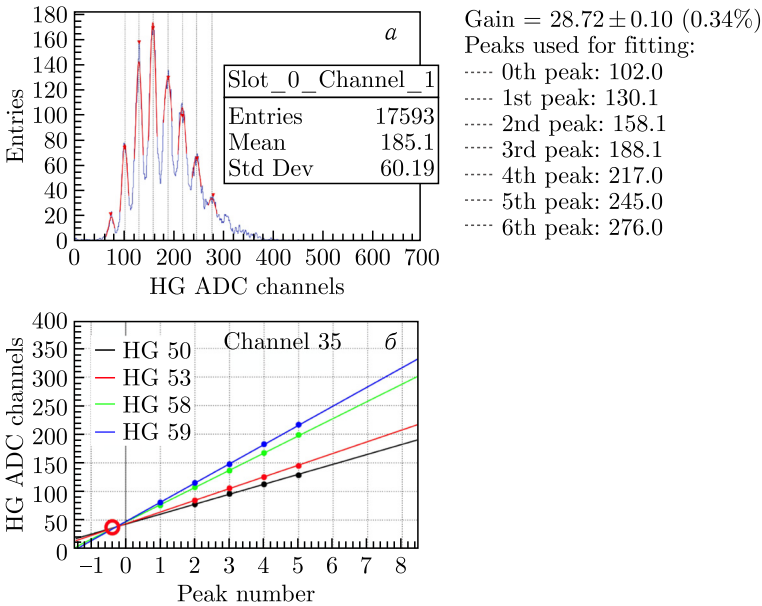


Рис. 7. а) Амплитудный спектр с одноэлектронным разрешением для одного из каналов МРРС. б) Метод нахождения положения пьедестала для одного из каналов МРРС

положения пьедестала. Метод нахождения положения пьедестала для одного из каналов MPPC представлен на рис. 7, б. Так, для каждой HG-настройки была построена линейная зависимость между положениями пиков на амплитудном спектре в единицах каналов ADC и порядковыми номерами этих пиков. Таким образом, точка пересечения прямых, полученных для разных HG-настроек, соответствует позиции пьедестала для выбранного канала MPPC.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С МЮОННЫМИ НЕЙТРИНО НА НЕЙТРИННОМ ПУЧКЕ T2K В J-PARC

В рамках проекта по модернизации ND280 детектор SuperFGD, оборудованный 222 FEBs и 16 OCBs, распределенными по 16 крейтам, был успешно установлен в комплекс ближнего внесевого ND280 на пучке мюонных нейтрино в J-PARC (рис. 8).

На рис.9 показано одно из первых зарегистрированных в объеме детектора SuperFGD событий, которое является кандидатом в мюонное нейтрино. Взаимодействие мюонного нейтрино с веществом детектора SuperFGD на основе углеводорода осуществляется через заряженные токи по реакции квазиупругого рассеяния на ядрах среды с образованием мюона и протона в конечном состоянии. Идентификатором ν_μ -события, произошедшего в объеме SuperFGD, служит детектирование мюона

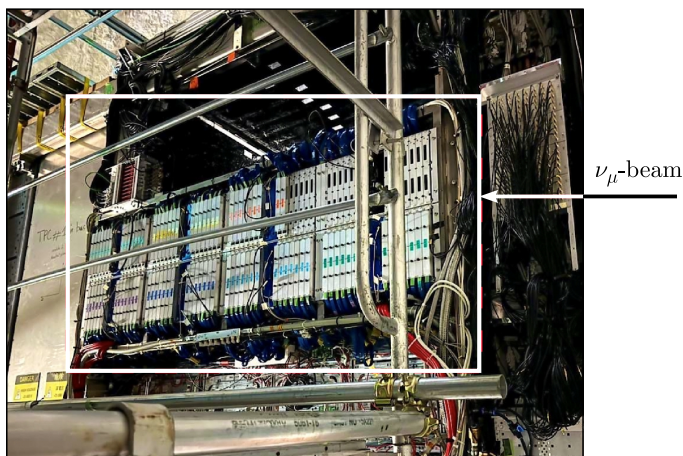


Рис. 8. Детектор SuperFGD, установленный в магнит ND280, на пучке мюонных нейтрино в J-PARC

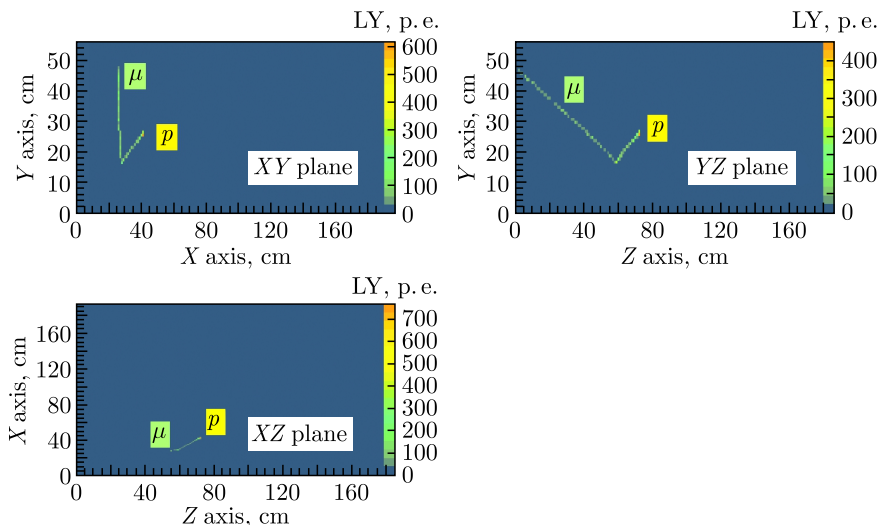


Рис. 9. Событие-кандидат в мюонное нейтрино, зарегистрированное в объеме детектора SuperFGD

и остановившегося протона, треки которых, выходящие из одной точки, изображены на рис. 9 в трех проекциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детектор SuperFGD, состоящий из порядка двух миллионов оптически изолированных кубических сцинтилляторов размером $1 \times 1 \times 1$ см, закрытых в механическом контейнере, оборудованный спектросмещающими WLS волокнами, микропиксельными счетчиками фотонов MPPCs, LED калибровочной системой и считывающей электроникой, успешно установлен на нейтринном канале T2K в составе внеосевого ND280 на базе ускорительного комплекса J-PARC в рамках программы модернизации. Детектор откалиброван с использованием космических мюонов и LED калибровочной системы. Значимым физическим результатом на данном этапе ввода в эксплуатацию детектора SuperFGD является детектирование в нем первых событий с мюонными нейтрино на пучке T2K в J-PARC в конце 2023 г.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00358.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abe K. et al. (T2K Collab.). The T2K Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 659, No. 1. P. 106–135; arXiv:1106.1238 [physics.ins-det].

2. Abe K. *et al.* (T2K Collab.). Constraint on the Matter–Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations // *Nature*. 2020. V. 580. P. 339–344; arXiv:1910.03887.
3. Kudenko Yu. (T2K Collab.). The Near Neutrino Detector for the T2K Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2009. V. 598, No. 1. P. 289–295; arXiv: 0805.0411 [physics.ins-det].
4. Fukuda S. *et al.* (Super-Kamiokande Collab.). The Super-Kamiokande Detector // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2003. V. 501. P. 418–462.
5. Abe K. *et al.* (T2K Collab.). T2K ND280 Upgrade. Technical Design Report. 2019. arXiv:1901.03750.
6. Dergacheva A. *et al.* Current Status of the Novel 3D SuperFGD Detector for the T2K Experiment // *Physics (Switzerland)*. 2023. V. 5, No. 3. P. 690–703.
7. Attié D. *et al.* Performances of a Resistive MicroMegas Module for the Time Projection Chambers of the T2K Near Detector Upgrade // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2020. V. 957. P. 163286; arXiv:1907.07060.
8. Korzenev A. *et al.* A 4π Time-of-Flight Detector for the ND280/T2K Upgrade // *J. Instrum.* 2022. V. 17. P. 01016; arXiv:2109.03078.
9. Mineev O. *et al.* Beam Test Results of 3D Fine-Grained Scintillator Detector Prototype for T2K ND280 Neutrino Active Target // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2019. V. 923. P. 134–138; arXiv:1808.08829.
10. Fedotov S. *et al.* Scintillator Cubes for 3D Neutrino Detector SuperFGD // *J. Phys. Conf. Ser.* 2022. V. 2374. P. 012106; arXiv:2111.07305.
11. Blondel A. *et al.* The SuperFGD Prototype Charged Particle Beam Tests // *J. Instrum.* 2020. V. 15. P. 12003; arXiv:2008.08861.
12. Blondel A. *et al.* Readout Scheme for the Baby-MIND Detector // *PoS*. 2016. V. PhotoDet2015. P. 031.
13. Fleury J. *et al.* Petiroc and Citiroc: Front-End ASICs for SiPM Read-Out and ToF Applications // *J. Instrum.* 2014. V. 9. P. C01049.
14. Antonova M. *et al.* Baby MIND: A Magnetized Segmented Neutrino Detector for the WAGASCI Experiment // *J. Instrum.* 2017. V. 12. P. C07028; arXiv:1705.10406.