

УДК 520.66

## Калибровка прототипа сцинтилляционного детектора большого объема с фотоприемниками на основе матриц из кремниевых ФЭУ

*И.М. Дзапарова<sup>1,2</sup>, А.Ф. Янин<sup>1</sup>, Е.А. Горбачева<sup>1</sup>, А.Н. Куреня<sup>1</sup>, В.Б. Петков<sup>1,2</sup>, А.А. Шихин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт ядерных исследований РАН, Проспект 60-летия октября, 7а, Москва, 11732, Россия  
*dzaparova@yandex.ru*

<sup>2</sup> Институт астрономии РАН, ул. Пятницкая, 48, Москва, 119017, Россия  
*petkov@inr.ru*

Поступила в редакцию 15 октября 2021 г.

**Аннотация.** В последние годы в ИЯИ РАН ведутся работы по созданию в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) сцинтилляционного детектора большого объема. Детектор будет являться частью мировой сети нейтринных детекторов.

Один из разрабатываемых в БНО прототипов такого детектора представляет собой акриловую сферу диаметром 500 мм, заполненную жидким сцинтиллятором. В качестве фотоприемников используются матрицы кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ). Такие фотоприемники уже много лет используются в различных физических экспериментах. В нашем случае, в отличие от других экспериментов, матрицы КФЭУ применяются не только для измерения общего световыхода от взаимодействия частиц в сцинтилляторе, но и для получения изображений таких событий. Данный подход позволит отделять полезные (нейтринные) события от фоновых и в том числе проводить мониторинг взрывов Сверхновых в нашей Галактике. Характеристики оптического коллектора прототипа детектора определяются акриловой сферой и линзами Френеля диаметром 300 мм и фокусным расстоянием 120 мм. В качестве фотоприемников выбраны матрицы КФЭУ фирмы SensL (ARRAYJ-60035-64P-PCB). Проведены измерения просматриваемого матрицами объема с помощью закрепленного на рычаге светодиода. Описана система сбора данных MDU3-GI64X2 (фирмы AiT Instruments).

В каждом цикле измерений производится калибровка каналов. Приведен зарядовый спектр в детекторе – суммарный сигнал, измеренный 64 КФЭУ матрицы. Представлено изображение трека мюона. В настоящее время отрабатывается методика проведения измерений и анализа полученных данных, а также ведется подготовка к работе со следующим прототипом детектора, который представляет собой акриловую сферу диаметром 1 м.

**Ключевые слова:** кремниевые ФЭУ, оптический коллектор, регистрация трека, линзы Френеля

## 1 Введение

В настоящее время в ИЯИ РАН разрабатывается проект сцинтилляционного детектора большого объема. Предполагаемая масса мишени детектора 10 кт. Создание подобного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН будет являться частью мировой сети нейтринных детекторов по изучению природных нейтринных потоков ([Barabanov et. al., 2017](#); [Malyshkin et. al., 2020](#); [Petkov et. al., 2020](#)).

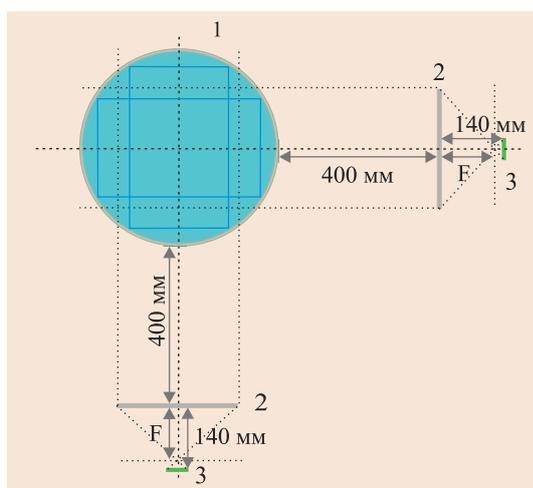
Один из разрабатываемых в БНО прототипов такого детектора представляет собой акриловую сферу диаметром 500 мм, заполненную жидким сцинтиллятором. В качестве фотоприемников используются матрицы кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ). Такие фотоприемники уже много лет используются в различных физических экспериментах. В нашем случае, в отличие от

других экспериментов, матрицы КФЭУ применяются не только для измерения общего световыхода от взаимодействия частиц в сцинтилляторе, но и для получения изображений таких событий. Такая методика регистрации частиц дает принципиальную возможность разделять и изучать различные классы событий в объеме сцинтиллятора и может оказаться полезной при создании новых больших детекторов для нейтринной астрофизики и геофизики (Petkov, 2016).

Работа над прототипом детектора является продолжением исследования применения матриц КФЭУ для получения изображения событий в объеме сцинтиллятора. В первом образце детектора, который создавался в БНО, в качестве сцинтиллятора использовался кубик из пластического сцинтиллятора, грань которого по площади  $36 \text{ см}^2$  равна была площади матрицы ArrauC-60035-64P-PCB. Используя в качестве фотоприемников две матрицы КФЭУ, были получены изображения событий. Измерения были проведены с разными конструкциями детектора. В одном варианте матрицы располагались на гранях пластического сцинтиллятора, во втором были установлены в фокусе оптического коллектора, построенного на линзах Френеля. Результаты исследований приведены в работах (Янин и др., 2018; Dzaparova et. al., 2015).

## 2 Прототип сцинтилляционного детектора большого объема

Прототип, с которым мы начинаем работать, представляет собой акриловую сферу, заполненную жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита, который используется в сцинтилляционных счетчиках наших установок. Используемый в детекторе сцинтиллятор разработан в ИЯИ РАН (Воеводский и др., 1970) и по таким характеристикам, как сцинтилляционный выход, короткое время высвечивания, стабильность сцинтиллятора, остается одним из лучших в мире.



**Рис. 1.** Оптическая схема детектора. Вид конструкции сверху: 1 – акриловая сфера, 2 – линза Френеля, 3 – матрица КФЭУ

Оптическая система детектора построена (рис. 1) на линзах Френеля. Используются две линзы Френеля диаметром 300 мм и фокусным расстоянием 120 мм. В качестве фотоприемников выбраны матрицы КФЭУ ирландской фирмы SensL, максимум чувствительности которых (420 нм) совпадает с максимумом спектральной чувствительности нашего сцинтиллятора. Матрицы серии J (ARRAYJ-60035-64P-PCB) были выбраны еще и потому, что имеют сверхнизкую типовую скорость темнового счета 50–150 кГц/мм<sup>2</sup>.

Результаты, изложенные в этой работе, являются отработкой методики измерений и представления полученных данных (визуализации событий, анализа и разделения на разные классы событий). Следующим этапом будет работа с прототипом детектора, акриловая сфера которого имеет диаметр 1 м. Детектор будет располагаться в одном из помещений Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (Алексеев и др., 1980). Телескоп расположен в скальной выработке на расстоянии 550 м от начала горизонтальной штольни. Эффективная толщина грунта над телескопом составляет 850 г/см<sup>2</sup> (850 м.в.э., 300 м скального

грунта). В этих условиях интенсивность мюонов понижается на три порядка по сравнению с фоновым на поверхности земли, что даст возможность ставить задачу по разделению и изучению различных классов событий в объеме сцинтиллятора. Сцинтилляционный детектор большого объема будет располагаться в подземном помещении на глубине около 4000 м от входа в штольню. Эффективная толщина грунта эквивалентна 4800 м.в.э. Интенсивность мюонов на этой глубине составляет  $(3.0 \pm 0.15) \times 10^{-9} \mu / (\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Такой низкий фон (один мюон на квадратный метр за 10 часов) позволяет решать задачи поиска редких астрофизических нейтринных событий.

### 2.1 Измерения просматриваемого матрицей объема

Емкость акрилового детектора диаметром 500 мм склеена из двух полусфер. Полусфера изготавливается методом выдувания из листа прозрачного акрила (Plexiglas) и утончается от 12 мм у края до

3.6 мм к центру полусферы. Наложение характеристик оптического тракта на линзах Френеля и оптических свойств свойств акриловой сферы детектора потребовало проведения измерений по оценке объема, просматриваемого матрицей.

Для этого в месте крепления крышки в технологическом отверстии акриловой сферы была горизонтально закреплена платформа. На ней были расположены два транспортира во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 2). Через центр платформы вставлялся рычаг, на конце которого закреплялся светодиод. Фиксировались все положения светодиода в объеме сферы, когда изображение от светодиода еще попадало на края матрицы. Таким образом, каждое положение светодиода в объеме сферы определялось тремя координатами – двумя углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  во взаимно перпендикулярных плоскостях и длиной рычага  $L$ . Расстояние от линзы Френеля до поверхности сферы было выбрано таким, чтобы изображение на матрице от светодиода у ближней стенки не более чем в 1.2 раза отличалось размерами от изображения на матрице, когда светодиод расположен у дальней стенки сферы.

Все измерения проведены при расположении компонентов оптической системы, указанных на рис. 1. Построение полученных при измерении координат позволило определить, что при выбранном расположении линзы Френеля, матрицы и сферы, матрица просматривает объем, представляющий собой прямоугольный параллелепипед. В измерениях были получены координаты всех восьми вершин и координаты точек в середине всех шестнадцати ребер параллелепипеда. На рис. 1 в сфере наложены два прямоугольника со сторонами 17 см и 44 см – вид сверху измеренных рабочих объемов для каждой матрицы. Общий для матриц кубический объем в центре сферы позволяет получить изображение события в двух проекциях. Таким образом, матрица площадью  $25.44 \text{ см}^2$  просматривает объем в центре сферы с площадью грани, обращенной к матрице  $289 \text{ см}^2$ , и, соответственно, проецирует на матрицу в 11 раз уменьшенное изображение. При проведении измерений на поверхности земли, не в низкофоновых условиях, детектор регистрирует в основном высокий фон атмосферных мюонов. Для регистрации мюонов и был выбран такой масштаб, который определяется расположением компонентов оптической системы – линзы Френеля, матриц и сферы.

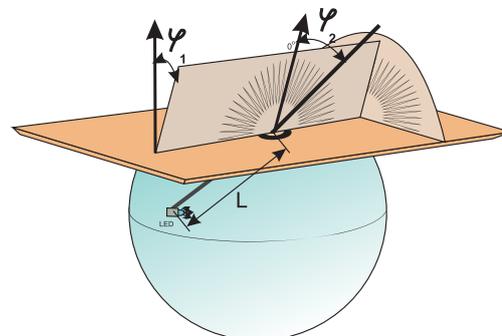
## 2.2 Система сбора данных MDU3-GI64X2 детектора

Для сбора данных с матриц КФЭУ ранее нами применялась система регистрации на основе зарядово-цифрового преобразователя (ЗЦП) V792A фирмы CAEN (Янин и др., 2017). Использование системы сбора данных MDU3-GI64X2 фирмы AiT Instruments на 128 каналов, разработанной специально для работы с матрицами из 64 КФЭУ, имеет значительные преимущества.

Система сбора данных представляет собой компактный прибор, позволяющий оперативно приступить к измерениям. Блок имеет гибкую возможность выбора триггера. К тому же суммарный сигнал с каждой матрицы и сумма всех 128 КФЭУ выводятся на разъемы на передней панели. В блоке MDU3-GI64X2 расположены две 64-канальных платы 12-битных ЗЦП. Система сбора данных может работать от внешнего триггера и имеет возможность использовать разные варианты выработки внутреннего триггера.

Мы проводили измерения от встроенного дискриминатора, на который приходит сумма всех 128 каналов. Точность выставления порога срабатывания дискриминатора определяется 16-битным цифро-аналоговым преобразователем в диапазоне 1 В. Порог дискриминатора был выбран таким, чтобы регистрировать мюонный пик (в условиях измерений на поверхности земли). Передача данных в компьютер осуществляется через порт USB 3.0, контроллер которого передает данные ЗЦП со скоростью более 150 Мбит/с.

В настоящее время разрабатывается конструкция для крепления фотоэлектронного умножителя XR4500/B, просматривающего весь рабочий объем и в дальнейшем планируется использовать внеш-



**Рис. 2.** Эскиз схемы измерения просматриваемого матрицей объема сферы. Положение светодиода в объеме сферы определяется тремя координатами – двумя углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  во взаимно перпендикулярных плоскостях и длиной рычага  $L$

ний триггер от него. Для этого нужно запрограммировать любой из выводов 8-канального TTL-порта системы сбора как вход. Обращение к устройствам AiT MDU3 осуществляется через платформу Microsoft Windows.NET. Создание программы сбора данных возможно после изучения работы и выбора оптимального режима для блока MDU3-G164X2 с прототипом детектора.

### 2.3 Результаты измерений

Особенности конструкции детектора, такие как отсутствие отражающих поверхностей и применение оптического коллектора, являются причиной слабого светового сигнала. В этих условиях важно минимизировать световые потери и при работе с оцифрованными данными учитывать пьедесталы в каждом канале ЗЦП. Тестовая программа от фирмы AiT Instruments записывает данные в файл сериями. Для каждой серии измерений в каждом канале находится минимальное значение и от него вычисляется в пределах 50 каналов среднее значение пьедестала. При измерениях на поверхности земли основной вклад дают атмосферные мюоны. Спектр суммарного зарядового сигнала от матрицы № 1 приведен на рис. 3. Обработано 10000 событий. В каждом событии измеряются заряды от аналоговых сигналов 128 КФЭУ. В событии суммируются значения 64 КФЭУ для каждой матрицы.

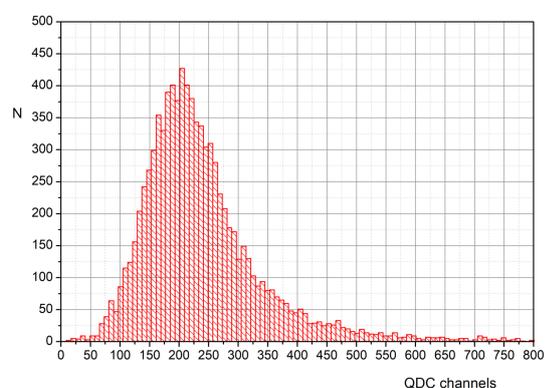


Рис. 3. Суммарный зарядовый спектр матрицы № 1

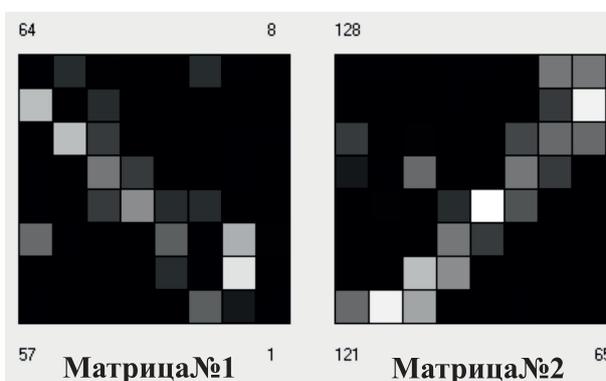


Рис. 4. Визуализация события № 459: суммарный заряд матрицы № 1 – 263, матрицы № 2 – 264 (в каналах ЗЦП)

Для того чтобы перейти от измерения в каналах ЗЦП к энергоснабжению в сцинтилляторе, нам еще предстоит создать программу моделирования отклика детектора. В грубом приближении можно оценить потери частицы при прохождении через рабочий объем сцинтиллятора, зная длину трека частицы. Выбрано событие, визуализация которого приведена на рис. 4. На изображении этого события мы видим мюонный трек, почти симметрично зафиксированный по диагонали в обеих матрицах. Суммарное значение заряда в матрицах, после вычета пьедесталов, отличается всего лишь на один канал. Объем, просматриваемый обеими матрицами, представляет собой куб, длина ребра которого равна 17 см. Построение события в этом объеме позволяет определить длину трека  $L$  – она равна 23 см. Плотность вещества сцинтиллятора на основе уайт-спирита равна  $0.78 \text{ г/см}^3$ . Известно, что потери частицы при прохождении через вещество сцинтиллятора составляют  $2 \text{ МэВ/(г/см}^2)$ . Зная эти параметры, можно оценить потери частицы в выделенном объеме сцинтиллятора для выбранного события:

$$(dE/dx) = L \times \rho \times \Delta E = 23 \text{ см} \times 0.78 \text{ (г/см}^3) \times 2 \text{ (МэВ/(г/см}^2)) = 36 \text{ МэВ.}$$

### 3 Заключение

Получены первые результаты работы с прототипом детектора большого объема. Для акриловой сферы прототипа детектора диаметром 500 мм создана конструкция оптической системы на основе

линз Френеля. Проведены тестовые измерения со светодиодом, расположенным в объеме сферы, чтобы оценить просматриваемый матрицей объем. Используя внутренний триггер от дискриминатора блока и тестовую программу для работы с блоком от производителя, записан набор данных системой сбора MDU3-GI64X2. Для обработки полученных данных созданы программы считывания и преобразования их в формат нумерации матриц ARRAYJ-60035-64P-PCB, определения и вычисления пьедесталов в каналах ЗЦП в каждой серии измерений и программа визуализации событий. После отработки методики измерений и написания программы сбора данных начнется этап перехода к измерениям со следующим прототипом детектора – диаметром акриловой сферы 1 м. Оптический коллектор этого прототипа детектора еще предстоит разработать. Расположение детектора в одном из помещений Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа позволит приступить к изучению и разделению событий на классы не только по энерговыделению, но и по анализу изображения этих событий.

Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН.

## Литература

- Алексеев Е.Н., Алексеенко В.В., Андреев Ю.М. и др., 1980. Известия АН СССР. Т. 44. № 3. С. 609. [Alekseev E.N., Alekseenko V.V., Andreev Yu.M., et al., 1980. Izvestiya AN SSSR, vol. 44, no. 3, pp. 609–612. (In Russ.)]
- Воеводский А.В., Дадькин В.Л., Рязжская О.Г., 1970. Приборы и техника эксперимента. Т. 1. С. 85. [Voevodskii A.V., Dadykin V.L., Ryazhskaya O.G., 1970. Pribory i tekhnika eksperimenta, vol. 1, p. 85. (In Russ.)]
- Янин А.Ф., Дзапарова И.М., Волченко В.И. и др., 2017. Измерительная техника. Т. 3. С. 8. [Yanin A.F., Dzaparova I.M., Volchenko V.I., et al., 2017. Izmeritel'naya tekhnika, vol. 3, pp. 8–11. (In Russ.)]
- Янин А.Ф., Дзапарова И.М., Горбачева Е.А. и др., 2018. Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т. 49. Вып. 4. С. 1411. [Yanin A.F., Dzaparova I.M., Gorbacheva E.A., et al., 2018. Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra, vol. 49, iss. 4. p. 1411–1423. (In Russ.)]
- Barabanov I.R., Bezrukov L.B., Veresnikova A.V., et. al., 2017. Phys. Atom. Nucl., vol. 80, pp. 446–454.
- Dzaparova I.M., Gangapshev A.M., Gavrilyuk Yu.M., et. al., 2015. arXiv e-prints ([arXiv:1512.05939](https://arxiv.org/abs/1512.05939)).
- Malyshkin Yu.M., Fazliakhmetov A.N., Gangapshev A.M., et. al., 2020. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. A, vol. 951, p. 162920. ([arXiv:1909.03229](https://arxiv.org/abs/1909.03229)).
- Petkov V.B., 2016. Phys. Part. Nucl., vol. 47, no. 6, p. 975. ([arXiv:1508.01389](https://arxiv.org/abs/1508.01389)).
- Petkov V.B., Fazliakhmetov A.N., Gangapshev A.M., et. al., 2020. J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1468, p. 012244.

## Calibration of the prototype of a large-volume scintillation detector with photosensors based on silicon photomultiplier matrices

*I. Dzaparova*<sup>1,2</sup>, *A. Yanin*<sup>1</sup>, *E. Gorbacheva*<sup>1</sup>, *A. Kurennya*<sup>1</sup>, *V. Petkov*<sup>1,2</sup>, *A. Shikhin*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow 117312, Russia

*dzaparova@yandex.ru*

<sup>2</sup> Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Pyatnickaya 48, Moscow 11732, Russia  
*vpetkov@inr.ru*

**Abstract.** In recent years, the INR RAS has been developing the project for a large-volume scintillation detector at the Baksan Neutrino Observatory (BNO). The detector will become part of a global network of neutrino detectors. One of the prototypes of such a detector being developed at BNO is an acrylic sphere with the diameter of 500 mm filled with a liquid scintillator. The matrices of silicon photomultipliers (SiPM) are used as photosensors of the detector. For many years such a photosensors have been used in various physical experiments. In our case, unlike other experiments, the SiPM matrices are used not only to measure the total light output from the interaction of particles in the scintillator, but also to obtain images of such events. This approach will allow us to separate useful (neutrino) events from background ones and, among other things, monitor supernova explosions in our Galaxy.

Two matrices of 64 SiPM arrays (ARRAYJ-60035-64P-PCB of SensL company) register photons passing through the optical collector of the detector from the interaction of particles inside the sphere volume of liquid scintillator. The optical collector consists of Fresnel lenses with the diameter of 300 mm and with the focal length of 120 mm. With the help of a LED mounted on the lever, measurements of the volume viewed by the matrices were carried out. The 128-channel data acquisition system is an MDU3-GI64X2 unit (manufactured by AiT Instruments) connected to the preamp boards by a flat micro-coaxial cable. Data reading to an online computer is implemented via the USB 3.0 interface.

Channels are calibrated in each measurement cycle. The charge spectrum in the detector is given – the total signal measured by the matrix. The image of the event track is presented. Currently, the methodology for measuring and analyzing the data obtained is being worked out, and preparation for work with the next prototype of the detector, which is an acrylic sphere with a diameter of 1 m.

**Key words:** silicon photomultipliers, optical collector, track registration, Fresnel lenses