

УДК 53.05

## Перспективы сцинтилляционных детекторов на основе матриц из кремниевых ФЭУ

А.Ф. Янин<sup>1</sup>, И.М. Дзапарова<sup>1,2</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, 117312, Россия  
yanin@yandex.ru

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

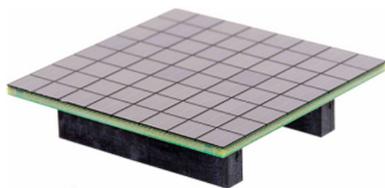
Поступила в редакцию 15 октября 2021 г.

**Аннотация.** В работе рассматривается прототип детектора на жидком сцинтилляторе, способы снятия информации с него, возможность применения конусов Винстона и линз Френеля. Проводилась оценка применения линз Френеля и черенковского излучения для детекторов килотонных размеров. В качестве системы сбора информации применялась 128-канальная система сбора данных MDU3-GI64X2 фирмы AiT Instruments. В качестве приемных устройств использовались 2 матрицы ArrayJ-60035-64P-PCB (фирма SensL, Ирландия), состоящие из 64 индивидуальных кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ) серии J. Предполагается, что использование фотоприемников на основе таких матриц в сцинтилляционных детекторах позволит получать образы (снимки) событий, анализ которых даст принципиальную возможность разделять различные классы событий в детекторах.

**Ключевые слова:** Линза Френеля, конус Винстона, система сбора

### 1 Введение

В последние годы происходит бурное развитие и применение кремниевых ФЭУ (КФЭУ) и матриц КФЭУ, являющихся альтернативой вакуумным аналогам. Разработкой КФЭУ занимаются около двух десятков как российских, так и иностранных фирм. К достоинствам КФЭУ можно отнести нечувствительность к магнитным полям, высокий коэффициент усиления ( $10^5$ – $10^7$ ), низкое напряжение питания, высокое временное разрешение, компактные размеры. Среди недостатков следует отметить малую чувствительную площадь, ограниченный динамический диапазон и высокие шумы. В настоящее время КФЭУ нашли применение в медицине (системы позитронно-эмиссионной томографии), регистраторах гамма- и рентгеновского излучения, в детекторах физики высоких энергий, в научно-исследовательской аппаратуре, в системах безопасности.

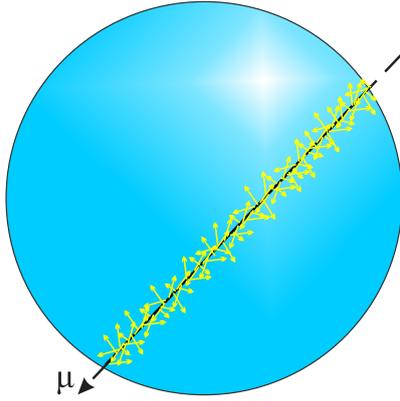


**Рис. 1.** Матрица ARRAYJ-60035-64P-PCB

Пример массового применения КФЭУ – нейтринный эксперимент T2K. В этом эксперименте в сцинтилляционных счетчиках различных детекторов в качестве фотоприемников задействовано около 60 тысяч КФЭУ. Матрица телескопа Черенкова FACT изготовлена из 1440 отдельных КФЭУ Hamamatsu MPPC S10362-33-50C. Камера телескопа ASTRI собрана из 16 монолитных матриц Hamamatsu S11828-3344m, каждая из которых состоит из 16 индивидуальных КФЭУ.

Матрицы КФЭУ бывают с различной организацией одиночных кремниевых ФЭУ:  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$ ,  $12 \times 12$ . Мы использовали вариант  $8 \times 8$  (рис. 1):

- размер одиночного КФЭУ  $6 \times 6$  мм<sup>2</sup>;
- квантовая эффективность 50 % при длине волны 420 нм;
- напряжение питания – 26–31 В;
- число пикселей в одиночном КФЭУ – 22292.



**Рис. 2.** Изотропное излучение фотонов при прохождении заряженной частицы через сцинтиллятор

КФЭУ с апертурой  $A$  и находящегося на расстоянии  $R$  (но т. к. предполагается, что все фотоны, попавшие на матрицу, предварительно прошли линзу Френеля (с небольшим коэффициентом потерь), то можно принимать в расчет апертуру линзы Френеля, а не апертуру матрицы КФЭУ),  $k_{opt}$  – прозрачность всего тракта,  $k_{scintR} = exp(-K/L)$  – коэффициент поглощения в сцинтилляторе с длиной затухания  $L$ .

Данная работа продолжает тему “Разработка и создание опытного образца сцинтилляционного детектора с фотоприемником на основе матриц из кремниевых фотоумножителей” (Yanin et al., 2018). Система сбора данных изменилась на более совершенную. В связи с изменением аппаратной базы продолжились работы по восстановлению треков заряженных частиц.

Известно, что при пролете заряженной частицы через сцинтиллятор в каждой точке трека фотоны излучаются изотропно, как показано на рис. 2. Снимок светящегося трека частицы дает принципиальную возможность определения направления ее движения. Кроме того, есть возможность измерить выделение энергии по следу частицы. Среднее количество фотоэлектронов  $\bar{n}_{pe}$  в одиночном КФЭУ можно оценить как (Petkov, 2016):

$$\bar{n}_{pe} = \bar{N}_{ph(\Delta x)} \delta_R x k_{opt} Q_{pd} k_{scintR}, \quad (1)$$

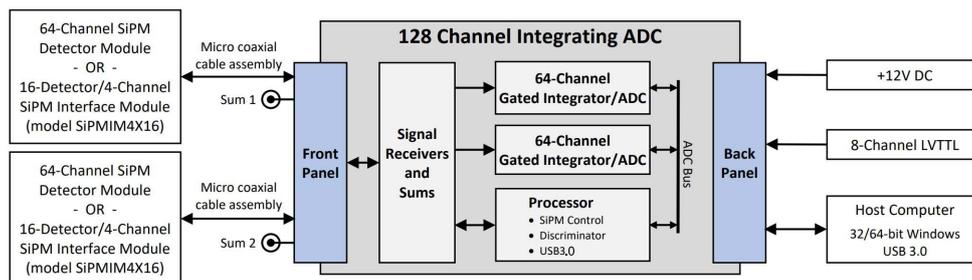
где  $\bar{N}_{ph(\Delta x)}$  – среднее число фотонов, излученных в треке длиной  $\Delta x$ ,  $\delta_R = A/4\pi R^2$  – число фотонов, достигших одиночного

## 2 Инструментальные средства проведения эксперимента

Для регистрации нейтрино создано много крупных научных установок: Камиоканде II, Супер-Камиоканде, KamLAND и другие.

KamLAND – это крупнейший из когда-либо построенных низкоэнергетичных нейтринных детекторов, а также крупнейший сцинтилляционный детектор. Основная его задача – разрешение проблемы нейтринных осцилляций путем детектирования антинейтрино от японских и южнокорейских ядерных реакторов. 13 марта 2021 года состоялась официальная церемония запуска нейтринного телескопа Baikal-GVD (Gigaton Volume Detector). Это крупнейшая подобная установка в Северном полушарии и одна из самых больших в мире (конкуренцию ей может составить только инструмент IceCube, сооруженный в Антарктиде). Перечисленные установки в качестве фоточувствительных детекторов используют вакуумные фотоэлектронные умножители. Они позволяют регистрировать направления прихода заряженных частиц благодаря черенковскому излучению, но не фиксируют треки непосредственно.

В данной работе рассматривается возможность использования КФЭУ для непосредственной регистрации треков на прототипе большого детектора. В качестве регистрирующей установки была выбрана 128-канальная система сбора данных MDU3-GI64X2, включающая в себя 2 матрицы ArgaJ-60035-64P-PCB по 64 КФЭУ, 128 каналов 12-битных интегральных АЦП и быстрый канал связи с компьютером с помощью USB 3.0 (до 150 МГц/с). Имеется возможность программно изменять время интегрирования и пороговые значения (пьедесталы) каждого канала. На рис. 3 представлена функциональная схема системы сбора данных с матриц КФЭУ.



**Рис. 3.** Функциональная схема 128-канальной системы сбора данных MDU3-GI64X2



Рис. 4. Стол с акриловым шаром и необходимой оснасткой

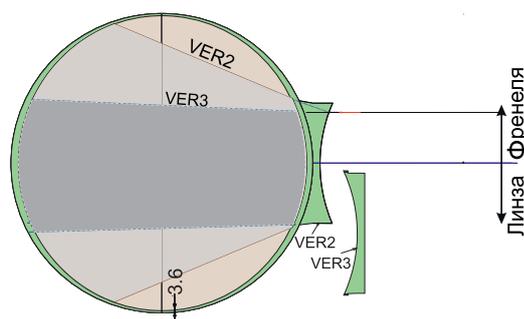


Рис. 5. Зона обзора с дополнительными линзами

Для проведения эксперимента была создана светоизолированная комната, в которой был размещен передвижной стол с акриловым шаром диаметром 500 мм, наполненным жидким сцинтиллятором. Конструкция была дооборудована тремя маленькими подвижными столиками в трех ортогональных направлениях (рис. 4). Линзы Френеля прикреплены к подвижным столикам. В свою очередь, каждый подвижный столик имеет подвижную матрицу для регулировки фокусного расстояния.

Центры матриц находятся на главных оптических осях соответствующих линз Френеля. Линзы Френеля могут перемещаться от поверхности акрилового шара до расстояния приблизительно 400 мм.

Идея эксперимента заключается в следующем: при появлении и перемещении светящегося трека внутри детектора, оптикой он фокусируется на поверхности матрицы и засвечивает отдельные КФЭУ. Степень засветки и длина следа определяется количеством фотонов, попавших на матрицу, длиной трека в детекторе и его удаленностью от матрицы.

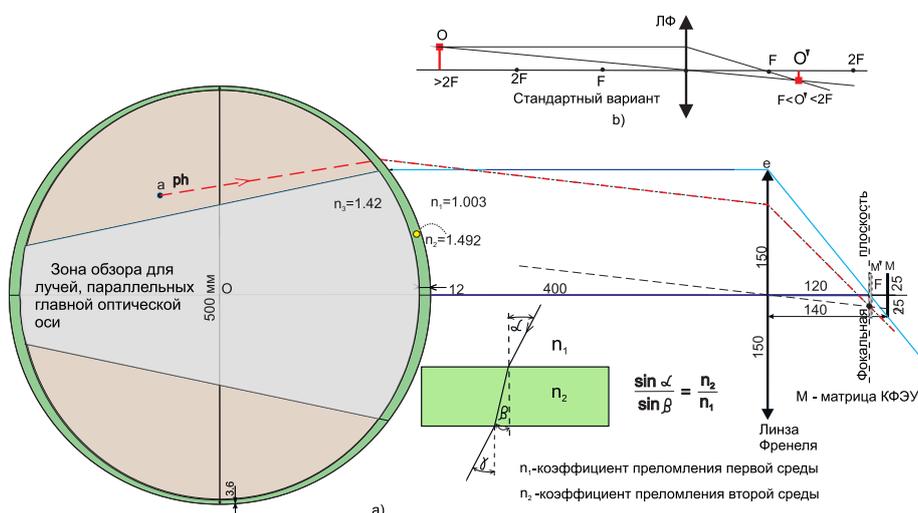
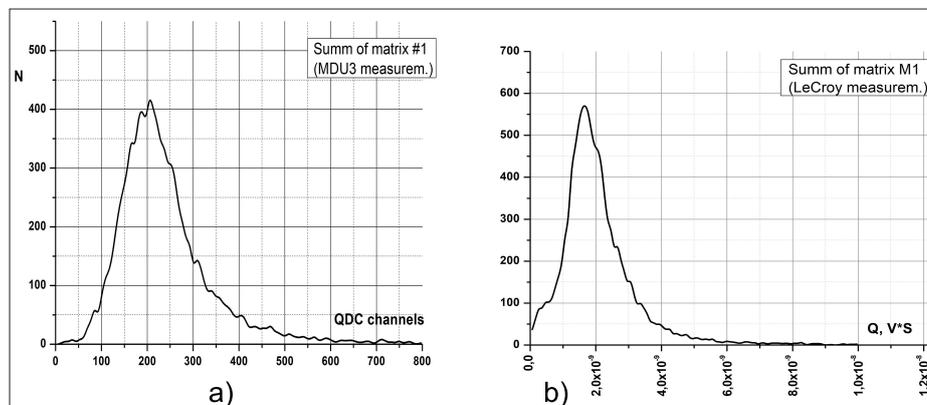


Рис. 6. Зоны обзора без дополнительных линз

В случае применения дополнительных линз внутренний объем шара может просматриваться под разными углами. Фиксация фотонов в зоне обзора может изменяться размещением различных линз непосредственно на поверхности или вблизи акрилового шара. На рис. 5 показаны два варианта (ver2 и ver3) применения линз. На рис. 6 изображены: а) типовой угол обзора в отсутствие дополнительных линз и б) стандартный вариант размещения источников и приемников изображения. Одним из необходимых условий получения резкого изображения является необходимость нахождения объек-

та на расстоянии больше двух фокусных расстояний от линзы, а изображение должно находиться между фокусом и двойным фокусом. Мы располагаем матрицу рядом с фокальной плоскостью.

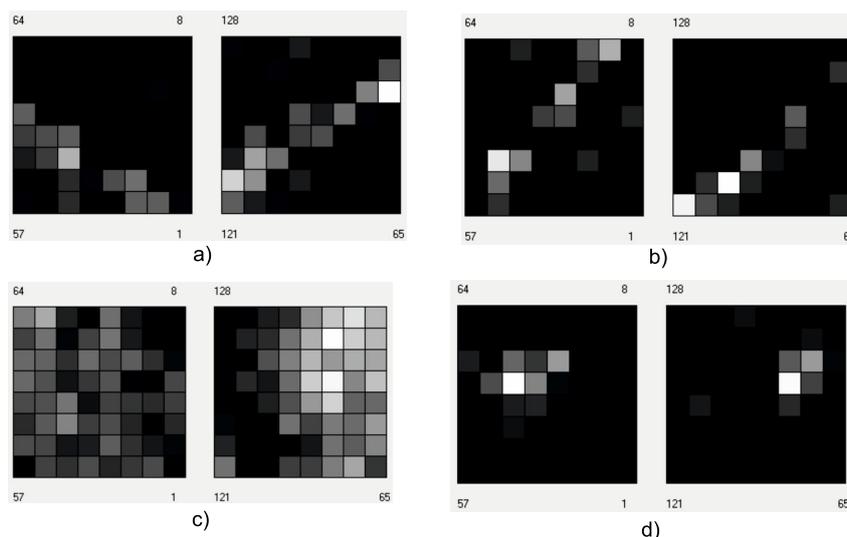


**Рис. 7.** Суммарный спектр энерговыделения с матрицы № 1: а) для MDU3-GI64X2; б) для осциллографа LeCroy

С целью тестирования оборудования были построены суммарные спектры энерговыделений с матрицы № 1, полученные системой сбора данных и цифровым осциллографом Лесроу (рис. 7). Форма спектра соответствует ожидаемой.

Были определены коэффициенты подавления фотонов  $K$  при прохождении линзы Френеля. В расчете были применены 1000 кадров энерговыделений  $A_i$  с 64 индивидуальных КФЭУ при одинаковых входных потоках фотонов с линзой Френеля и без линзы:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{1000} \sum_{i=1}^{64} A_i(\text{NoFresnel})}{\sum_{i=1}^{1000} \sum_{i=1}^{64} A_i(\text{WithFresnel})} = \frac{993074}{861428} = 1.15. \quad (2)$$

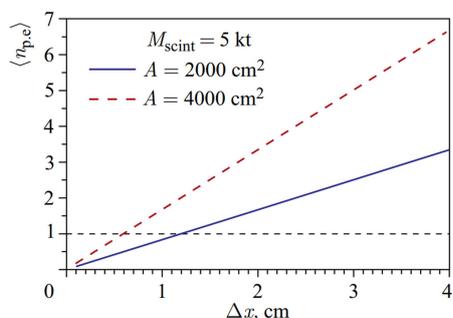


**Рис. 8.** Некоторые разновидности треков для двух ортогональных направлений

Дополнительное ослабление потока фотонов показано в работе (Dzaparova et. al., 2018), которое зависит от угла попадания фотонов на матрицу. Например, при  $43^\circ$  – на 30 %,  $51^\circ$  – на 43 % (это предельный угол, зависящий от фокусного расстояния используемой линзы). На рис. 8 приведены

некоторые треки для двух ортогональных направлений. Имеются выраженные треки (а, b), массовые засветки (с) и локальные засветки (d).

### 3 Возможность использования матриц КФЭУ на детекторах килотонного размера

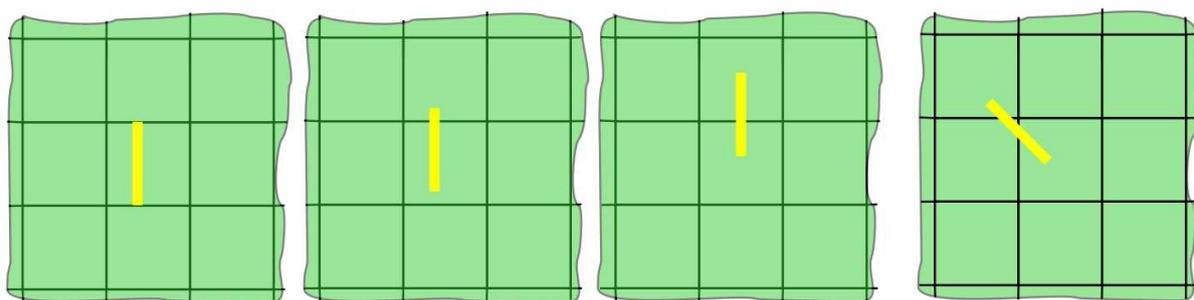


**Рис. 9.** Зависимость регистрации числа фотоэлектронов от длины трека для апертур 2000 и 4000  $\text{cm}^2$

В ИЯИ РАН разрабатывается большой детектор для Баксанской нейтринной обсерватории с целью изучения потоков естественных нейтрино в гео- и астрофизике. Предполагаемый объем детектора 5–20 кт. В работе (Petkov, 2016) показано, что для детектора с массой сцинтиллятора 5 кт с апертурой линзы 2000  $\text{cm}^2$  при длине трека в 1.2 см в центре детектора может быть зарегистрирован 1 фотоэлектрон (рис. 9). В пересчете на линзу Френеля с диаметром 300 мм (апертура 706.8  $\text{cm}^2$ ) будет 0.35 фотона. При коллапсе звезды средняя энергия нейтрино 10–12.5 МэВ, что соответствует 3.5–4.4 фотона. После линзы Френеля – 3.04–3.8 фотона. С учетом квантовой эффективности будет 1.52–1.9 фотоэлектрона.

### 4 Расчет длины трека на матрице КФЭУ

Также используется другой способ оценки длины светящегося трека для электронов (позитронов), который определяется как  $2 \text{ МэВ}/(\text{г} \cdot \text{см}^{-2})$ , т.е.  $2 \text{ МэВ}/1.25 \text{ см}$  (при удельном весе сцинтиллятора  $\sim 0.8$ ). Так как средняя энергия позитронов при коллапсе равна 10–12.5 МэВ, длина трека в сцинтилляторе составит (6.25–7.5) см. Пятисантиметровый трек в сцинтилляторе в поперечном направлении к матрице на удалении 10 м даст след на матрице КФЭУ 0.6 мм, что намного меньше размера одиночного КФЭУ. Чтобы длина трека равнялась хотя бы размеру одиночного КФЭУ, длина трека в сцинтилляторе на удалении 10 м должна быть равна 50 см. Это эквивалентно энергии 80 МэВ (рис. 10). До матрицы КФЭУ дойдут 12.5 фотоэлектрона, которые распределятся пропорционально перекрытию пространства между соседними КФЭУ. Чтобы на матрице проходил трек по всей поверхности, необходимо зарегистрировать энерговыделение в 400–600 МэВ.



**Рис. 10.** Возможные положения треков на матрице по отдельным КФЭУ при энерговыделении 80 МэВ на удалении 10 м

Длину трека на матрице можно увеличить за счет увеличения фокусного расстояния линзы Френеля. Например, если фокусное расстояние увеличить с 90 до 180 мм, то длина трека изменится с 0.6 до 1.2 мм. При этом среднее количество фотонов, приходящих на 1 КФЭУ, упадет вдвое. Но если увеличить вдвое диаметр линзы Френеля, то апертура увеличится в 4 раза, а амплитуда увеличится вдвое. Однако нельзя сильно увеличивать апертуру линзы из-за нарушения фокусировки.

## 5 Заключение

Полученные результаты при работе с прототипом детектора килотонного размера дают уверенность в возможности использования КФЭУ в таких детекторах, особенно учитывая факт бурного развития этого направления. Уже сейчас привлекательным обстоятельством является низкое напряжение питания (ниже 30 В для SensL), непревзойденная скорость срабатывания (доли наносекунды), возможность изготовления КФЭУ большой площади, возможность кодирования попадания усредненной точки пучка фотонов и т. д.

Детекторы килотонного масштаба необходимы для детектирования слабо взаимодействующих частиц. В свою очередь, детекторы бывают сцинтилляционными, черенковского излучения (чаще всего с использованием сверхчистой воды) и комбинированными. Черенковское излучение позволяет определить направление прихода заряженной частицы. Кроме того, современные детекторы весьма чувствительные. Например, Камиоканде II, Супер-Камиоканде и KamLAND имеют соответственно пороги чувствительности 7.5, 5.5 и 1 МэВ. Это достаточно для регистрации коллапса звезд. Создание установок большого объема является необходимым для дальнейшего развития нейтринной астрофизики низких энергий. Детекторы на основе *вакуумных* ФЭУ достигли высокого совершенства, но это только один из возможных путей развития нейтринной астрофизики. Другой путь – это применение *кремниевых* ФЭУ, которые по некоторым параметрам уже опережают вакуумные ФЭУ и продолжают совершенствоваться.

Основные проблемы, которые предстоит решить при разработке детектора большого объема:

- эффективная система сбора фотонов. Возможно потребуются разбиение огромного объема детектора на некоторое количество более мелких. Это позволит уменьшить максимальное расстояние до мест образования треков. При этом увеличится длина трека на матрице и возрастет число фотонов достигших матриц;
- определение оптимальной апертуры для килотонного детектора или его составных частей (для случая, если он будет разделен на какое-то число частей);
- снижение уровня шумов детекторов за счет охлаждения сцинтилляторов и КФЭУ, совершенствования технологии, улучшения световых свойств сцинтиллятора и его прозрачности. Уже сейчас в стране имеется сцинтиллятор с прозрачностью 18 м (Новикова, 2018). Несколько лет используется охлаждение КФЭУ с помощью элементов Пельтье;
- исследования показали, что применение конусов Винстона для матриц КФЭУ не дает положительного эффекта из-за отсутствия оптических свойств, подобных линзам, но для одиночных КФЭУ их можно применять, т. к. они позволяют собрать фотоны из заданного углового направления.
- оптимизация системы сбора и обработки потока данных. Сюда также можно включить улучшение оптических схем сбора информации;
- разработка методики построения изображения треков зарегистрированных в детекторе частиц.

На основании исследований, проведенных в БНО ИЯИ, и анализа проектов других научных коллективов можно сделать вывод, что матрицы из кремниевых ФЭУ, благодаря ряду технических параметров (высокий квантовый выход, большой коэффициент усиления, низкое напряжение питания, высокое временное разрешение, компактные размеры, уменьшение их стоимости при массовом производстве), имеют большие перспективы при разработке детекторов килотонного масштаба.

**Благодарности.** Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при поддержке РФФИ (грант 16-29-13034).

## Литература

- Новикова Г.Я., 2018. Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т. 49. Вып. 4. С. 1360. [Novikova G., 2018. Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra, vol. 49, no. 4, pp. 1360–1373. (In Russ.)]
- Dzaparova I.M., Volchenko V.I., Gangapshev A.M., et. al., 2018. Phys. Part. Nucl., vol. 49, no. 1, pp. 21–22. doi:10.1134/S1063779618010070.
- Petkov V.B., 2016. Phys. Part. Nucl., vol. 47, no. 6, pp. 975–979.
- Yanin A.F., Dzaparova I.M., Gorbacheva E.A., et al., 2018. Proceedings of The International Conference held 2–8 July 2018. SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), pp. 231–239.

## Prospects for scintillation detectors based on silicon PMT matrices

*A. Yanin<sup>1</sup>, I. Dzaparova<sup>1,2</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

*yanin@yandex.ru*

<sup>2</sup> Institute of Astronomy RAS, Pyatnitskaya street 48, Moscow 119017, Russia

*vpetkov@inr.ru*

**Abstract.** This paper discusses the prototype liquid scintillator detector, how information can be read out from it, and the possibility of using Winston cones and Fresnel lenses. Applications of Fresnel lenses and Cherenkov radiation for kiloton size detectors have been evaluated. The system of collecting information uses the 128-channel system of collecting data MDU3-GI64X2 firm AiT Instruments. Two ArrayJ-60035-64P-PCB arrays (firm SensL, Ireland) consisting of 64 individual silicon photomultiplier tubes (SiPMT) of J series were used as receiving devices. Using photodetectors based on such matrices in scintillation detectors will allow one to obtain images (snapshots) of events, whose analysis can give a fundamental opportunity to separate different classes of events in the detectors.

**Key words:** Fresnel lens, Winston cone, collection system