

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ДЛЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА

© 2023 г. М. В. Данилов<sup>а</sup>, Н. В. Ершов<sup>б</sup>, А. С. Кобякин<sup>а,с</sup>, Ю. Г. Куденко<sup>б,с,е,\*</sup>, В. Ю. Русинов<sup>а</sup>,  
Е. И. Тарковский<sup>д</sup>, Д. В. Федорова<sup>б,с</sup>, С. А. Федотов<sup>б</sup>, А. А. Чвирова<sup>б,е</sup>, Д. О. Чернов<sup>б,е</sup>

<sup>а</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

<sup>б</sup>Институт ядерных исследований РАН  
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

<sup>с</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)  
Россия, 141701, Долгопрудный, Московской обл., Институтский пер., 9

<sup>д</sup>НИИЦ “Курчатовский институт”  
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>е</sup>Московский инженерно-физический институт (НИЯУ МИФИ)  
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

\*e-mail: kudenko@inr.ru

Поступила в редакцию 02.12.2022 г.

После доработки 19.12.2022 г.

Принята к публикации 20.01.2023 г.

Представлены результаты измерений параметров сцинтилляционных вето-детекторов, которые планируется установить в промежуточном водном черенковском детекторе проекта Гипер-Камиоканде. Вето-детекторы представляют собой дисковые сцинтилляторы с клееными спектросмещающими волокнами и компактными фотоприемниками – кремниевыми фотоумножителями. Показано, что эффективность регистрации космических мюонов такими детекторами превышает 99%.

DOI: 10.31857/S0032816223030199, EDN: CVTNNU

ВВЕДЕНИЕ

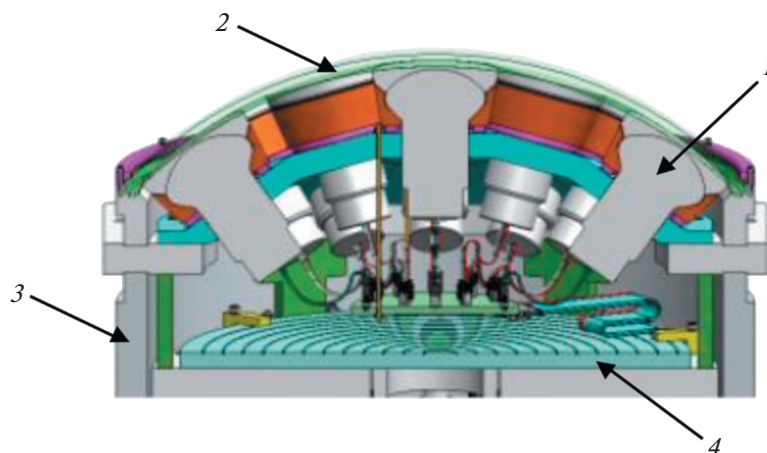
Для повышения чувствительности эксперимента Гипер-Камиоканде [1], основной целью которого является поиск CP-нарушения в нейтринных осцилляциях, планируется создание промежуточного водного черенковского детектора массой ~1 кт, который будет установлен на расстоянии ~1 км от пионорождающей мишени на сильноточном протонном ускорителе J-PARC. Комбинация данных магнитного трекового детектора ND280 (ближнего нейтринного детектора эксперимента T2K [2]), который расположен на расстоянии 280 м от мишени, и промежуточного черенковского детектора позволит существенно снизить систематические погрешности осцилляционных измерений в эксперименте Гипер-Камиоканде.

В промежуточном детекторе в качестве фотоприемников черенковского света будут использоваться модули, имеющие форму полусферы и состоящие из 19-ти фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) диаметром 80 мм. Поскольку промежуточный детектор будет расположен в шахте глубиной всего несколько десятков метров, эффективная

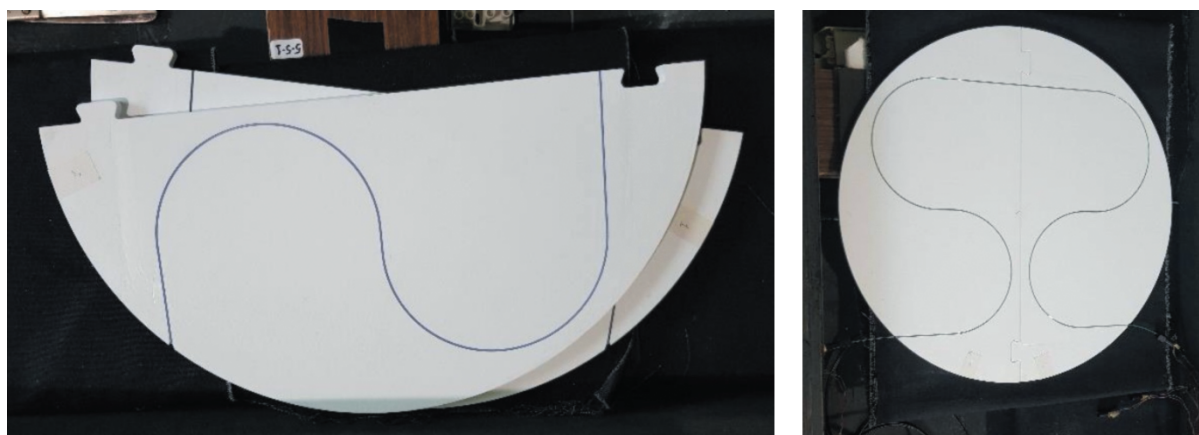
идентификация и подавление фона от космических мюонов являются ключевыми условиями для успешного функционирования этого детектора. Рассматриваются несколько возможных вариантов вето-системы заряженных частиц. Одним из наиболее оптимальных является использование сцинтилляционных детекторов в форме дисков, которые устанавливаются в нижней части модуля (рис. 1). Сцинтилляционный сигнал регистрируется с помощью спектросмещающих волокон, клеенных в сцинтиллятор, и кремниевых фотоумножителей (Si-ФЭУ). Геометрия этих детекторов и результаты тестов представлены в данной статье.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ И  
ОДНОРОДНОСТЬ ИХ СВЕТОВОХОДА

Сцинтилляционные детекторы состоят из двух полукругов, вырезанных из пластин сцинтиллятора на основе изготовленного ООО “Унипласт” (г. Владимир) методом экструзии полистирола с добавкой 1.5% паратерфенила и 0.25% РОРОР [3]. Детектор имеет диаметр 350 мм и толщину 7 мм



**Рис. 1.** Геометрия оптического модуля промежуточного водного черенковского детектора. 1 – ФЭУ, 2 – прозрачный колпак из акрила, 3 – корпус модуля, 4 – сцинтилляционный veto-детектор.



**Рис. 2.** Фотографии двух половин сцинтилляционного детектора (слева) и полного детектора (справа).

(рис. 2). На поверхности детектора путем химического вспенивания сцинтиллятора был образован тонкий (около 0.1 мм) слой с диффузным отражением. Свет с детектора собирался с помощью спектросмещающего волокна Y11(200)MSY диаметром 1 мм и длиной 650 мм, вклеенного в изогнутую (S-образную) канавку шириной 1.2 мм и глубиной 3.5 мм с помощью гелисилоксановой композиции СУРЭЛ-СЛ1 (ТУ 38.303.04.1-21-98) компании ООО СУРЭЛ. Такая форма канавки позволяет получить высокий световыход и высокую эффективность регистрации заряженных частиц в сцинтилляционных счетчиках мюонного детектора (Side Muon Range Detector – SMRD) [4, 5] в эксперименте Т2К. Концы спектросмещающего волокна были обрезаны с помощью алмазного резца, что обеспечивает качество поверхности, близкое к качеству, получаемому полировкой. Свет с одного конца спектросмещающего волокна регистрируется Si-ФЭУ МРРС S13081-

050CS(X1), присоединенного с помощью простого оптического разъема. Другой конец волокна покрыт серебряной краской Silver Shine компании Eptainks, Italy. Два полукруга объединены в полный детектор, как показано на рис. 2 (справа).

Измерения однородности световыхода одной из половин сцинтилляционного детектора проводились с помощью радиоактивного источника  $^{90}\text{Sr}$ . Источник был помещен в цилиндрический коллиматор из дюралья с диаметром отверстия 1 мм и длиной отверстия 6 мм. Внешний диаметр коллиматора равнялся 22 мм, а его высота составляла 60 мм. Испытуемый детектор находился на 6.5 мм ниже выхода коллиматора. На 6.5 мм ниже испытуемого детектора находился триггерный сцинтилляционный счетчик размером  $30 \times 30 \times 5$  мм. Порог триггерного счетчика был близок к 0.5 МэВ. Моделирование с помощью программы GEANT4 показало, что среднее значение световыхода испытуемого детектора к электронам от  $^{90}\text{Sr}$  близко

к среднему значению световыхода для минимально ионизирующих частиц, направленных перпендикулярно поверхности детектора, и слабо меняется при варьировании порога триггерного счетчика в диапазоне 0.2–0.5 МэВ.

Измерения одной половины детектора проводились при температуре 21–22°C и напряжении на Si-ФЭУ, равном 54 В. При этом оптическая связь между ячейками Si-ФЭУ (вероятность срабатывания соседних ячеек из-за фотонов от первичного сигнала) была меньше 5%, и на эту величину делалась поправка при вычислении числа зарегистрированных фотонов. Сигналы Si-ФЭУ усиливались на амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП) LeCroy 2249А с воротами интегрирования 200 нс. Примеры распределений по величине сигналов в двух положениях радиоактивного источника показаны на рис. 3. Когда источник находился близко к спектросмещающему волокну, ширина распределения увеличивалась из-за электронов, проходящих в область канавки, где толщина сцинтиллятора меньше и, следовательно, меньше сигнал. Этот эффект будет менее выражен для мюонов, которые, в отличие от электронов от  $^{90}\text{Sr}$ , попадают на поверхность детектора под разными углами. В дальнейшем в качестве величины световыхода детектора при заданном положении радиоактивного источника бралось среднее значение распределения Гаусса, которое лучше всего аппроксимировало область пика в распределении по величине сигналов. Примеры таких распределений приведены на рис. 3.

Следует отметить, что серебрение конца спектросмещающего волокна и его вклеивание в сцинтиллятор играют очень важную роль в получении достаточного световыхода детектора. Это иллюстрирует рис. 4, где показан световыход детектора в фотоэлектронах (ф.э.) до покрытия серебряной краской конца волокна и до его вклеивания в сцинтиллятор, но уже с покрашенным концом. Покрытие серебряной краской конца волокна приводит к увеличению световыхода детектора примерно в 1.6 раза вдали от фотодетектора и примерно в 1.3 раза вблизи. Вклеивание волокна увеличивает сигналы от детектора примерно в 1.8 раза по всей длине спектросмещающего волокна. Разброс отношений световыходов детектора, измеренных при одинаковых позициях источника  $^{90}\text{Sr}$  до окрашивания конца волокна и до вклеивания волокна в сцинтиллятор, вызван неточностями в позиционировании детектора, которые особенно влияют на световыход вблизи спектросмещающего волокна.

Для изучения однородности световыход детектора измерялся с шагом 10 мм вдоль прямых, параллельных диаметру детектора и отстоящих от

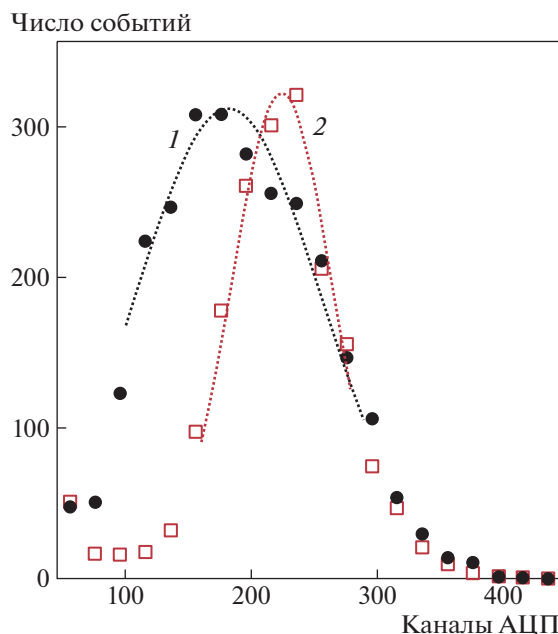
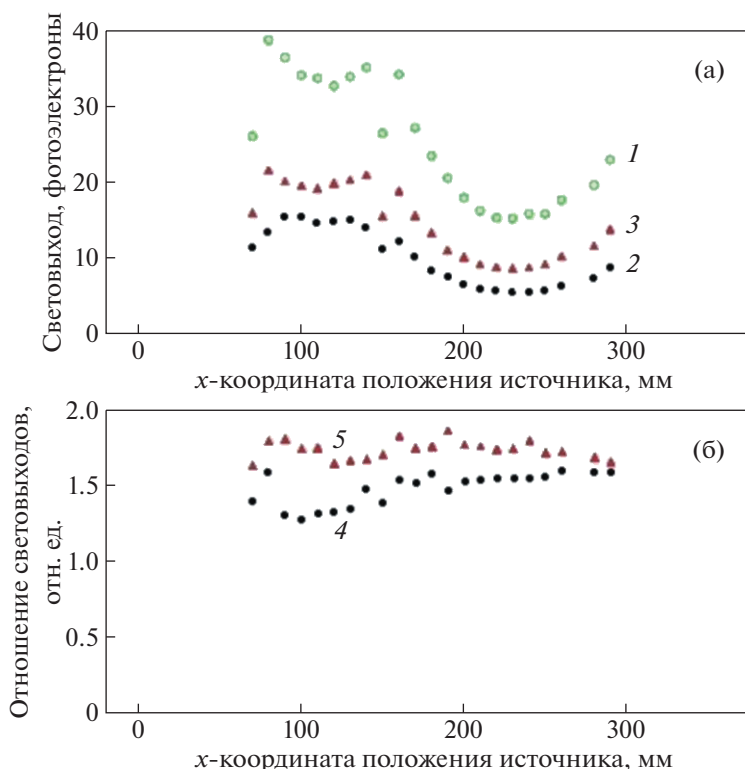


Рис. 3. Точки — распределения по величине сигналов от источника  $^{90}\text{Sr}$  для позиции источника над спектросмещающим волокном (1) и в стороне от спектросмещающего волокна (2). Линии — аппроксимации центральных частей распределений распределением Гаусса.

диаметра на разные расстояния. Положения точек измерения показаны на рис. 5а, а результаты измерений световыхода детектора — на рис. 5б. Величина световыхода сильно зависит от положения источника, поскольку эффективности светосбора вблизи и вдали от спектросмещающего волокна сильно различаются. Однако даже самые малые значения световыхода детектора превышают 10 ф.э. Это позволяет получить, даже в этих точках, эффективность детектора для перпендикулярно входящих в детектор минимально ионизирующих частиц больше 97% при пороге сигнала 4 ф.э., достаточном для уменьшения уровня шума Si-ФЭУ ниже 100 Гц, который требуется для вето-детекторов промежуточного черенковского детектора [1].

Мюоны, для подавления которых предназначен исследуемый детектор, в среднем выделяют энергию, немного большую, чем минимально ионизирующая частица, поскольку часть мюонов имеет малые импульсы и, соответственно, большие ионизационные потери. Кроме того, они пересекают детектор под разными углами, что также увеличивает сигнал. Таким образом, средняя по площади эффективность детектора к космическим мюонам будет превышать 99%.

Несмотря на сильную неоднородность световыхода сцинтилляционного детектора по поверх-



**Рис. 4.** а – световыход детектора: 1 – при разных позициях радиоактивного источника на расстоянии 20 мм от диаметра детектора, 2 – до нанесения серебряной краски на конец спектросмещающего волокна, 3 – до склеивания волокна в сцинтиллятор; б – отношение световыходов: 4 – детектора с нанесенной на конец спектросмещающего волокна серебряной краской и детектора без нанесенной на конец волокна краски, когда в обоих случаях волокно не вклеено в сцинтиллятор, 5 – детектора с нанесенной на конец волокна серебряной краской, вклеенного в сцинтиллятор, и детектора с таким же волокном, но не вклеенным в сцинтиллятор.

ности, предложенная конструкция обеспечивает высокую эффективность к космическим мюонам и является достаточно простой и дешевой в изготовлении.

### ТЕСТ С КОСМИЧЕСКИМИ МЮОНАМИ

Световыход сцинтилляционных детекторов в собранном состоянии был также измерен с космическими мюонами. Геометрия измерений показана на рис. 6. В качестве запускающих (триггерных) счетчиков использовались сцинтилляционные счетчики размером  $10 \times 10$  см. В результате получали усредненное по этой площади значение световыхода. В измерениях с космическими мюонами в качестве фотоприемников были использованы Si-ФЭУ MPPC Hamamatsu S13081-050C. Для положения запускающего счетчика 1 световыход минимально ионизирующей частицы составил 24.8 ф.э., а для положения счетчика 2 – 19.6 ф.э. Эта величина световыхода обеспечивает эффективность регистрации релятивистских заряженных частиц более 99% при пороге регистрации 4 ф.э., как обсуждалось выше.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены параметры сцинтилляционных veto-детекторов для оптических модулей промежуточного детектора нейтрино в проекте Гипер-Камиоканде. Относительно простые и дешевые детекторы с одним спектросмещающим волокном, вклеенным в изогнутую канавку в сцинтилляторе, и фотоприемником Si-ФЭУ имеют световыход для перпендикулярно падающих на детектор минимально ионизирующих частиц от 10 до 40 ф.э. в зависимости от точки прохождения частицы через сцинтиллятор. Полученный световыход должен обеспечить эффективность регистрации космических мюонов таким детектором более 99%, что заведомо удовлетворяет требованиям к оптическим модулям промежуточного черенковского детектора проекта Гипер-Камиоканде.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации “Нейтрино и астрофизика частиц” № 075-15-2020-778.

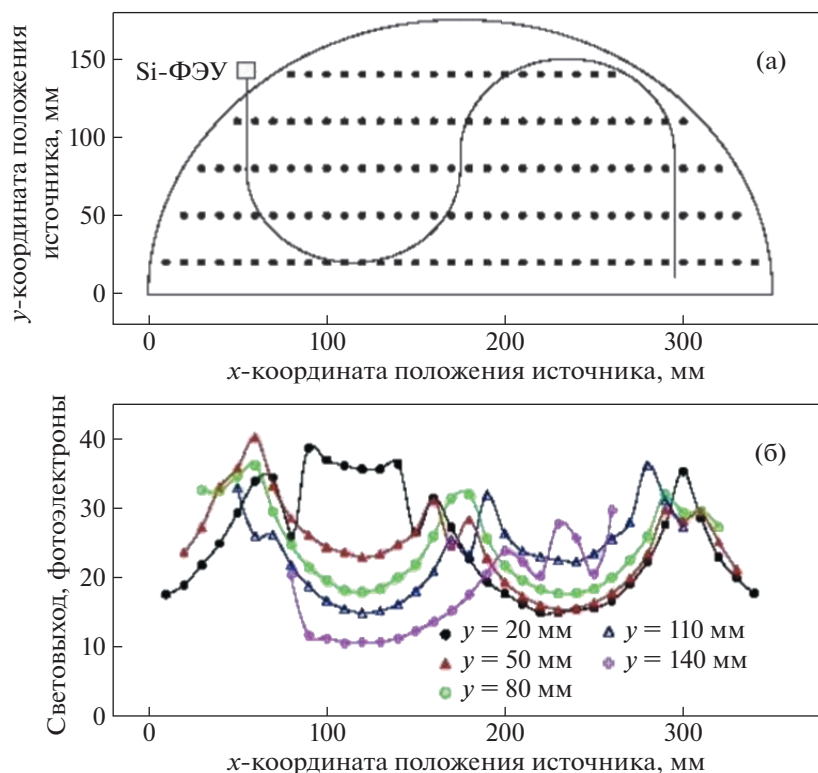


Рис. 5. Расположение точек измерения по поверхности детектора (а) и зависимость световыхода детектора от x- и y-координат положения источника <sup>90</sup>Sr (б).

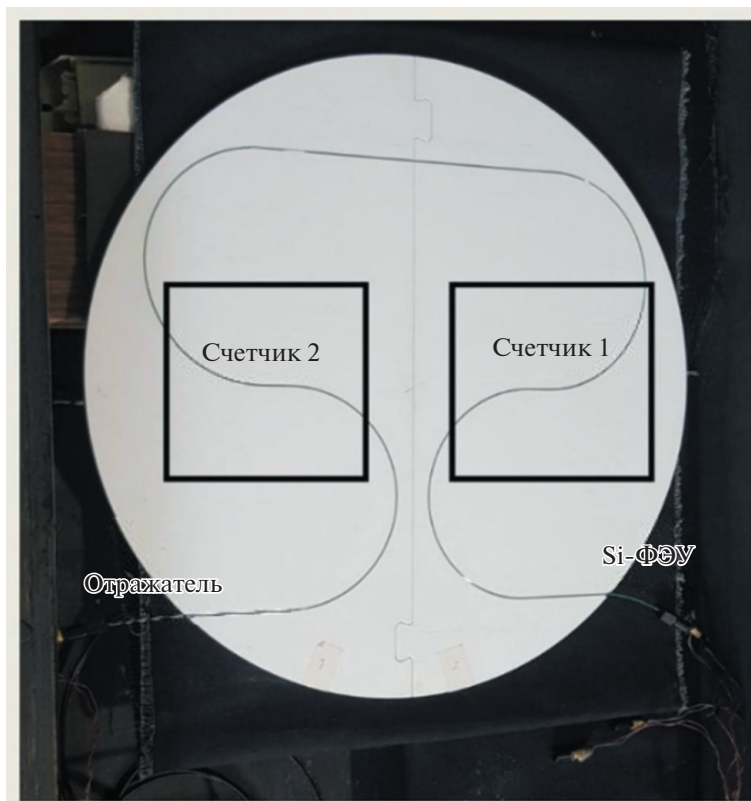


Рис. 6. Расположение запускающих счетчиков 1 и 2 космических мюонов. Размер счетчиков 10 × 10 см.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают (декларируют), что нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hyper-Kamiokande Collaboration. *Abe K. et al.* // Hyper-Kamiokande Design Report. Arxiv:1805.04163.
2. T2K Collaboration. *Abe K. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2011. V. 659. P. 106.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.067>
3. <https://www.eko-tec.ru/product/5162134/>
4. *Mineev O., Afanasjev A., Bondarenko G., Golovin V., Gushchin E., Izmaylov A., Khabibullin M., Khotjantsev A., Kudenko Yu., Kurimoto Y., Kutter T., Lubsandorzhev B., Mayatski V., Musienko Yu., Nakaya T. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2007. V. 577. P. 540.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.04.161>
5. *Aoki S., Barr G., Batkiewicz S., Błocki J., Brinson J.D., Coleman W., Dabrowska A., Danko I., Dziewiecki M., Ellison B., Golyshkin L., Gould R., Hara T., Haremza J., Hartfiel B. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2013. V. 698. P. 135.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.10.001>