

LXXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДРО–2022:  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНО–ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

**К тестированию пороговых SiO<sub>2</sub>–аэрогелевых  
черенковских детекторов на космических лучах**

А. М. Лапик,<sup>1,\*</sup> Л. З. Джилавян,<sup>1,†</sup> В. П. Лисин,<sup>1</sup> А. Л. Полонский,<sup>1</sup> А. В. Русаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт ядерных исследований Российской академии наук  
Россия, 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а*

(Поступила в редакцию 01.11.2022; после доработки 20.11.2022; принята к публикации 21.11.2022)

Описан вариант тестирования пороговых SiO<sub>2</sub>–аэрогелевых черенковских детекторов с помощью космического излучения. Реализация требует минимального количества дополнительной электроники и не предполагает массивных слоёв поглотителя (свинец и др.). Метод позволяет точно определять эффективность исследуемых детекторов и изучать работу детекторов в различных энергетических интервалах для релятивистских частиц.

PACS: 29.40.Ка. УДК: 539.126.

Ключевые слова: пороговые аэрогелевые черенковские детекторы, пластиковые сцинтилляционные детекторы, разделение пионов и каонов, мезоны в космических лучах.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2310102](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2310102)

## ВВЕДЕНИЕ

Черенковские пороговые детекторы (ЧПД) широко используются для разделения релятивистских частиц по скоростям, например для выделения заряженных каонов [1] или антипротонов [2] на фоне большого потока заряженных пионов.

ЧПД позволяют выделять сам факт того, что скорость проходящей через них заряженной частицы выше пороговой, начиная с которой в них появляется сигнал, вызванный излучением Вавилова–Черенкова. ЧПД на основе SiO<sub>2</sub>–аэрогелей с заданными значениями показателя преломления удобны во многих случаях для разделения релятивистских частиц по их скоростям (см., например, [3–5] за счёт возможности выбора значения показателя преломления).

При создании ЧПД нужно их тестирование с целью выбора геометрических параметров, коэффициента отражения поверхностей, настройки аппаратуры и определения эффективности. Получаемые на ускорителях пучки электронов, позитронов, пионов, каонов и иных заряженных частиц разных энергий наиболее адекватны этой задаче (например, [5, 6]). Однако вместо пучков ускорителей часто можно использовать доступные везде и без «накладных расходов» космические лучи (например, [5]).

В настоящей работе предложен и осуществлён сравнительно простой и удобный в эксплуатации метод для наладки подобных детекторов и решения основной части задачи тестирования ЧПД —

измерения эффективности регистрации интересующих частиц с помощью ЧПД.

## 1. ТРАДИЦИОННОЕ И ПРЕДЛАГАЕМОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ЧПД НА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

При измерении эффективности ЧПД необходимо выделять треки космических мюонов с энергиями выше порога этого детектора. Для этого можно применять фильтры-поглотители, подавляющие пролет частиц с более низкими энергиями (например, [5]). Но такие фильтры имеют значительную толщину (например, 10–30 см свинца) и могут порождать разброс энергии частицы (распределение Ландау), а также дополнительные ливни. Кроме того, с такими поглотителями усложняются изменения относительного расположения отдельных детекторов в установке.

При тестировании ЧПД на основе SiO<sub>2</sub>–аэрогеля для выделения нужных нам треков здесь используется дополнительный аэрогелевый детектор малого объема — селектор. Селектор располагается между пластиковыми детекторами годоскопа. Подобные сочетания пластиковых годоскопов и черенковских детекторов применялись ранее в исследовании космических лучей [7]. В нашем случае если показатель преломления селектора совпадает с показателем преломления исследуемого ЧПД, то выделение треков с энергией частиц выше необходимого порога будет обеспечено автоматически. Малые размеры селектора обеспечивают хороший светосбор и позволяют с высокой эффективностью выбирать нужные треки даже при использовании фотоэлектронного умножителя с относительно невысокой

\* E-mail: [lapik@inr.ru](mailto:lapik@inr.ru)

† E-mail: [dzhil@inr.ru](mailto:dzhil@inr.ru)

квантовой эффективностью (например, ФЭУ–143 с квантовой эффективностью  $\approx 10\%$ ).

## 2. УСТАНОВКА. АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЙ. РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема установки показана на рис. 1. Основой конструкции установки был выбран обычный лабораторный стол. На поверхности стола размещен исследуемый детектор  $\epsilon$  (площадь его горизонтальной поверхности  $S \cong 25 \times 30 \text{ см}^2$ , высота  $h \cong 8.5 \text{ см}$ ), покрытый сверху (для подавления многочастичных ливней космического излучения) пластиковым сцинтилляционным детектором  $\delta$ , перекрывающим весь диапазон используемых углов регистрации космических мюонов. Для исследования работы в различных частях ЧПД можно перемещать оба детектора по поверхности стола.

Под крышкой стола установлен основной годоскопический элемент установки: два пластиковых сцинтиллятора  $g$  и  $e$ , расстояние между центрами которых ( $L \cong 13 \text{ см}$ ) и их геометрические размеры ( $S \cong 5 \times 4 \text{ см}^2$ ,  $h \cong 3.5 \text{ см}$ ) определяют телесный угол выделения потока заряженных космических частиц. В нашем случае для размещения сцинтилляторов с фотоумножителями был использован механический конструктив блоков электроники «Вектор». Годоскоп устанавливали на уровне пола на подставку с регулируемой высотой и с возможностью горизонтального перемещения. Поскольку общий вес годоскопа  $\approx 1.6 \text{ кг}$ , а тяжелую защиту мы не использовали, перемещение не было затруднительным.

Триггером записи информации мы выбрали превышение порога амплитудой сигналов с самого нижнего пластикового детектора  $e$ , просматриваемого фотоумножителем ФЭУ–143. Амплитудное распределение импульсов с этого детектора приведено на рис. 1, справа. Для отсека относительно большого потока фоновых импульсов малой амплитуды был использован высокий порог дискриминатора (около половины от положения пика, соответствующего энерговыделению нормально падающих на детектор релятивистских мюонов  $\approx 7 \text{ МэВ}$ ).

Амплитудное распределение импульсов со второго пластикового детектора  $g$ , также просматриваемого ФЭУ–143, приведено рис. 1, справа. Это распределение не имеет низкоэнергетического «хвоста», так как триггером установки является нижний пластиковый детектор. При условии срабатывания нижнего детектора в детекторе  $g$  возможны следующие случаи: отсутствие сигнала (частица прошла мимо  $g$ -пластика); сигнал в области пика энерговыделения (частица прошла полную толщину пластика); сигнал выше области пика (образование дельта-электронов, электрон-позитронных пар и др.); малые амплитуды (краевые эффекты  $g$ -пластика). Также возможны «резанные» отсчеты, когда строб (триггер вырабатывался  $e$ -детектором) не полностью накрывает импульс сцинтилляции

в  $g$ -детекторе. Относительно низкая загрузка детекторов космическими лучами позволяет считать совпадением попадание импульсов во временной интервал общего строба длительностью 120 нс. Поскольку в обоих детекторах мы измеряем амплитуду энерговыделения, допустим отбор событий, в которых эта величина находится в узком интервале значений вблизи минимальной ионизации релятивистских заряженных частиц, например в интервале полной ширины на полувысоте.

Следует отметить, что такое жесткое выделение уменьшает поток выделяемых частиц, который будет использоваться для тестирования аэрогелевого ЧПД, но не влияет на точность измерения его эффективности, а просто увеличивает время набора необходимого числа событий.

Использование дополнительного пластикового детектора  $a$  позволяет как выделять область для более детального исследования работы тестируемого ЧПД  $\epsilon$ , так и проверять перекрытие этим детектором всего телесного угла, что важно при определении эффективности.

На рис. 2, справа представлен счет космических мюонов в зависимости от расстояния центра детектора  $a$  до оси симметрии установки. Из распределения числа отсчетов на рис. 2 следует, что в данной геометрии диаметр «пятна» на исследуемом детекторе около 20 см при выбранном размере аэрогеля в  $\epsilon$ -детекторе ( $\approx 25 \text{ см} \times 30 \text{ см}$ ). Таким образом, выбрана конфигурация, обеспечивающая максимально допустимый телесный угол и минимальное время для набора данного числа треков. Слева на рис. 2 показаны распределения амплитуд  $a$ -детектора в центральном и смещенном положениях (сплошная и штриховая линии соответственно). Интегралы от этих распределений между каналами 4000 и 8000 дают соответствующие точки на правой части рис. 2.

На рис. 1 для селектора треков выше порога аэрогеля  $d$  ( $S \cong 5.5 \times 5.5 \text{ см}^2$ ,  $h \cong 6 \text{ см}$ , размещен по середине между  $g$ - и  $e$ -детекторами) представлено амплитудное распределение импульсов. Пик вблизи нулевой амплитуды связан с флуктуациями пьедестала QDC и с электромагнитными шумами. Поскольку триггером является пластиковый детектор  $e$ , то частицы с энергиями ниже порога для этого аэрогеля также попадают в этот пик.

Мы использовали простой метод для оценки вклада одноэлектронного шума в обоих черенковских детекторах — измерение со случайно распределенным по времени стробом. Строб длительностью 120 нс от внешнего генератора использовался вместо триггера установки. Результат такого измерения показан на врезке на рис. 1 для детектора  $d$ . Соотношение числа событий вблизи нуля и под «ступенькой» позволяют оценить вклад одноэлектронных шумовых импульсов. Такой метод позволяет без дополнительных устройств (например в [5]) контролировать шумы ФЭУ черенковских детекторов (годоскопа и исследуемого детектора) в течение всего времени эксплуатации установки.

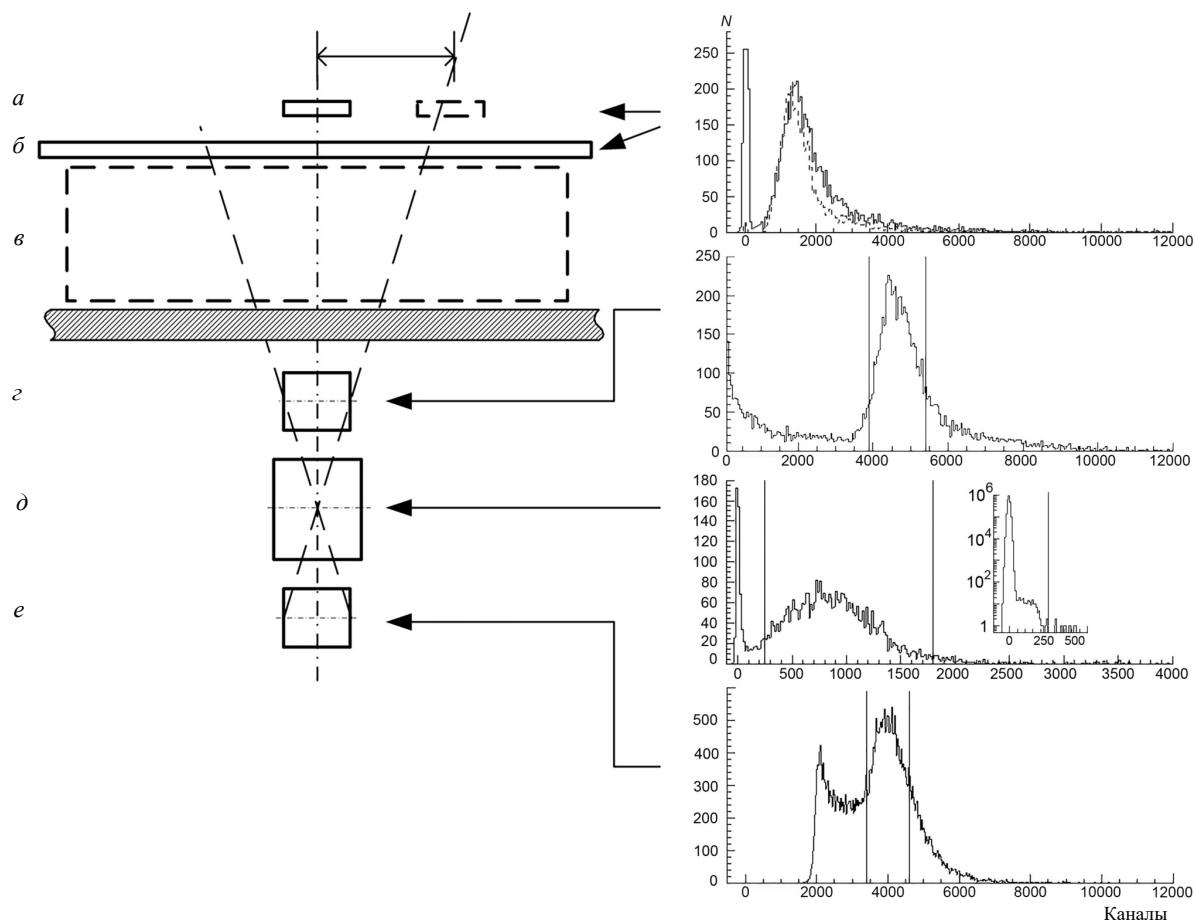


Рис. 1. Схема применения годоскопа заряженных космических частиц (в основном мюонов) и амплитудные распределения импульсов отдельных детекторов: *a*, *b*, *e* — пластиковые сцинтилляционные детекторы; *c*, *d* — тестируемый и малый (селектор) пороговые черенковские детекторы соответственно

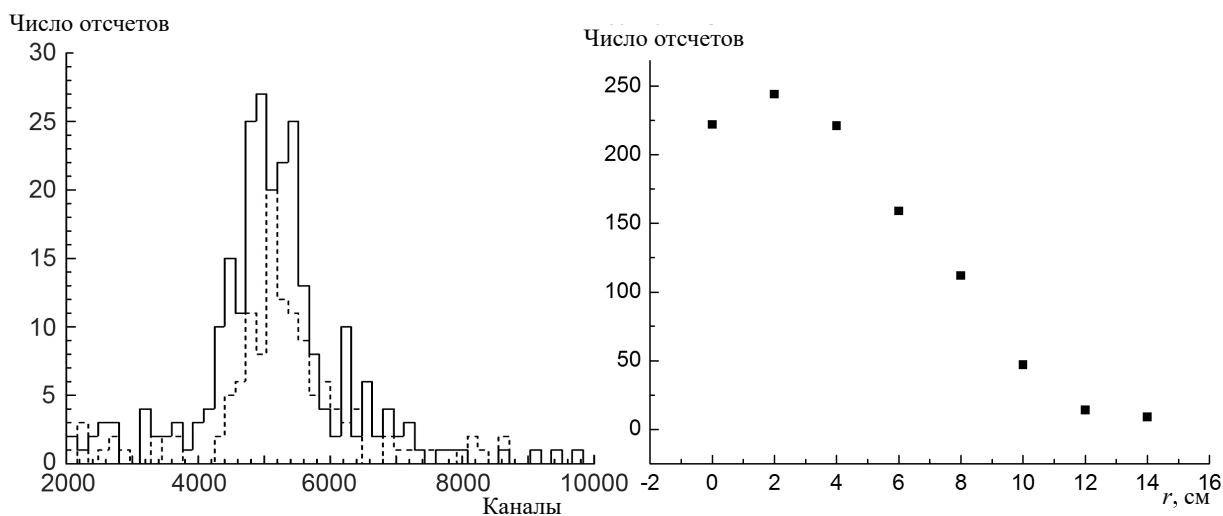


Рис. 2. Угловая зависимость числа выделяемых годоскопом треков от положения пластика-детектора *a*

Но для надежности определения эффективности мы выбирали порог выше амплитуды одноэлектронных событий, то есть выше края указанной ступень-

ки. Такой выбор уменьшает скорость набора полезных событий, но позволяет более точно определять эффективность исследуемого ЧПД.

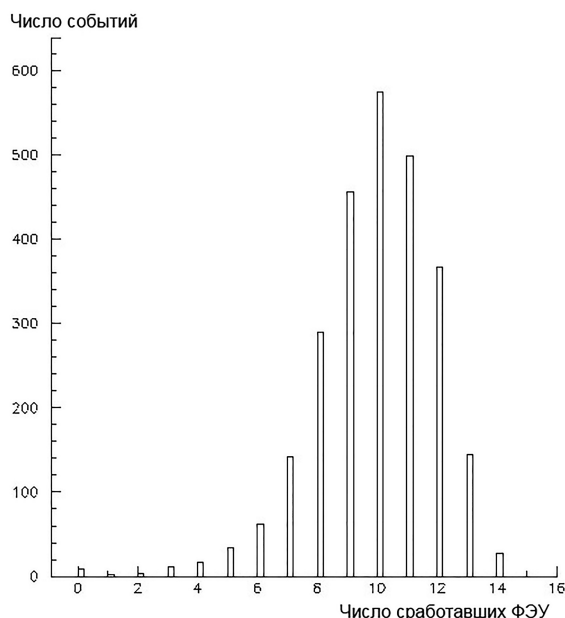


Рис. 3. Пример распределения множественности срабатывания фотоумножителей исследуемого черенковского детектора

Система сбора данных была реализована в двух вариантах. В одном случае с традиционным многоканальным QDC, выполненным в стандарте САМАС, требуется дополнительный интегральный дискриминатор для выработки триггерного сигнала установки. В другом случае при работе с оцифровщиками формы сигнала (например, CAEN DT5742B и DT5730S) триггерный сигнал вырабатывается самим блоком и никаких дополнительных модулей не требуется. Временное разрешение совпадений изменяется от 120 нс в первом случае до нескольких наносекунд во втором случае.

Для примера на рис. 3 приведен полученный результат использования описанной установки для исследования работы черенковского порогового детектора. Приведено измеренное распределение числа сработавших ФЭУ R329-02 в составе сборок Hamamatsu H6410 из 14 установленных. Эффективность ЧПД зависит от ряда факторов: его размеров, установленных порогов, принятого минимального числа сработавших ФЭУ и др. Результаты измерений показывают, что при указанных выше условиях в проверяемом ЧПД и селекторе (здесь в проверяемом ЧПД акт регистрации — срабатывание более трёх ФЭУ) эффективность ЧПД составила  $\geq 99\%$ . Точность измерения эффективности ЧПД зависит от набранной статистики. Согласно нашим оценкам наилучшая точность измерения эффективности ЧПД с помощью данного селектора — около  $10^{-4}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и использована оригинальная методика тестирования на космических лучах порогового черенковского детектора на базе SiO<sub>2</sub>-аэрогеля. Сама методика, по-видимому, пригодна для тестирования многих пороговых черенковских детекторов. Определённый интерес представляет использование в качестве малого черенковского детектора (селектора) набора SiO<sub>2</sub>-аэрогелевых детекторов с различными показателями преломления, что аналогично использованию наборов чередующихся слоёв свинца и пластиковых сцинтилляционных детекторов [5].

Методика реализуется с минимальной дополнительной электроникой и позволяет прецизионно определять эффективность исследуемых детекторов, а также изучать работу детекторов в различных энергетических интервалах релятивистских частиц.

- [1] Alef S., Bauer P., Bayadilov D. et al. // *Eur. Phys. J. A* **56**, 104 (2020).
- [2] Chamberlain O., Segre E., Wiegand C., Ypsilantis T. // *Phys. Rev.* **100**, 947 (1955).
- [3] Данилюк А.Ф., Кононов С.А., Кравченко Е.А., Онушин А.П. // *УФН* **185**. С. 540. (2015). (Danilyuk A. F., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Onuchin A. P. // *Phys. Usp.* **58**, 503–511 (2015))
- [4] Барняков А.Ю. Измерение основных параметров системы черенковских счётчиков АШИФ детектора КЕДР. Дисс... канд. физ.-мат. наук. Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН. Новосибирск. 2015. 107 стр.
- [5] Бузыкаев А.Р. Разработка черенковских счётчиков АШИФ для детектора КЕДР. Дисс... канд. физ.-мат. наук. Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН. Новосибирск. 2017. 86 стр.
- [6] Джиславаня Л.З. Кучер Н.П., Лупенко Г.В. // *Кр. сообщения по физике ФИАН СССР*. 1980. № 2. С. 15.
- [7] Курносова Л.В., Матачун А.Т., Разоренов Л.А., Фрадкин М.И. // *Труды ФИАН СССР*. 1980. **122**. С. 59.

## Testing of Threshold SiO<sub>2</sub>-Aerogel Cherenkov Detectors Using Cosmic Rays

A.M. Lapik, L.Z. Dzhilavyan<sup>a</sup>, V.P. Lisin, A.L. Polonski, A.V. Rusakov

*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>[dzhil@inr.ru](mailto:dzhil@inr.ru)*

A variant of testing threshold SiO<sub>2</sub> aerogel Cherenkov detectors using cosmic radiation is described. The implementation requires a minimum amount of additional electronics and does not involve massive absorber layers (lead, etc.). The method makes it possible to accurately determine efficiency of detectors under study and to study operation of detectors in different energy ranges for relativistic particles.

PACS: 29.40.Ka.

*Keywords:* threshold airgel Cherenkov detectors, plastic scintillation detectors, separation of pions and kaons, mesons in cosmic rays.

*Received 01 November 2022.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 1. Pp. 10–13.

### Сведения об авторах

1. Лапик Александр Михайлович — научн. сотр.; тел.: (499) 135-33-37, e-mail: [lapik@inr.ru](mailto:lapik@inr.ru).
2. Джилавын Леонид Завернович — доктор физ.-мат. наук, вед. научн. сотр.; тел.: (499) 198-07-61, e-mail: [dzhil@inr.ru](mailto:dzhil@inr.ru), [nucleus009@mail.ru](mailto:nucleus009@mail.ru).
3. Лисин Валерий Павлович — канд. физ.-мат. наук, вед. научн. сотр.; e-mail: [lisin@inr.ru](mailto:lisin@inr.ru).
4. Полонский Андрей Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.; e-mail: [polonski@inr.ru](mailto:polonski@inr.ru).
5. Русаков Артур Владимирович — научн. сотр.; тел.: (499) 135-33-37, e-mail: [rusakov@inr.ru](mailto:rusakov@inr.ru).