

УДК 539.126

К ТЕСТИРОВАНИЮ ПОРОГОВЫХ SiO_2 АЭРОГЕЛЕВЫХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ДЕТЕКТОРОВ НА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ (МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЯ)

© 2024 г. А. М. Лапик¹, Л. З. Джилавян^{1,*}, В. П. Лисин¹, А. Л. Полонский¹, В. Н. Пономарев¹,
Н. В. Руднев¹, А. В. Русаков¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук, Москва, Россия

* e-mail: dzhil@inr.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

Описан вариант тестирования пороговых SiO_2 аэрогелевых черенковских детекторов с помощью космического излучения. Его реализация требует минимальное количество дополнительной электроники и не предполагает массивных слоев поглотителя (например, свинца). Метод позволяет непосредственно учитывать порог при определении эффективности исследуемых детекторов и изучать их работу в различных энергетических интервалах для релятивистских заряженных частиц. Получено хорошее согласие результатов проведенного моделирования и измерений.

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

DOI: 10.31857/S0367676524080059, EDN: ORMNUH

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_2 аэрогелей с заданными значениями показателя преломления удобны во многих случаях для разделения релятивистских частиц по их скоростям (см., например, [3–5]) за счет возможности выбора значения показателя преломления.

При создании ЧПД необходимо их тестирование с целью выбора геометрии, 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 (см., например, [5, 6]). Однако вместо пучков ускорителей часто можно использовать доступные везде и без “накладных расходов” космические лучи (см., например, [5]).

Работа посвящена предложенному и осуществленному сравнительно простому и удобному в эксплуатации методу для наладки подобных детекторов и решения основной части задачи тестирования ЧПД — измерения эффективности регистрации интересующих частиц с помощью ЧПД.

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 (см., 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_2 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 квантовой эффективностью (например, ФЭУ-143 с квантовой эффективностью ≈ 10 %).

УСТАНОВКА. АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЙ. РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема установки показана на рис. 1. Основной конструкции установки был выбран обычный лабораторный стол. На поверхности стола размещен

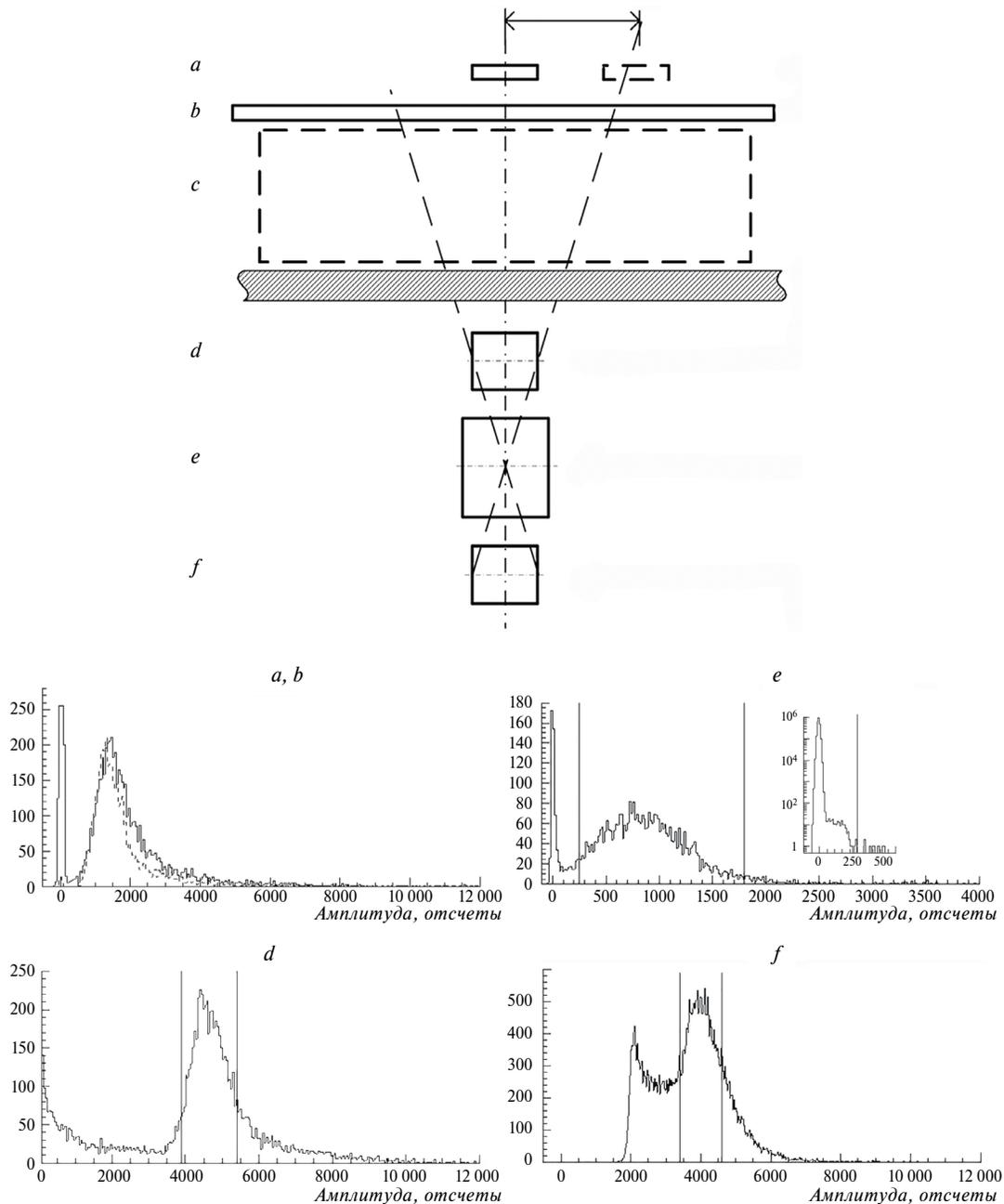


Рис. 1. Схема применения годоскопа заряженных космических частиц (в основном мюонов) и амплитудные распределения импульсов отдельных детекторов. *a, b, d, f* — пластиковые сцинтилляционные детекторы; *c, e* — тестируемый и малый (селектор) пороговые черенковские детекторы соответственно.

исследуемый детектор c (площадь его горизонтальной поверхности $S \cong 25 \times 30$ см, высота $h \cong 8.5$ см), покрытый сверху (для подавления многочастичных ливней космического излучения) пластиковым сцинтилляционным детектором b , 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 d и f , расстояние между центрами которых ($L \cong 13$ см) и их геометрические размеры ($S \cong 5 \times 4$ см, $h \cong 3.5$ 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 ≈ 1.6 кг, а тяжелую защиту мы не использовали, перемещение годоскопа по горизонтали не было затруднительным.

Триггером записи информации мы выбрали превышение порога амплитудой сигналов с самого нижнего пластикового детектора f , просматриваемого фотоумножителем ФЭУ-143. Амплитудное распределение импульсов с этого детектора приведено на рис. 1. 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 ≈ 7 МэВ).

Амплитудное распределение импульсов со второго пластикового детектора d , также просматриваемого ФЭУ-143, приведено на рис. 1. Это распределение не имеет низкоэнергетического “хвоста”, так как триггером установки является нижний пластиковый детектор. При условии срабатывания нижнего детектора в детекторе d возможны следующие случаи: отсутствие сигнала (частица прошла мимо d -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 d -пластика). Так же возможны “резанные” отсчеты, когда строб (триггер вырабатывался f -детектором) не полностью накрывает импульс сцинтилляции в d -детекторе. Относительно низкая нагрузка 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 (c), так и проверять перекрытие этим детектором всего телесного угла, что важно при определении эффективности.

Число отсчетов от космических лучей всех энергий, прошедших через пластик a и пластики годоскопа, измерялось в зависимости от расстояния до центра детектора. Диаметр активной области на исследуемом детекторе оказался равным около 20 см, так что при выбранном размере аэрогеля в c -детекторе (≈ 25 см \times 30 см) все частицы должны пройти через исследуемый детектор. Зависимость числа отсчетов от полярного угла θ приведена на рис. 2. Такое угловое распределение удобно тем, что оно не зависит от расстояния годоскопа до черенковского детектора c . Таким образом, выбрана конфигурация, обеспечивающая максимально допустимый телесный угол и уменьшающая время для набора необходимого числа треков.

Моделирование эксперимента было выполнено с помощью пакета GEANT. Потoki космических мюонов генерировались по данным [8]. В моделировании были учтены: показатель преломления аэрогеля, коэффициенты отражения от стенок черенковского детектора и селектора, поглощение и рэлеевское рассеяние в аэрогеле, фоточувствительность ФЭУ и другие величины.

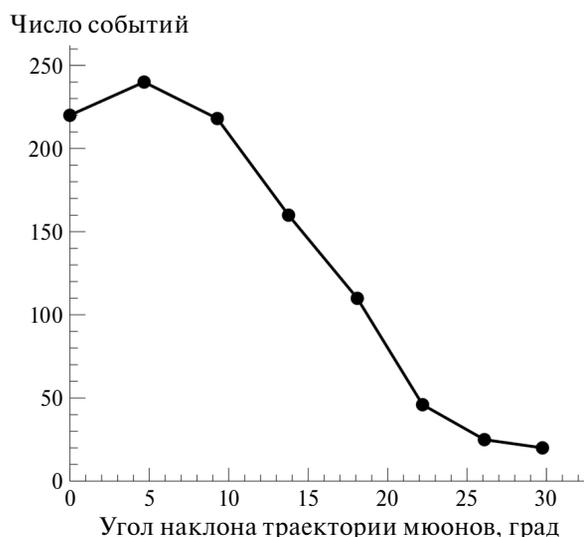


Рис. 2. Угловая зависимость числа выделяемых годоскопом треков от положения пластика-детектора a .

На рис. 1 для селектора треков выше порога аэрогеля e ($S \cong 5.5 \times 5.5$ см, $h \cong 6$ см, размещен по середине между d - и f -детекторами) представлено амплитудное распределение импульсов. Пик вблизи нулевой амплитуды связан с флуктуациями пьедестала QDC и с электромагнитными шумами. Поскольку триггером является пластиковый детектор f , 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 e . Соотношение числа событий вблизи нуля и под “ступенькой” позволяют оценить вклад одноэлектронных шумовых импульсов. Такой метод позволяет без дополнительных устройств (см., например, [5]) контролировать шумы ФЭУ черенковских детекторов (годоскопа и исследуемого детектора) в течение всего времени эксплуатации установки. Но для надежности определения эффективности мы выбирали порог отбора в детекторе e выше амплитуды одноэлектронных событий, то есть выше края указанной ступеньки. Такой выбор уменьшает скорость набора полезных событий (в нашем случае среднее число фотоэлектронов было около пяти), но позволяет более точно определять эффективность исследуемого ЧПД. При использовании порога отбора ниже положения ступеньки вероятность ложного отбора, например случайного совпадения с одноэлектронным шумовым импульсом ФЭУ, можно оценить из сравнения площадей на приведенной врезке.

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 нс во втором случае. Однако нужно учитывать разброс времен пролета черенковских фотонов в детекторах большого объема.

В качестве 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. С практической точки зрения, наиболее удобной величиной,

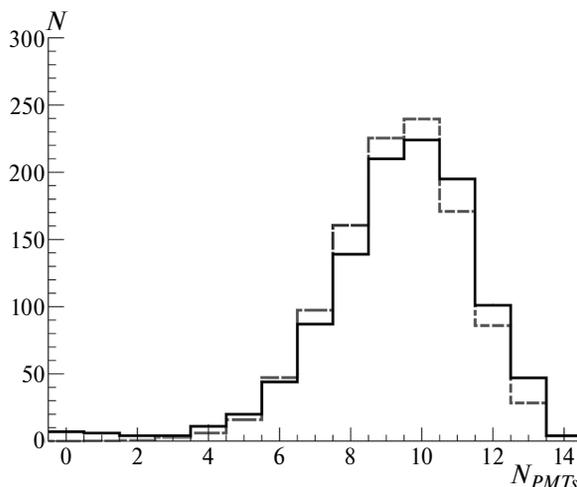


Рис. 3. Пример распределения множественности срабатывания фотоумножителей исследуемого черенковского детектора. Сплошная кривая — измерения, штриховая — моделирование.

характеризующей детектирование черенковского излучения, является число сработавших ФЭУ. В нашем случае среднее число сработавших ФЭУ было равно 9.5. Если считать, что акт регистрации — это срабатывание трех или более ФЭУ, то эффективность ЧПД составляет (0.992 ± 0.003) при наборе статистики за одну неделю. Систематическая ошибка определения эффективности может возникать из-за различия свойств гигроскопичного аэрогеля в селекторе и в ЧПД, что в принципе могло бы быть из-за разгерметизации упаковки аэрогеля. Однако герметизация аэрогеля — несложная задача, и в нашем случае нет оснований считать, что свойства аэрогеля в ЧПД и в селекторе существенно отличаются друг от друга, поскольку они были изготовлены, хранились и эксплуатировались в течение короткого отрезка времени практически в одних и тех же условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и апробирована на космических лучах оригинальная методика тестирования порогового черенковского детектора на базе SiO₂ аэрогеля. Сама методика, по-видимому, пригодна для тестирования многих пороговых черенковских детекторов. Определенный интерес представляет использование в качестве малого черенковского детектора (селектора) набора SiO₂ аэрогелевых детекторов с различными показателями преломления, что аналогично использованию наборов чередующихся слоев 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 заряженных частиц.

Полученное хорошее согласие моделирования и эксперимента дает основание для проведения дальнейших исследований и модернизации черенковского детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alef S., Bauer P., Bayadilov D. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56. Art. No. 104.
2. *Chamberlain O., Segre E., Wiegand C., Ypsilantis T.* // Phys. Rev. 1955. V. 100. P. 947.
3. *Данилюк А.Ф., Кононов С.А., Кравченко Е.А., Онучин А.П.* // УФН. 2015. Т. 185. С. 540; *Danilyuk A.F., Kononov S.A., Kravchenko E.A., Onuchin A.P.* // Phys. Usp. 2015. V. 58. P. 503.
4. *Барняков А.Ю.* Измерение основных параметров системы черенковских счетчиков АШИФ детектора КЕДР. Дисс... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: Ин-тут. яд. физ. им. Г.И. Будкера СО РАН. 2015. 107 с.
5. *Бузыкаев А.Р.* Разработка черенковских счетчиков АШИФ для детектора КЕДР. Дисс... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: Ин-тут. яд. физ. им. Г.И. Будкера СО РАН. 2017. 86 с.
6. *Джилавян Л.З., Кучер Н.П., Лупенко Г.В.* // Кратк. сообщ. 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. Т. 122. С. 59.
8. *Workman R.L., Burkert V.D., Crede V. et al. (Particle Data Group)* // PTEP. 2022. V. 2022. No. 8. Art. No. 083C01.

On testing of threshold SiO₂ aerogel Cherenkov detectors on cosmic rays (simulation and measurements)

A. M. Lapik¹, L. Z. Dzhilavyan^{1,*}, V. P. Lisin¹, A. L. Polonski¹, V. N. Ponomarev¹,
N. V. Rudnev¹, A. V. Rusakov¹

¹ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312, Russia
*e-mail: dzhil@inr.ru

A variant of testing threshold SiO₂ aerogel Cherenkov detectors using cosmic radiation is described. The implementation requires a minimum amount of additional electronics and does not involve massive absorber layers (e. g., lead). 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 charged particles. Good agreement between the results of the simulation and measurements was obtained.

Keywords: threshold aerogel Cherenkov detectors, plastic scintillation detectors, pion-kaon separation, cosmic ray mesons, simulation