

КАЛИБРОВКА НОВОГО БЛИЖНЕГО НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА SuperFGD ЭКСПЕРИМЕНТА T2K

А. А. Чвинова^{1,*}, *М. А. Колупанова*^{1,2},
*А. В. Мефодьев*¹

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

Высокоsegmentированный нейтринный 3D-детектор SuperFGD является центральной частью комплекса ближних нейтринных детекторов ND280 в эксперименте T2K. Это ключевой элемент для поиска нарушения CP-симметрии в лептонном секторе в экспериментах T2K и Hyper-Kamiokande. В данной работе представлены результаты калибровки кремниевых фотоумножителей детектора, а также измерения параметров затухания светового сигнала в горизонтальных спектросмещающих волокнах детектора.

The 3D highly segmented neutrino detector SuperFGD is the central part of the near detector complex of the T2K experiment. It is the key element for the sensitive search for CP violation in the T2K and Hyper-Kamiokande experiments. This paper presents the results of calibration for multi-pixel photon counters (MPPCs) and the measurement of the attenuation parameters of the light signal in horizontal WLS fibers.

PACS: 29.40.Mc; 95.55.Vj

1. ЭКСПЕРИМЕНТ T2K

Эксперимент T2K (рис. 1) — ускорительный эксперимент с длинной базой, предназначенный для исследования нейтринных осцилляций и поиска CP-нарушения в лептонном секторе [1, 2].

Для получения нейтринного пучка используется ускорительный комплекс J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex). Свойства и состав нейтринного пучка измеряются сначала с помощью системы ближних детекторов ND280 [3], расположенной на расстоянии 280 м от

* E-mail: chvirova@inr.ru

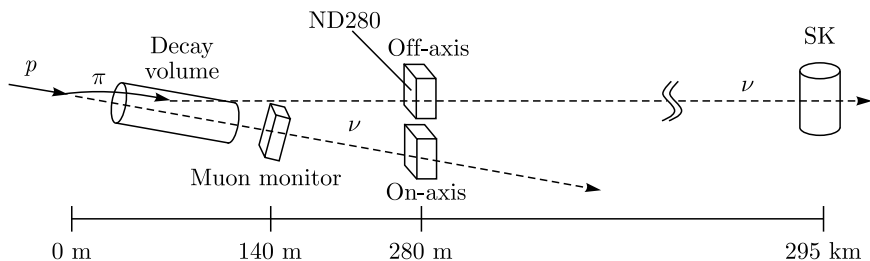


Рис. 1. Схема эксперимента T2K

ускорителя, а затем снова в дальнем детекторе Super-Kamiokande [4], который находится на расстоянии 295 км от ускорителя.

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ND280

До модернизации система ND280 состояла из магнита UA1, в котором располагались два сцинтилляционных детектора FGD (Fine Grained Detector), три времяпроекционные камеры TPC (Time Projection Chamber), детектор нейтральных пионов P0D (Pi-Zero Detector) и др. Такая конструкция имела ряд ограничений: низкую эффективность восстановления треков заряженных частиц, вылетающих под большими углами относительно пучка нейтрино, достаточно высокий порог регистрации протонов и пионов.

В результате модернизации детектор P0D заменен на высокосегментированный сцинтилляционный детектор SuperFGD (Super Fine Grained Detector), две камеры HA-TPC (High Angle Time Projection Chamber) и времяпролетный детектор ToF (Time-of-flight) (рис. 2).

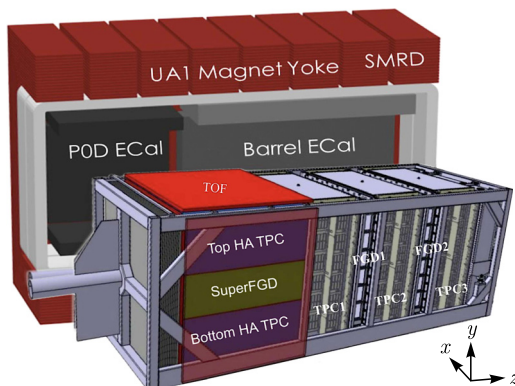


Рис. 2. Система детекторов ND280 после модернизации

Новый детектор SuperFGD обладает высокой сегментацией, низким энергетическим порогом детектирования заряженных частиц и широким динамическим диапазоном. Ожидается, что благодаря высокому временному разрешению SuperFGD будет иметь высокую эффективность регистрации нейтронов методом времени пролета. В результате проведения модернизации систематическая ошибка эксперимента снизится с 6–7 % до 3–4 %.

3. ДЕТЕКТОР SUPERFGD

Детектор SuperFGD (рис. 3) — высокосегментированный детектор, состоящий из ~ 2 млн ($192 \times 56 \times 182$) сцинтилляционных кубиков.

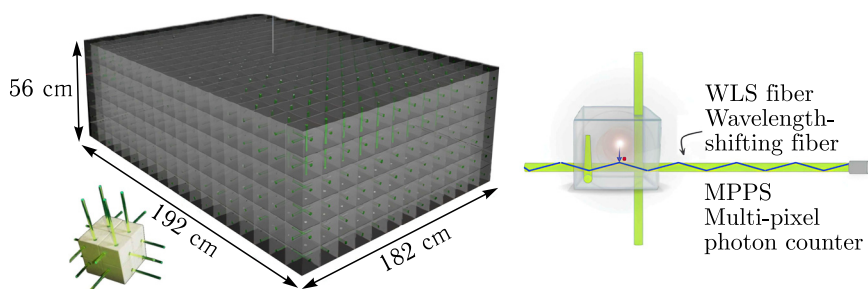


Рис. 3. Дизайн детектора SuperFGD

Сцинтилляторы изготавливаются методом литья под давлением [5] компанией «Унипласт» (Владимир, Россия). Состав: полистирол с добавлением 1,5%-го паратерфенила (РТР) и 0,01%-го 1,4-бис(трихлорметил)-бензола (РОРОР). Объем произведенного сцинтилляционного кубика 1 см^3 , каждый из них покрыт слоем отражателя и имеет три ортогональных отверстия диаметром 1,5 мм под спектросмещающее волокно. Сигнал с кубика снимается с помощью трех ортогональных спектросмещающих волокон Kuraray Y-11 (200) диаметром 1 мм, один из концов каждого волокна просматривается фотосенсором Hamamatsu MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) серии S13360-1325PE. В соответствии со спецификацией Hamamatsu MPPC обладают следующими параметрами:

- размер чувствительной области — $1,3 \times 1,3 \text{ мм}$;
- общее количество пикселей — 2668;
- размер пикселя — 25 мкм;
- напряжение пробоя — $(53 \pm 5) \text{ В}$;
- коэффициент усиления — $7 \cdot 10^5$;
- пик спектральной чувствительности — 450 нм;
- темновой счет — 70 кГц;
- перекрестные помехи (cross-talk) — $\sim 1\%$;
- эффективность регистрации фотонов (PDE) на 450 нм — 25 %.

4. КАЛИБРОВКА КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Для каждого канала детектора SuperFGD, представляющего собой WLS-волокно, соединенное с кремниевым фотоумножителем МРРС, был получен калибровочный спектр. На данном спектре с помощью библиотеки TSpectrum программного комплекса ROOT найдены пики, соответствующие срабатыванию 1, 2, 3 и т. д. ячеек МРРС, и аппроксимированы функцией Гаусса, в результате получены средние значения пиков, т. е. определены их положения. Пример исследуемого спектра приведен на рис. 4.

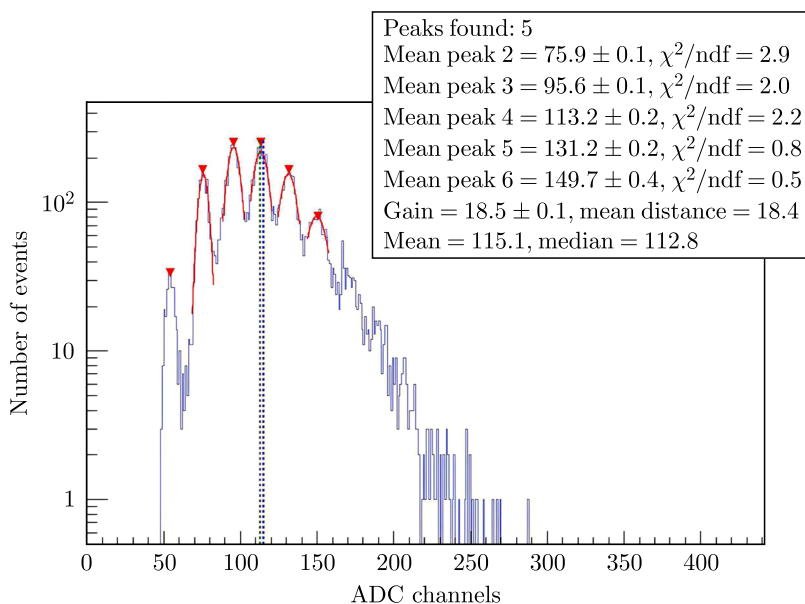


Рис. 4. Пример калибровочного спектра для одного канала

Построен график зависимости положения пика от его номера, при аппроксимации данного графика линейной функцией найден коэффициент пропорциональности. Перекрестные помехи используемых кремниевых фотоумножителей $\sim 1\%$, поэтому разницей между усилением пикселя и усилением данного кремниевого фотоумножителя можно пренебречь. Тогда найденный коэффициент пропорциональности и будет усилением данного кремниевого фотоумножителя в каналах HG ADC (Analog-to-digital converter, или АЦП) (рис. 5). Первый пик не учитывался, так как он может быть отсечен пороговым значением записи сигнала.

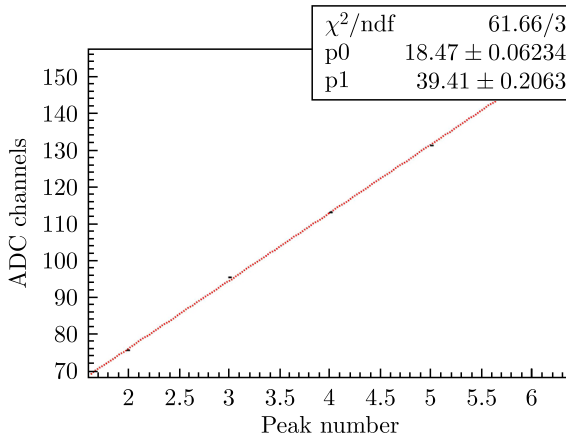


Рис. 5. Зависимость положения пика от его номера

5. ДЛИНА ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА В ВОЛОКНЕ

Сигнал от сцинтилляционной вспышки при распространении в волокне сталкивается с неоднородностями, что приводит к его затуханию и частичному отражению. Для восстановления абсолютного значения амплитуды данного сигнала необходимо учесть перечисленные процессы, рассчитать параметры затухания для волокон и использовать их в последующей обработке данных с детектора.

При поиске длины затухания горизонтальных волокон использовались данные, полученные с детектора SuperFGD, регистрируемые частицы — космические мюоны. Были обрезаны шумовые сигналы и добавлена ориентация на вертикальные треки.

Для каждого кубика, расположенного на волокне, найдено среднее значение светосбора и ошибка его определения с помощью аппроксимации распределения светосбора для этого кубика функцией Гаусса. Далее найденные значения заносились на график, в результате получена кривая затухания сигнала для горизонтальных волокон (рис. 6).

Кривая затухания аппроксимирована с использованием эмпирического уравнения

$$LY = LY_S \exp\left(-\frac{x}{A_S}\right) + LY_L \exp\left(-\frac{x}{A_L}\right) + R \left[LY_S \exp\left(-\frac{2L-x}{A_S}\right) + LY_L \exp\left(-\frac{2L-x}{A_L}\right) \right], \quad (1)$$

где LY_S — короткая компонента затухания, ф. э.; LY_L — длинная компонента затухания, ф. э.; x — расстояние от МРПС до центра кубика, см;

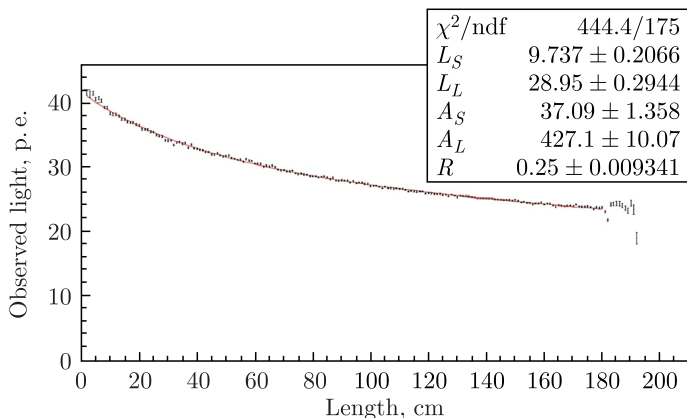


Рис. 6. Затухание сигнала для горизонтальных волокон детектора SuperFGD

L — длина волокна, см; A_S — короткая длина затухания, см; A_L — длинная длина затухания, см; R — коэффициент отражения, %, данный параметр фиксируется в пределах 15–25 % исходя из спецификации.

Параметры аппроксимации приведены на том же рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трехмерный высокосегментированный детектор SuperFGD является центральной частью комплекса ND280 в эксперименте T2K. Детектор состоит из ~ 2 млн сцинтилляционных кубиков с размером грани 1 см. Каждый из этих кубиков покрыт отражателем и имеет три ортогональных отверстия диаметром 1,5 мм для снятия сигнала с помощью спектросмещающего оптического волокна диаметром 1 мм, далее сигнал идет на кремниевый фотоумножитель.

Произведены калибровка кремниевых фотоумножителей детектора SuperFGD, а также поиск параметров затухания светового сигнала в горизонтальных спектросмещающих волокнах детектора.

Учет усиления МРРС и параметров затухания при последующей обработке данных дает возможность получать абсолютное значение светосбора, а также откалибровать энерговыделение в каждом сцинтилляционном кубике.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Ю.Г. Куденко за всестороннюю помощь в проведении данной работы.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-12-00358.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают, что конфликта интересов нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abe K. et al. (T2K Collab.)*. The T2K Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 659, No. 1. P. 106–135.
2. *Nakaya T., Nishikawa K.* Long Baseline Neutrino Oscillation Experiments with Accelerators in Japan: From K2K to T2K // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80, No. 4. P. 344.
3. *Kudenko Y.* The Near Neutrino Detector for the T2K Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598, No. 1. P. 289–295.
4. *Abe K. et al. (T2K Collab.)*. Calibration of the Super-Kamiokande Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 737. P. 253–272.
5. *Fedotov S., Dergacheva A., Filik A., Khabibullin M., Khotjantsev A., Kudenko Y., Mineev O., Yershov N.* Scintillator Cubes for 3D Neutrino Detector SuperFGD // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2374, No. 1. P. 012106.