

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 681.2

ЖИДКОСТНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА “Ковер-3”

© 2019 г. Ю. З. Афашоков, Д. Д. Джаппуев, Н. Ф. Клименко,
А. У. Куджаев*, О. И. Михайлова, М. М. Хаджиев

Институт ядерных исследований РАН
Россия 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

* e-mail: kudjaev@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.2018 г.

После доработки 10.05.2018 г.

Принята к публикации 27.06.2018 г.

Описывается новый жидкостный сцинтилляционный детектор, созданный на ливневой установке “Ковер-2” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Детекторы этого типа будут установлены в модулях наземной части новой установки “Ковер-3”, которая будет использоваться для исследования галактического диффузного γ -излучения с энергией первичных γ -квантов $E_\gamma > 100$ ТэВ. Для данного детектора наиболее вероятная амплитуда сигнала от широких атмосферных ливней равна ~ 13 мВ, а энергетическое разрешение составляет $\sim 42\%$. Неоднородность коэффициента светосбора 0.26. Число фотоэлектронов на фотокатоде составляет ~ 360 . Детектор прост при эксплуатации. Стоимость его намного ниже традиционного сцинтилляционного детектора, используемого на нашей установке.

DOI: 10.1134/S0032816219010014

Интерес к поиску первичного γ -излучения с энергией выше 100 ТэВ заметно возрос в последнее время в связи с результатами эксперимента IceCube, в котором были зарегистрированы высокоэнергичные нейтрино астрофизического происхождения. В работе [1] было показано, что если такие нейтрино являются результатом распадов заряженных пионов в Галактике, то должны существовать и нейтральные пионы тех же энергий, распад которых дает заметный поток γ -излучения в диапазоне энергий $10^{14} - 5 \cdot 10^{17}$ эВ. Предсказанный в нашей работе [2, 3] поток космического диффузного γ -излучения галактического происхождения близок к имеющимся экспериментальным ограничениям в диапазоне ниже примерно 5 ПэВ и может быть зарегистрирован в эксперименте “Ковер-3”. Ливневая установка “Ковер-3” создается на основе ныне действующей установки “Ковер-2” [4]. Она предназначена для исследования мюонной и адронной компонент широких атмосферных ливней (ш.а.л.). “Ковер-3” предполагает поэтапное увеличение непрерывной площади мюонного детектора (м.д.) сначала до 410 м², а в дальнейшем — до 615 м². Для увеличения площади регистрации ш.а.л. будут дополнительно установлены еще 20 модулей, в которых будет размещено по 18 жидкостных сцинтилляционных детекторов площадью 0.5 м² каждый.

В настоящее время в подземных туннелях м.д. уже установлено 410 сцинтилляционных детекторов с общей непрерывной площадью 410 м², которые полностью укомплектованы электроникой. Ведется работа по ее наладке и по созданию системы сбора информации для данной конфигурации м.д.

Для модулей наземной части установки “Ковер-3” был создан детектор с жидким сцинтиллятором в пластиковых бутылках (рис. 1). Детектор представляет собой контейнер размером 66 × 74 × 30 см, собранный из фанеры толщиной 10 мм. На дне детектора расположено 10 пластиковых бутылок, уложенных в 2 ряда. Каждая бутылка имеет размеры 0.14 × 0.14 × 0.31 м, в которые залит сцинтиллятор на основе реактивного топлива Т-6 с плотностью 0.82 г/см³. Сцинтиллирующей добавкой служит РРО (1 г/л), а смесителем спектра — РОРОР(0.03 г/л). Светозащитный кожух с ФЭУ-49, фотокатод которого имеет $\varnothing 15$ см, вместе с панелью делителя крепится к контейнеру детектора. Этот фотоэлектронный умножитель просматривает весь объем детектора. В качестве светоотражающей внутренней поверхности нового детектора в одном случае использовался слой белой краски, нанесенной на поверхность, а в другом случае алюминиевая фольга.

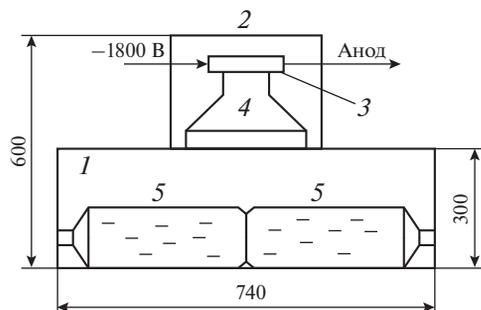


Рис. 1. Конструкция нового жидкостного сцинтилляционного детектора. 1 – фанерный контейнер; 2 – светозащитный кожух; 3 – делитель высокого напряжения; 4 – ФЭУ-49; 5 – пластиковые бутылки с жидким сцинтиллятором.

На рис. 2 спектр 1 соответствует энерговыделению от одиночных мюонов, когда вместо жидкостного сцинтиллятора используется сцинтиллятор, состоящий из гранул на основе полистирола $\varnothing 4$ и высотой 2 мм. Высота сцинтиллятора составляла 14 см. Этот спектр представляет собой экспоненциальную кривую без явно выраженного максимума, который соответствует энерговыделению от одного релятивистского мюона.

Спектр 2 соответствует энерговыделению от одиночных мюонов для стандартного пластического детектора, представляющего собой квадратный поддон размером $1005 \times 1005 \times 50$ мм. По периметру к поддону прикрепляется диффузор, имеющий форму усеченной пирамиды, высотой 450 мм. Светозащитный кожух с ФЭУ-49 и панель делителя напряжения крепятся к диффузору. Наиболее вероятная амплитуда релятивистского мюона ~ 5 мВ. Неоднородность светосбора составляет 20%, а энергетическое разрешение равно 48%. Спектры 3 и 4 соответствуют жидкостному детектору, внутренняя поверхность которого покрашена белой краской и покрыта алюминиевой фольгой соответственно. Спектры измерялись с помощью осциллографа LECROY WaveJet при напряжении на входе делителя детектора $U = -1800$ В. Из рис. 2 следует, что при покрытии внутренней поверхности детектора алюминиевой фольгой имеем максимальный эффект по светосбору от прохождения релятивистского мюона через сцинтиллятор. Как видно, максимум спектра 3 соответствует ~ 8.5 мВ (наиболее вероятное значение амплитуды сигнала для одиночного мюона), а спектра 4 – 12.5 мВ, т.е. в спектре 2 наиболее вероятная амплитуда сигнала от одиночного мюона на 32% больше, чем в спектре 1. Отсюда следует, что в качестве отражателя в новом детекторе следует использовать алюминиевую фольгу. Полученное энергетическое разрешение для разработанного детектора составляет $\sim 42\%$.

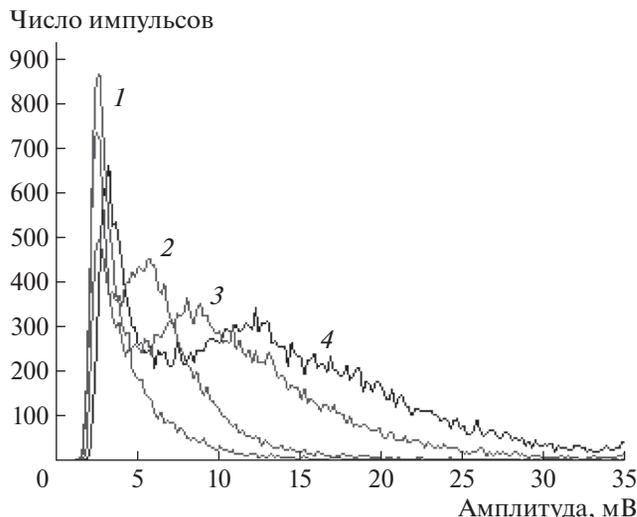


Рис. 2. Сравнение амплитудных спектров для одиночных мюонов, измеренных детектором: 1 – в качестве сцинтиллятора используется гранулированный сцинтиллятор на основе полистирола, 2 – стандартный пластический детектор, 3 – внутренняя поверхность детектора покрыта белой краской, 4 – внутренняя поверхность детектора покрыта алюминиевой фольгой.

Неоднородность светосбора детектора была измерена с помощью радиоактивного источника ^{137}Cs (энергия γ -линии 0.661 МэВ с активностью $2.2 \cdot 10^8$ Бк). Измерения анодного тока проводилось через каждые 6 см в диапазоне расстояний $0-50$ см от центра детектора. Сигнал с токового выхода делителя измерялся стрелочным микроамперметром, точность измерения которого составляет не менее 1%.

Неоднородность коэффициента светосбора вычисляется по формуле

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

где I_{\max} – максимальное значение тока, I_{\min} – минимальное значение тока при помещении источника на углу детектора в предположении, что размер светового пятна стремится к нулю. По результатам измерений была вычислена неоднородность коэффициента светосбора детектора, которая оказалась равной 0.32. Кроме этого неоднородность коэффициента светосбора была измерена с помощью мюонов космических лучей. Неоднородность коэффициента светосбора была также определена путем измерения положения максимума спектра мюонов при их прохождении через различные точки детектора. Место прохождения мюонов выбиралось с помощью управляющего сигнала от маленького счетчика с размерами сцинтиллятора $14 \times 14 \times 5$ см. Счетчик передвигался по диагонали детектора с шагом 6 см. В этом

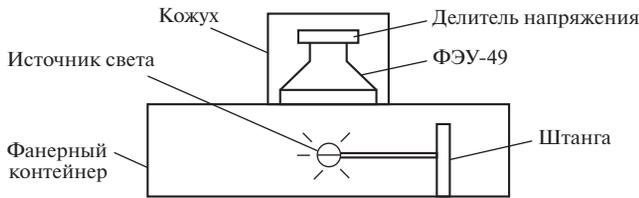


Рис. 3. Схема для определения коэффициента светосбора детектора.

случае величина неоднородности оказалась равной 0.26.

Для измерения абсолютной величины коэффициента светосбора был изготовлен квазиизотропный источник света $\varnothing 4.0$ см с полостью внутри $\varnothing 1.5$ см, в которую помещался радиоактивный источник ^{137}Cs в форме таблетки с активностью 10^6 Бк. Источник света укреплялся на подставке на различных расстояниях от ФЭУ-49 (рис. 3).

На рис. 4 представлена зависимость анодного тока ФЭУ-49 от телесного угла Ω , под которым виден фотокатод из точки, где расположен источник. Этот ток является суммой токов от прямого и отраженного света и определяется по формуле

$$I = I_0 \left[\frac{\Omega}{4\pi} + k \left(1 - \frac{\Omega}{4\pi} \right) \right], \quad (2)$$

где k – коэффициент светосбора, I_0 – ток при $\Omega = 4\pi$ ср. Значение тока I_0 можно получить путем экстраполяции прямой на рис. 4 к точке, соответствующей $\Omega = 4\pi$ ср. Полученное таким образом из формулы (2) значение коэффициента светосбора $k = 3.3\%$.

Калибровка детектора может быть осуществлена с помощью проникающих заряженных частиц космических лучей. При прохождении через детектор релятивистской заряженной частицы ионизационные потери составляют 2 МэВ см²/г. Тогда для детектора толщиной 11.5 г/см² и угловым распределении мюонов $\sim \cos^2\theta$ средняя потерянная энергия в сцинтиляторе составит 30.6 МэВ. Для реактивного топлива Т-6 энерговыделение от релятивистского мюона, идущее на образование одного фотона, составляет около 160 эВ, а число фотоэлектронов на фотокатоде ФЭУ-49 при этом равно

$$N = \frac{30.6 \cdot 10^6}{160} K \eta F, \quad (3)$$

где K – коэффициент светосбора детектора, $\eta = 0.1$ – квантовая эффективность фотокатода, F – коэффициент, учитывающий долю света, выходящего из сцинтиллятора. Согласно [5] для сцинтиллятора прямоугольной формы (без учета поглощения

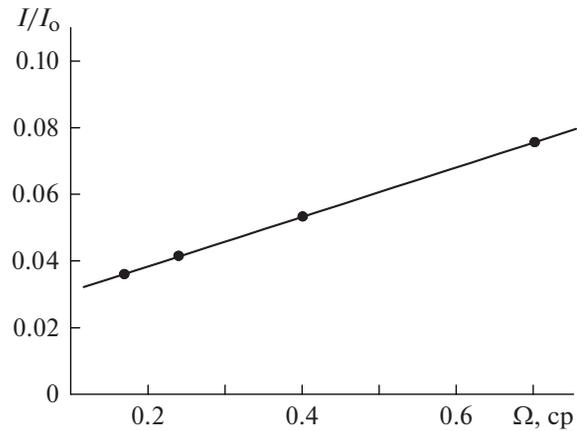


Рис. 4. К определению коэффициента светосбора.

света в сцинтиляторе и неоднородности светосбора) коэффициент

$$F = 3 \left(1 - \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} \right), \quad (4)$$

где n – показатель преломления света в сцинтиляторе. При $n = 1.5$ имеем $F = 0.76$. Точно учесть и принять в расчет поглощение света в сцинтиляторе и неоднородности светосбора в углах детектора трудно, поэтому величина $F = 0.5$ представляется разумной. Для полученной ранее оценки коэффициента светосбора ($K = 0.033$) имеем:

$$N = \frac{30.6 \cdot 10^6}{160} 0.033 \cdot 0.1 \cdot 0.5 = 315 \text{ фотоэлектронов.} \quad (5)$$

Величина наиболее вероятного энерговыделения, соответствующая прохождению одной частицы в числе фотоэлектронов с фотокатода ФЭУ-49 для нового детектора, была определена подсвечиванием фотокатода ФЭУ-49 вспышкой постоянной интенсивности от светодиода L-71113PVC и измерением ширины на половине высоты. Среднее число фотоэлектронов определяется по формуле

$$N = \frac{(2.36)^2 k}{\left(\frac{\Delta A_{1/2}}{A_{\max}} \right)^2}, \quad (6)$$

где $k = 2$ – коэффициент, учитывающий дисперсию числа фотоэлектронов на первом диноде ФЭУ-49 [6]. Величина N оказалась равной ~ 360 фотоэлектронов. Полученное число в 1.14 раза больше предложенной оценки ($N = 315$). Это расхождение можно объяснить тем, что при оценке числа фотоэлектронов или использован заниженный коэффициент светосбора, или занижена доля света, выходящего из жидкого сцинтиллято-

ра. Энергетическое разрешение детектора в общем случае зависит от флуктуаций ионизационных потерь, коэффициента светосбора, неоднородности и от флуктуаций числа фотоэлектронов на детекторе ФЭУ-49. Среднеквадратическая величина энергетического разрешения детектора

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = 0.24, \quad (7)$$

где $\sigma_1 = 0.18$ – среднеквадратичная ошибка ионизационных потерь Ландау, $\sigma_2 = 0.16$ – среднеквадратичная ошибка, обусловленная неоднородностью светосбора, $\sigma_3 = 0.05$ – среднеквадратичная ошибка числа фотоэлектронов.

Неоднородность детектора можно улучшить, если использовать пластиковые бутылки с меньшим размером горлышка. Новый жидкостный сцинтилляционный детектор намного дешевле пластикового сцинтилляционного детектора.

Работа выполнена на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН при поддержке Программы фундаментальных научных исследований Президиума РАН “Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии” и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-29-13049 и 16-02-00687).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalashov O.E., Troitsky S.V.* // JETP Lett. 2016. V. 100. P. 761 [arXiv: 1410. 2600]
2. *Джаппуев Д.Д., Петков В.Б., Лидванский А.С., Волченко В.И., Волченко Г.В., Горбачева Е.А., Дзаярова И.М., Куджаев А.У., Клименко Н.Ф., Куреня А.Н., Михайлова О.И., Птицина К.В., Хаджиев М.М., Янин А.Ф.* // Изв. РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 4. С. 461. [https://doi.org/doi 10.7868/S0367676517040159](https://doi.org/doi%2010.7868/S0367676517040159)
3. *Dzhappuev D.D., Petkov V.B., Lidvansky A.S., Volchenko V.I., Volchenko G.V., Gorbacheva E.A., Dzaparova I.M., Klimenko N.F., Kudzhaev A.U., Kurenya A.N., Mikhailova O.I., Ptitsyna K.V., Khadzhiiev M.M., Yanin A.F.* // Conf. Series. 2017. V. 798. P. 012028.
4. *Джаппуев Д.Д., Алексеенко В.В., Волченко В.И., Волченко Г.В., Гулиев Ж.Ш., Гулиева Е.В., Коновалов Ю.Н., Куджаев А.У., Лидванский А.С., Михайлова О.И., Петков В.Б., Смирнов Д.В., Степанов В.И., Стенькин Ю.В., Хаердинов Н.С.* // Изв. РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71. № 4. С. 542.
5. *Keil G.* // Nucl. Instrum and Methods. 1970. V. 89. P. 111.
6. *Дадыкин В.Л., Цябук А.Л.* // ПТЭ. 1980. № 6. С. 41.