

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СРЕД С СИЛЬНЫМ РАССЕЯНИЕМ

А. Л. Крапива^{1,*}, *Д. Н. Свирида*^{1,2}

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Сцинтилляционные детекторы на основе сильно рассеивающих сред являются новым решением для позиционно-чувствительных детекторов частиц без сегментации чувствительного объема. Одним из вариантов такой среды могут служить гранулы твердого сцинтиллятора с характерным размером порядка нескольких миллиметров. В работе описаны конструкция прототипа такого детектора, процесс его калибровки, алгоритм реконструкции координаты, а также приведены результаты моделирования.

Scintillation detectors based on strong scattering media are a new solution for spatial-sensitive particle detectors without segmentation of the sensitive volume. One of the variants of such a medium can be few-millimeter-sized granules of a solid scintillator. The paper describes the design of the detector prototype, the process of its calibration, the algorithm of coordinate reconstruction, and the results of modeling.

PACS: 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Органические сцинтилляторы широко используются в различных экспериментах в качестве легко масштабируемых калориметров. Массив сегментированных сцинтилляционных счетчиков позволяет добиться пространственной чувствительности, что используется в многочисленных нейтринных экспериментах. Коллаборация LiquidO [1] предложила новый подход, основанный на рассеянии сцинтилляционного света путем добавления специального парафина в используемый жидкий сцинтиллятор (LAr). Сообщалось о многообещающих результатах моделирования и успешной проверке концепции. Однако создание полноценного прототипа и его изучение лишь предстоит. Основная идея этой концепции заключается в локализации излученного света вблизи точки испускания за счет его оптического рассеяния в той же среде, в которой происходит сцинтилляция. Предлагаемый нами подход состоит в использовании твердого сцинтиллятора в новом факторе.

* E-mail: krapiva.al@phystech.edu

1. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ СРЕДА

В качестве среды взяты гранулы из твердого органического сцинтиллятора на основе полистирола, предоставленные группой из ИФВЭ (Протвино) [2]. Одиночная гранула имеет форму диска диаметром около 3 мм и толщиной 1 мм. В нынешних условиях производства гранулы подвержены сплавлению между собой, что создает кластеры, прозрачность и геометрия которых нарушена. Для экспериментов были отобраны одиночные и двойные гранулы, так как они обеспечивают наиболее плотное заполнение объема и максимальную оптическую прозрачность поверхностей гранул. Предпочтение твердого сцинтиллятора перед жидким аналогом было сделано ввиду того, что такая среда не горюча, не разлагается, стабильна и не требует строгого соблюдения особых температурных и прочих условий. Эти преимущества особенно существенны для детекторов реакторных нейтрино, которые предполагается устанавливать на действующих АЭС.

2. КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА

Чувствительный объем детектора (рис. 1) размером $88 \times 88 \times 111$ мм заполняется отобранными гранулами. Для сбора света чувствительный объем пронизан параллельно расположенными спектросмещающими волокнами Kuraray Y-11, которые образуют массив 4×4 с шагом 15 мм. Каждое волокно с одного из концов сопряжено с SiPM Hamamatsu S13360-1350PE, с другого же покрыто черной краской во избежание отражения света. SiPM прецизионно размещены на специальных платах,

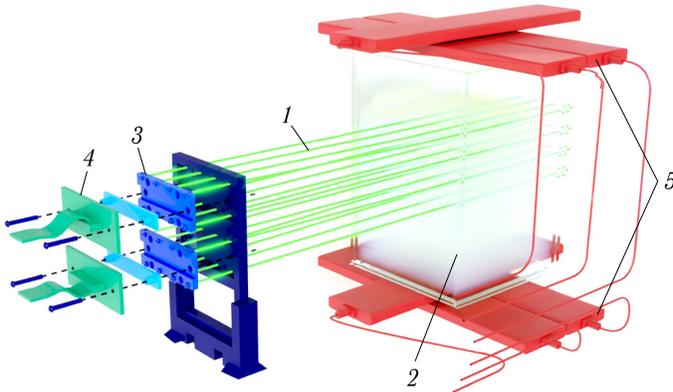


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 — спектросмещающие волокна; 2 — чувствительный объем, засыпанный сцинтиллирующими гранулами; 3 — система крепления и центровки SiPM и волокон; 4 — платы SiPM; 5 — внешние триггерные счетчики

которые помимо электрического подключения SiPM обеспечивают их центрирование относительно оптических коннекторов, в которые вклеены окончания спектросмещающих волокон. Контроль напряжения и передача сигнала осуществляются платами питания и предусиления, управляемыми через интерфейс RS232. Чтение и оцифровка сигналов SiPM на частоте 125 МГц выполняется 64-канальным модулем UWFD64, расположенным в крейте VME. Далее оцифрованные сигналы отправляются на ПК для последующего хранения и обработки. Электроника и система сбора данных аналогична используемой в эксперименте DANSS [3].

Триггерные счетчики сверху и снизу от чувствительного объема используются для выработки внешнего триггера при прохождении вертикальных космических мюонов. Продольные счетчики можно перемещать поперек направления волокон, выделяя тем самым определенную вертикальную четверку волокон (в дальнейшем «столбец»). Параллельно с набором данных по внешнему триггеру для каждого SiPM асинхронно записываются данные шумовых срабатываний с низким порогом и большим прореживанием. Полученные шумовые спектры анализируются с целью проведения динамической абсолютной калибровки.

3. КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА

Калибровка установки включает две процедуры: абсолютную и относительную. Абсолютная калибровка позволяет установить величину сигнала, соответствующую регистрации одного фотоэлектрона, в единицах АЦП. Она производится на основе непрерывно накапливаемых шумовых спектров и позволяет отслеживать изменение величины однофотоэлектронного сигнала при температурных вариациях в процессе длительного накопления космических данных. Большинство шумовых событий — это случайное срабатывание одного пикселя SiPM. Сигналы, превосходящие однопиксельный сигнал по величине, вызваны срабатыванием большего числа пикселей ввиду кросстолка между ними. Среднее значение шумового спектра представляет собой отклик на один фотоэлектрон в единицах АЦП с учетом кросстолка.

Относительная калибровка позволяет исключить эффекты, связанные с систематическими различиями в светосборе разных каналов между собой. Для этой процедуры продольные триггерные счетчики устанавливались поочередно над каждым столбцом каналов. При таком узком выделении геометрии космических треков каналы столбца находятся приблизительно в равных условиях световыделения, и отличия спектров характеризуют различия в светосборе. Сравнение спектров для разных столбцов позволяет непосредственно сопоставить между собой характеристики светосбора всех каналов установки. Для численного сравнения используются медианы спектральных распределений, выраженных в фотоэлектронах на основании абсолютной калибровки.

4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКОВ

В конфигурации прототипа с параллельными волокнами абсолютная величина сигнала не является определяющим параметром для вычисления координат пролета частицы. В такой конфигурации возможно восстановление только проекции трека на плоскость, перпендикулярную волокнам, тогда как треки, проходящие под разными углами в плоскости столбца волокон, будут иметь разную длину пробега в чувствительном объеме и разное суммарное энерговыделение. Таким образом, даже при одинаковой проекции в перпендикулярной плоскости абсолютная величина сигнала может быть разной.

Чтобы избежать эффекта неопределенности, связанной с продольным наклоном треков, для определения координат использовалась величина *асимметрии* сигналов в горизонтальной паре каналов:

$$\alpha = \frac{a_R - a_L}{a_R + a_L}, \quad (1)$$

где $a_R(a_L)$ — амплитуды сигналов в правом (левом) каналах пары. При таком определении асимметрия не чувствительна к углу трека в плоскости, параллельной волокнам, но сохраняет чувствительность к положению трека внутри каждой пары.

Для определения параметров трека необходимо построить функцию, преобразующую измеренную асимметрию в координату между волокнами пары. В предположении равномерного заполнения пространства внутри пары треками космических мюонов производится сравнение этого распределения и распределения асимметрии на основе их кумулятивных сумм:

$$\int_{x_{\min}}^{x_i} F_{\text{asym}}(x) dx = \int_{y_{\min}}^{y_i} F_{\text{spatial}}(y) dy, \quad (2)$$

где функции F отвечают распределениям асимметрии и координат, точки x_i и y_i — это пары значений целевой функции. При этом $x_{\min} = -0,6$ и $x_{\max} = 0,6$ характеризуют границы распределения асимметрии, полученные из вида распределения и введенные вручную для отсека нехарактерных значений. Соответственно, $y_{\min} = -7,5$ и $y_{\max} = 7,5$ следуют из геометрии установки.

Полученная функция $y_i = f(x_i)$ дискретна из-за конечной ширины бинов распределений. Ее вид после интерполирования между дискретными значениями представлен на рис. 2.

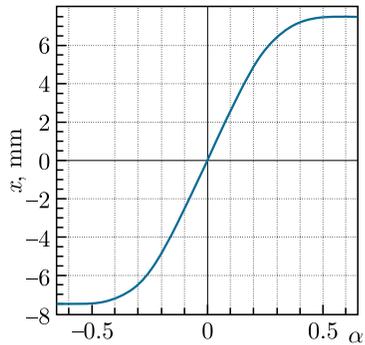


Рис. 2. Функция, связывающая координату между волокнами пары с величиной асимметрии

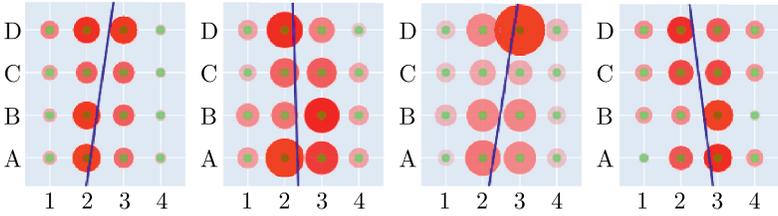


Рис. 3. Примеры реконструированных треков. Размером круга показывается абсолютная величина сигнала в канале, насыщенностью кругов — относительное распределение сигналов в событии

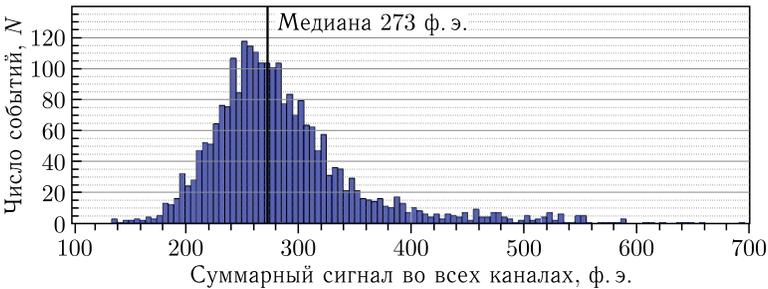


Рис. 4. Спектр суммарного светосбора для всех каналов

Треки мюонов во всем чувствительном объеме (без выделения продольными триггерными счетчиками) восстанавливались по координатам в четырех парах, отобранных по условию наибольших сигналов в соответствующем горизонтальном ряду (пример на рис. 3). Алгоритм показал точность реконструкции координаты на уровне $\sigma = (2,7 \pm 0,1)$ мм.

Не менее важным, чем точность определения координаты, является вопрос о количестве собранного света. При том же отборе событий, который использовался при проведении треков, строится спектр суммы сигналов во всех каналах детектора (показан на рис. 4). Значение медианы 273 ф. э. (фотоэлектрона) соответствует 18 ф. э. на 1 МэВ энергии, выделенной мюоном при прохождении всего вертикального размера чувствительного объема с учетом плотности его заполнения гранулами.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для изучения неоднородности светосбора и оценки оптических свойств гранулярной среды было проведено Монте-Карло моделирование распространения фотонов в такой среде. При моделировании чувствительный объем был приближен однородной средой, характеризующейся

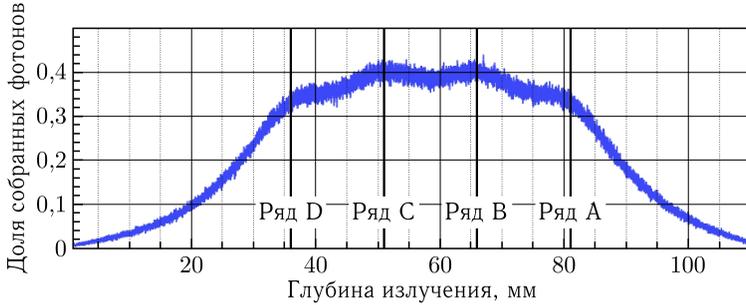


Рис. 5. Зависимость доли собранного света от вертикальной координаты испускания. Черными линиями отмечены положения горизонтальных рядов волокон

длиной рассеяния и длиной поглощения. Для каждого испущенного фотона разыгрывались расстояния до очередного изотропного рассеяния вплоть до захвата волокном, поглощения средой или выхода за границы объема. Фотоны испускались равномерно вдоль вертикальной прямой, проходящей через центр чувствительного объема.

При варьировании ключевых модельных параметров среды экспериментальный и модельный спектры совпали в медиане при длине поглощения 130 мм и длине рассеяния 3 мм. Эти значения были использованы при изучении вертикальной неоднородности светосбора (рис. 5). При удалении от массива волокон оптический светосбор значительно падает. Детальный расчет показывает, что если ограничить область энерговыделения мюонов центральной зоной эффективного светосбора в 60 мм по высоте, то оценка световыхода всего прототипа детектора достигает 28 ф. э./МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и испытан прототип инновационного позиционно-чувствительного детектора на основе среды с сильным рассеянием света с использованием гранул твердого органического сцинтиллятора. В результате проведенной калибровки, моделирования и обработки данных прототип показал эффективный светосбор 28 ф. э./МэВ и координатную точность реконструкции 2,7 мм. Ближайшие планы включают исследования различных сред на основе гранулированного сцинтиллятора с добавлением различных жидкостей и изменением параметров гранул, а также использование алгоритмов машинного обучения для идентификации событий и реконструкции треков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cabrera A. et al.* Neutrino Physics with an Opaque Detector // *Commun. Phys.* 2021. V. 4, No. 1.

2. *Brekhovskikh V., Gorin A., Dyatchenko V., Medynsky M., Rykalin V.* New Generation of Large Scale Scintillation Counters for Detection of EAS and Use in Guard Systems of Experimental Physics Setups // *Phys. At. Nucl.* 2019. V. 82. P. 649–656.
3. *Alekseev I. et al.* Optimized Scintillation Strip Design for the DANSS Upgrade // *J. Instrum.* 2022. V. 17, No. 04. P. P04009.