

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР НУКЛОНОВ И ЯДЕРНЫХ ФРАГМЕНТОВ

*В. С. Горячев^а, Н. М. Жигарева^а, Д. Ю. Кирин^а, А. В. Ставинский^{а,б},
В. Л. Столин^а, С. С. Шиманский^{б,1}, О. А. Чернышов^а*

^а Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Разработан, изготовлен и испытан с помощью космических частиц сцинтилляционный детектор, в котором в качестве фотоприемников используется стандартный фотоумножитель (PMT) и 6 кремниевых (SiPM), разнесенных по объему сцинтиллятора для улучшения позиционной чувствительности. Приведены данные о конструкции детектора и результаты испытаний.

The scintillation detector was designed, manufactured and tested on a cosmic-ray stand. As photodetectors there were used the standard photomultiplier (PMT) and six silicon ones (SiPM) spaced across the scintillator volume to improve positional sensitivity. Data on the detector design and the test results are presented.

PACS: 29.40.Mc; 95.55.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Огромный прогресс, достигнутый в последнее время в идентификации заряженных частиц в современных трековых детекторах, с особой остротой ставит вопрос о развитии методов идентификации нейтронов, являющихся важной компонентой спектра вторичных частиц в столкновениях ядер при энергиях ускорительных комплексов FAIR, нуклотрон–NICA. Без идентификации нейтронов трудно говорить о «герметичности» и «4 π -акцептансе» детектора. Кроме того, с отсутствием идентификации нейтронов теряется существенная качественная компонента доступной детектору физики, в частности в исследовании изотопических и зарядовых эффектов, а также в изучении рождения странных частиц (в частности, Σ -гиперонов, для идентификации которых трековых детекторов недостаточно).

Спектр созданных нейтронных детекторов достаточно широк (см., например, обзор [1]). Тем не менее точность определения импульса и локализация в пространстве нейтронов, как правило, хуже, чем для заряженных частиц, регистрируемых

¹ E-mail: Stepan.Shimanskiy@jinr.ru

трековыми приборами. Это объективно обусловлено природой, но развитие методики регистрации нейтронов может уменьшить разрыв между качеством идентификации нейтронов и заряженных частиц. «Стандартный» детектор нейтронов — это сцинтиллятор + РМТ. Нейтрон идентифицируется по заряженным продуктам взаимодействия с веществом детектора, поэтому толщина детектора должна быть достаточно большой (для оценки можно взять 1% эффективности на 1 см толщины сцинтиллятора). Отсюда характерный объем сцинтиллятора — несколько кубических дециметров и, соответственно, точность локализации порядка 10 см.

Развитие технологии SiPM сделало актуальным использование нескольких диодов как дополнительных фотоприемников, амплитуды световых импульсов в которых зависят от расстояния между SiPM и точкой взаимодействия нейтрона с веществом, что может быть применено для улучшения позиционной чувствительности. Такой детектор был предложен в ИТЭФ [2, 3] для идентификации нейтронов и заряженных ядерных фрагментов в диапазоне кинетических энергий 5–200 МэВ/нуклон с возможностью компактной сборки неограниченного количества модулей для увеличения акцептанса.

Было разработано и испытано несколько прототипов детектора, после чего был создан модуль, предназначенный для тиражирования и изготовления многоканального детектора нейтронов с акцептансом масштаба 1 ср. Такой модуль и результаты его тестирования описаны в данной работе.

1. КОНСТРУКЦИЯ МОДУЛЯ

Принципиальная схема модуля приведена на рис. 1. Шестигранный сцинтиллятор толщиной 20 см и с расстоянием между противоположными гранями 15 см допускает компактную сборку многоканального детектора без существенных пустот в акцептансе. Как видно из рис. 2, вдоль граней шестигранника вырезаны канавки для пучков светосмещающих оптоволокон (Кугагау-11 [4]), используемых для переизлучения и передачи световых импульсов к расположенным на тыльной поверхности сцинтиллятора SiPM (SensL 30000). В стандартной версии установлено 6 SiPM с усилителями, но конструкция позволяет увеличить их число до 12 без существенных переделок. На фронтальной поверхности сцинтиллятора размещены 3 LED (UV 1–3, рис. 3, VL-L314VC), используемые для мониторингирования и контроля позиционной чувстви-

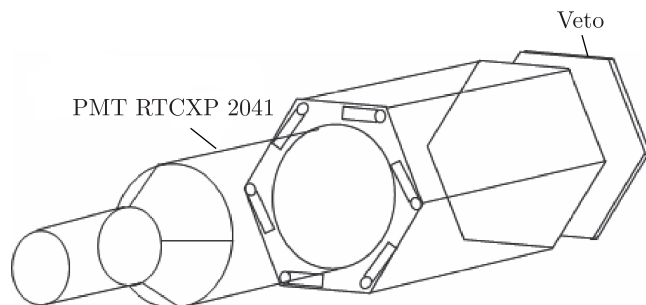


Рис. 1. Принципиальная схема модуля

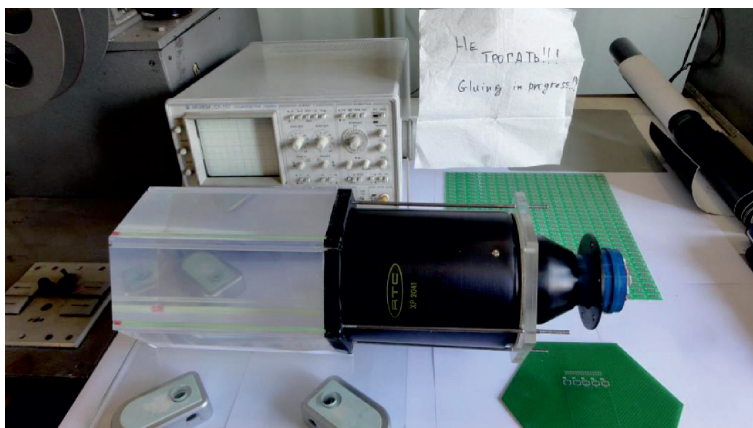


Рис. 2. Модуль в процессе сборки

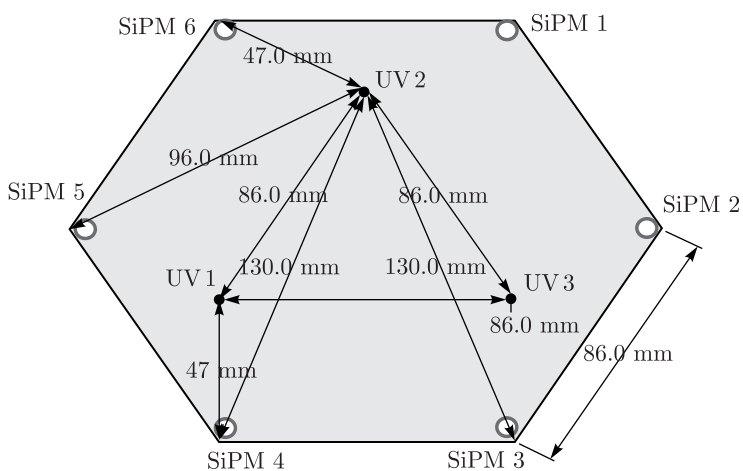


Рис. 3. Принципиальная схема расположения кремниевых фотоприемников (SiPM 1–6) и используемых для мониторинга и контроля позиционной чувствительности расположенных на фронтальной поверхности LED (UV 1–3)

тельности. Световые импульсы от LED коллимированы таким образом, чтобы они оказались в том же диапазоне амплитуд сигналов, что и сигналы заряженных частиц минимальной ионизации (МИП).

К тыльной поверхности сцинтиллятора с оптическим контактом прикреплен фотомножитель RTC XP2041/Q.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В рамках GEANT-4 проведено моделирование регистрации нейтронов в модуле детектора. Целью моделирования была оценка эффективности идентификации нейтронов и принципиальных ограничений используемой методики на позиционную чув-

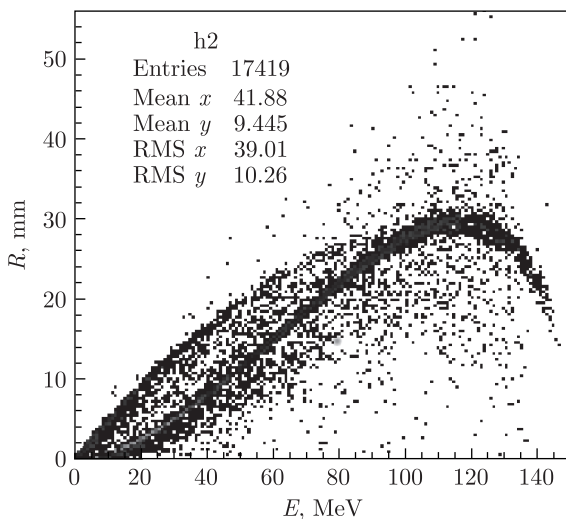


Рис. 4. Результаты моделирования идентификации нейтронов с энергией 150 МэВ. Показана зависимость расстояния максимального удаления от траектории начального нейтрона точки заряженной частицы, образовавшейся в результате взаимодействия нейтрона в сцинтилляторе, от потери энергии нейтрона в этом взаимодействии

ствительность. При энергии нейтронов более 50 МэВ эффективность регистрации нейтронов около 20%, при меньшей энергии нейтронов эффективность растёт, но существенно зависит от установленного порога. Оптимизация порога зависит от конкретной задачи.

Поскольку нейтроны регистрируются по вторичным заряженным частицам, место попадания нейтрона в детектор и координаты точек, где происходят сцинтилляции, принципиально отличаются. Это накладывает существенные ограничения на точность определения места попадания нейтрона в детектор. На рис. 4 для примера показаны результаты моделирования для начальной энергии нейтронов 150 МэВ. Показана зависимость расстояния максимального удаления от траектории начального нейтрона точки заряженной частицы, образовавшейся в результате взаимодействия нейтрона в сцинтилляторе, от потери энергии нейтрона в этом взаимодействии. Видно, что в двух предельных случаях (переданная заряженным частицам энергия стремится к 0 или 150 МэВ) сцинтилляции происходят вблизи траектории начального нейтрона. Среднее отклонение (половина от максимально удаленной точки и усредненное по энерговыделению нейтрона) оказалось меньше 1 см в рабочем диапазоне энергий нейтронов (5–200 МэВ).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Модули детектора тестировались на космическом стенде. Схема стенда приведена на рис. 5. В триггер были включены два определяющих сцинтилляционных детектора (100 × 100 мм) и два сцинтилляционных детектора большей площади для увеличения кратности совпадений. Сигнал с фотоумножителя с помощью делителя был приведен к диапазону сигналов с SiPM. Калибровочные коэффициенты для LED и SiPM

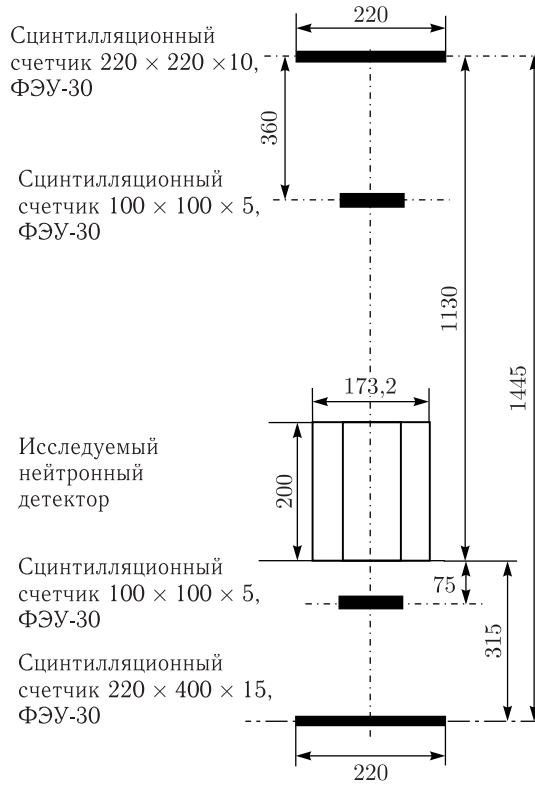


Рис. 5. Схема космического стенда

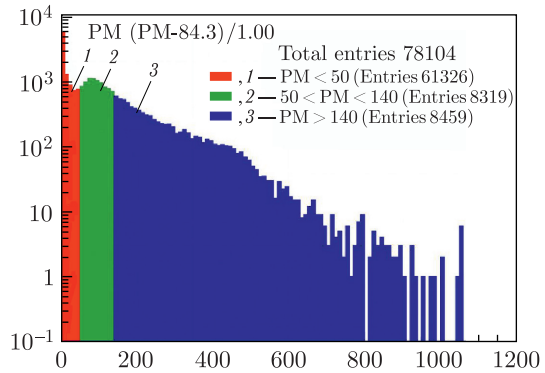


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Амплитудный спектр фотоумножителя. Цветом выделены области пьедестального пика, МПР-пика и амплитудного спектра ливней

определялись следующим образом:

$$K_{(LED_j)} = \prod_{(i=1, \dots, 6)} (A_{ij} - PED)_{(LED_j)} \text{ (калибровка LED),}$$

$$K_{(SiPM_i)} = \prod_{(j=1, 2, 3)} (A_{ij} - PED)_{(SiPM_i)} \text{ (калибровка SiPM).}$$

Для дальнейшего анализа использовались данные, поправленные на калибровочные коэффициенты.

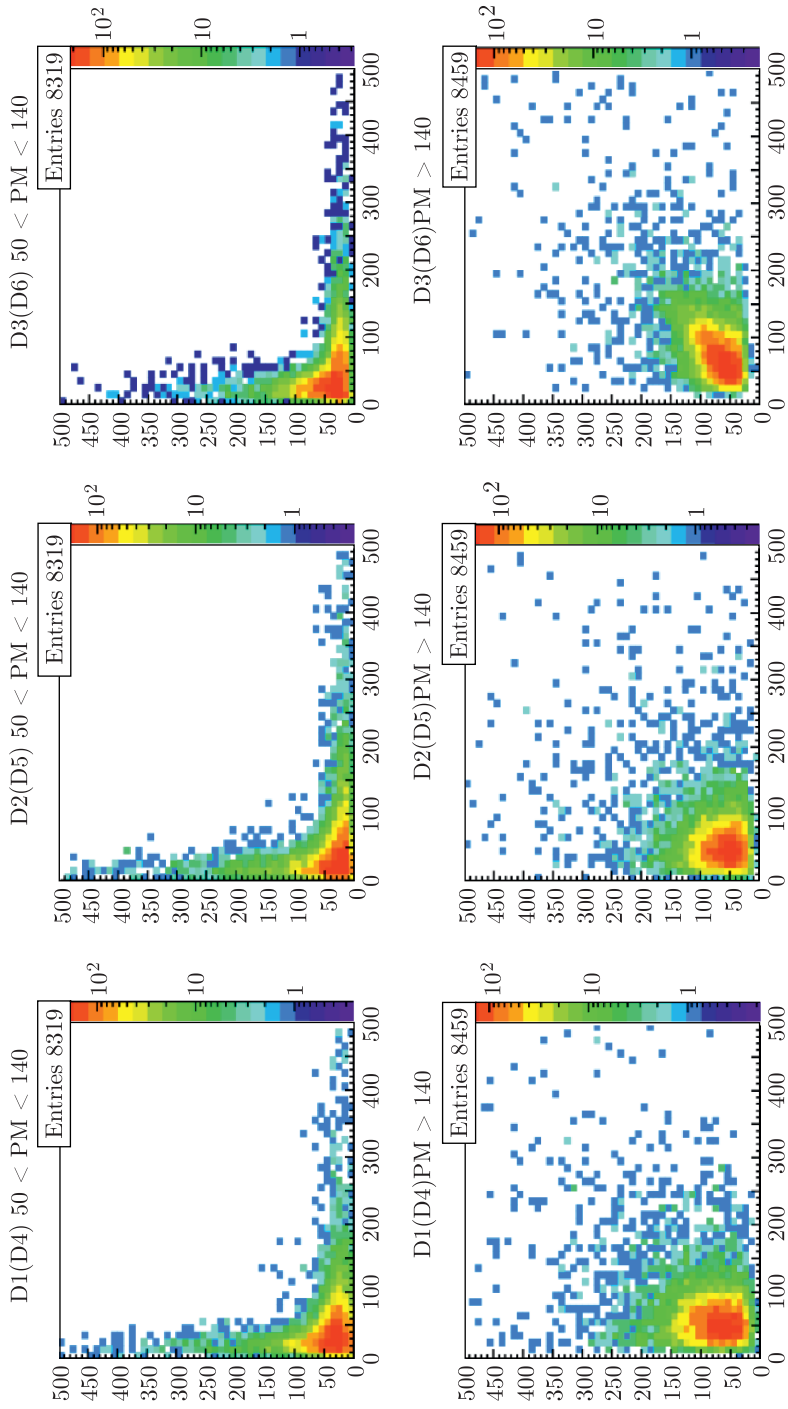


Рис. 7. Двумерные амплитудные распределения противоложащих пар SiPM в области MIP-пика ФЭУ (сверху) и амплитудного спектра ливней (снизу)

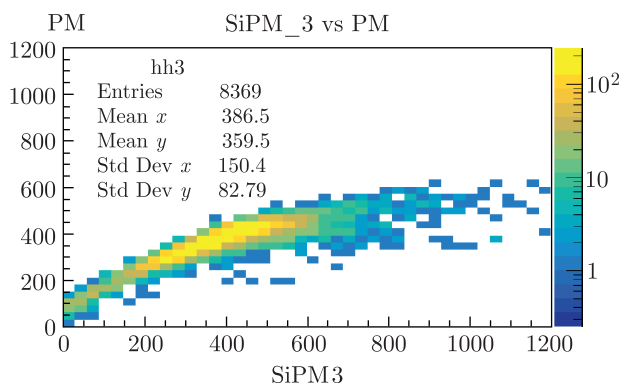


Рис. 8. Двумерные амплитудные распределения одного из SiPM (3) и ФЭУ в области ливней

В спектре сигналов с ФЭУ (рис. 6) видны три области: пьедестальный пик; пик, который мы ассоциируем с одиночными мюонами (MIP) и широкий спектр сигналов правее MIP, который ассоциируется с многочастичными ливнями (см. также [6]). Для двух последних на рис. 7 приведены двумерные амплитудные распределения противоположащих пар SiPM. В верхней части рисунка — данные в области MIP-пика ФЭУ. Здесь четко прослеживается та закономерность, что большим амплитудам сигналов на одном SiPM соответствуют маленькие амплитуды на противоположном SiPM. Это соответствует ожиданиям (если мюон проходит около одного из SiPM, то от противоположного он на расстоянии масштаба 15 см (см. рис. 3)). При замене на мюон, проходящий около противоположного SiPM, отношение амплитуд их сигналов изменяется на два порядка. В среднем ширина амплитудного спектра (среднеквадратичное отклонение) для SiPM оказалась около 23%. Соотнося точность определения амплитуды сигнала SiPM с динамическим диапазоном изменения отношения амплитуд, противоположащих SiPM, можно оценить усредненное по фронтальной поверхности детектора пространственное разрешение, которое оказалось порядка 1,0–1,2 см. На нижней части рис. 7 — данные в области больших амплитуд ФЭУ (область многочастичных ливней). В этой области все SiPM и ФЭУ демонстрируют синхронный рост амплитуды сигналов (для примера на рис. 8 показано, что для амплитуд SiPM 3 и ФЭУ наблюдается положительная корреляция). Естественно, что при большом числе частиц в детекторе о позиционной чувствительности говорить бессмысленно, а наблюдаемые на обоих типах фотоприемников спектры отражают лишь полное энергосодержание в детекторе.

4. ВЫВОДЫ

Создан, откалиброван и протестирован, с помощью космических частиц, позиционно-чувствительный детектор для идентификации нейтронов и ядерных фрагментов в диапазоне энергий 5–200 МэВ/нуклон. По результатам тестирования позиционное разрешение детектора оказалось в хорошем соответствии с расчетной величиной (~ 1 см). Авторы выражают благодарность академику АИН А. А. Балдину за разнообразную помощь и полезные обсуждения. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-02-00637).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юревич В. И. // ЭЧАЯ. 2012. Т. 43, вып. 3. С. 713–805.
2. Dzibenko G. B. et al. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78, No. 8. P. 929–935.
3. Горячев В. С. и др. // ПТЭ. 2016. № 4. С. 20–26.
4. Kuraray America Inc., 200 Park Ave., NY 10166, USA.
<http://particulas.cnea.gov.ar/workshops/icfa/wiki/images/a/a7/Kuraray-PSF-Y11.pdf>.
5. Sejkow F., Simon F. (CALICE Collab.). arXiv:1808.09281v1 [physics.ins-det].

Получено 14 октября 2019 г.