

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХКАНАЛЬНОГО  
СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

© 2022 г. В. И. Алексеев<sup>а</sup>, В. А. Басков<sup>а,\*</sup>, Е. А. Варфоломеева<sup>б</sup>, В. А. Дронов<sup>а</sup>,  
А. И. Львов<sup>а</sup>, А. В. Кольцов<sup>а</sup>, Ю. Ф. Кречетов<sup>с</sup>, В. В. Полянский<sup>а</sup>, С. С. Сидорин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

<sup>б</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”  
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

<sup>с</sup> Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

\*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

Поступила в редакцию 03.02.2022 г.

После доработки 09.02.2022 г.

Принята к публикации 07.03.2022 г.

Представлены результаты калибровок двухканального сцинтилляционного спектрометра толщиной  $0.5X_0$ , выполненных на космических мюонах и пучке вторичных квазимоноэнергетических электронов с энергиями от 3 до 100 МэВ ускорителя “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Регистрация световых сигналов в спектрометре осуществлялась фотоэлектронными умножителями ФЭУ-52. Обнаружено, что зависимости относительного энергетического разрешения отдельных каналов спектрометра от энергии электронов идентичны. При энергии электронов  $E \approx 32$  МэВ относительные энергетические разрешения каналов спектрометра составили  $\sim 11\%$ , а суммы сигналов обоих каналов  $\sim 7\%$ .

DOI: 10.31857/S0032816222040152

На тормозном пучке фотонов с энергией до 500 МэВ ускорителя “Пахра” ФИАН создана экспериментальная установка, предназначенная для поиска ранее не наблюдавшихся, относительно легких долгоживущих заряженных частиц  $\ell^\pm$  с массой, лежащей между массой электрона и мюона или “аномальных лептонов” [1].

Для определения импульса и энергии частиц, вылетающих из мишени, используется времяпролетная методика. Электрон и более тяжелый лептон при одинаковом импульсе будут различаться скоростями и, соответственно, временами пролета от мишени до точки регистрации. Поэтому установка включает в себя системы, определяющие время пролета, импульс и энергию регистрируемых частиц.

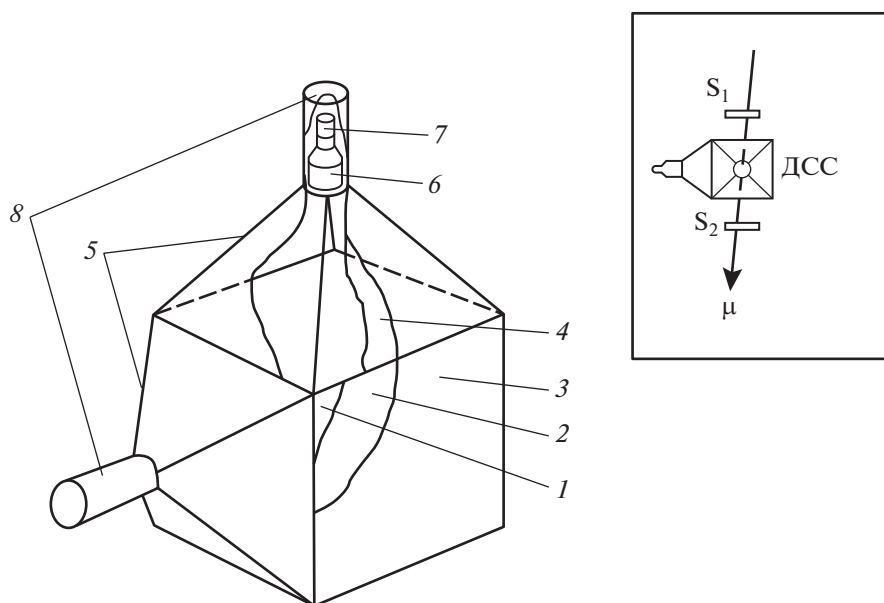
Для определения энергии продуктов взаимодействия фотонного пучка с экспериментальной мишенью в диапазоне энергий до 40 МэВ на основе элемента многоканального сцинтилляционного спектрометра (МСС) [2] создан двухканальный сцинтилляционный спектрометр (ДСС) (рис. 1).

ДСС является сцинтилляционным блоком размером  $200 \times 200 \times 200$  мм, его толщина составляет  $0.5X_0$ , где  $X_0$  – радиационная длина (для пла-

стического сцинтиллятора  $X_0 \approx 40$  см [3]). ДСС с двух сторон просматривается двумя спектрометрическими фотоумножителями ФЭУ-52, которые расположены таким образом, чтобы траектории ливневых частиц электромагнитного ливня, разбиваемого в блоке, были параллельны фотокатодам ФЭУ. Один ФЭУ расположен на верхней грани сцинтилляционного блока и “просматривает” объем блока в направлении вертикальной оси (первый канал), второй ФЭУ размещен на горизонтальной грани сцинтилляционного блока, параллельной траектории регистрируемых частиц, и “просматривает” объем блока в направлении горизонтальной оси, перпендикулярной траектории частиц (второй канал).

Для эффективного собирания света ФЭУ, возникающего в значительном объеме блока от прохождения заряженных частиц, используются светосборники с отражателями на основе металлизированного майлара. Расстояние от фотокатодов ФЭУ-52 до грани сцинтиллятора составляет 10 см. Для формирования сигналов в обоих ФЭУ используются стандартные делители напряжения.

Предварительная калибровка ДСС была выполнена с помощью космических мюонов (встав-



**Рис. 1.** Схема двухканального сцинтиляционного спектрометра (светонепроницаемый корпус не показан). 1 – сцинтиляционный блок; 2 и 4 – металлизированный майлар; 3 – черная бумага; 5 – светосборники; 6 – ФЭУ-52; 7 – делитель напряжений ФЭУ-52; 8 – корпуса ФЭУ. На вставке:  $S_1$  и  $S_2$  – сцинтиляционные счетчики; ДСС – двухканальный сцинтиляционный спектрометр.

ка к рис. 1). Целью калибровки являлось определение величин напряжений, при которых относительное энергетическое разрешение каналов ДСС минимальное.

Среднее энерговыделение, которое оставляет космический мюон в объеме ДСС, составляет около  $E \approx LdE/dx = 20 \cdot 2 \approx 40$  МэВ, где  $L = 20$  см – толщина ДСС,  $dE/dx = 2$  МэВ/см – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в сцинтиляторе.

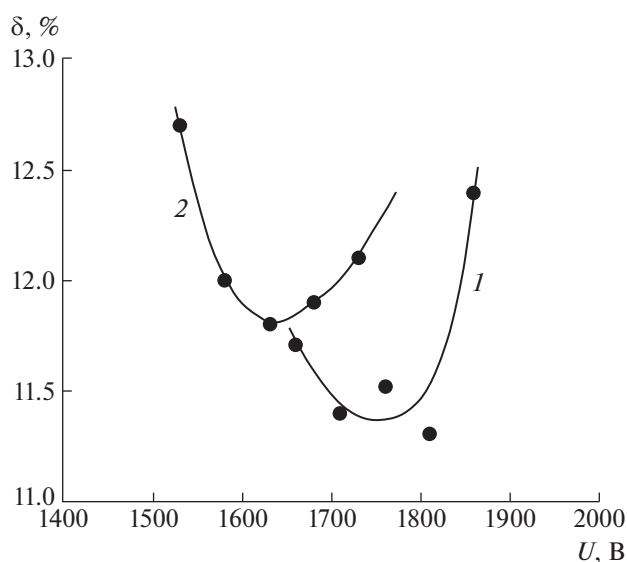
При максимальных исследованных напряжениях  $U_1 = 1730$  В и  $U_2 = 1830$  В на делителях ФЭУ каналов ДСС средняя величина каналов амплитудных спектров космических мюонов за вычетом пьедестала зарядоцифрового преобразователя (ЗЦП) составляла  $\sim 350$  каналов при диапазоне ЗЦП 512 каналов. Диапазон рабочих напряжений обоих каналов составил около 250 В (для первого канала от  $\sim 1500$  до  $\sim 1750$  В, для второго – от  $\sim 1600$  до 1850 В).

Зависимости относительных амплитудных разрешений  $\delta_{1(2)}$  каналов ДСС от напряжений на делителях напряжений представлены на рис. 2 ( $\delta_{1(2)} = \sigma_{1(2)} / \langle A_{1(2)} \rangle = [(\Delta A_{1(2)} / \langle A_{1(2)} \rangle) / 2.35] \cdot 100\%$ , где  $\sigma_{1(2)}$  – стандартное отклонение средней амплитуды сигналов амплитудного спектра первого (второго) канала;  $\Delta A_{1(2)}$  – полная ширина на половине высоты амплитудного спектра сигналов с ФЭУ первого (второго) канала;  $\langle A_{1(2)} \rangle$  – средняя амплитуда в амплитудном спектре первого (второго) канала; 2.35 – коэффициент пропорцио-

нальности, определяющий взаимосвязь между величинами  $\Delta A_{1(2)}$  и  $\sigma$ :  $\Delta A_{1(2)} = \sigma \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \ln 2 \approx 2.35\sigma$  [4]. Видно, что амплитудные разрешения в исследованных диапазонах напряжений изменяются слабо, в пределах  $\sim 1\%$  (от 11.3% до 12.3% для первого канала и от 11.8% до 12.7% для второго канала). Наилучшие величины относительных амплитудных разрешений первого и второго каналов при использовании ФЭУ-52 составили 11.3% и 11.8% соответственно. Относительное амплитудное разрешение суммы сигналов двух каналов ДСС составило  $\sim 10\%$ .

Основная энергетическая калибровка ДСС была выполнена на пучке вторичных квазимоноэнергетических электронов с энергиями от  $\sim 3$  до  $\sim 100$  МэВ ускорителя “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Схема калибровки представлена на рис. 3. Электроны, возникшие в результате взаимодействия фотонного пучка с медным конвертором, расположенного на срезе плюсов магнита СП-3, отклонялись магнитным полем в свинцовый коллиматор К с диаметром входного отверстия  $\varnothing 10$  мм и толщиной 50 мм. Коллиматор расположен в свинцовой защитной стенке перед ДСС и установлен под углом  $\varphi = 46^\circ$  относительно первичной траектории фотонов на расстоянии 1 м от центра полюсов магнита. Интенсивность электронного пучка составляла  $\sim 10^2 e^-/c$ .

Блок-схема калибровки ДСС представлена на рис. 4. Сигналы с триггерных счетчиков  $S_1$  и  $S_2$

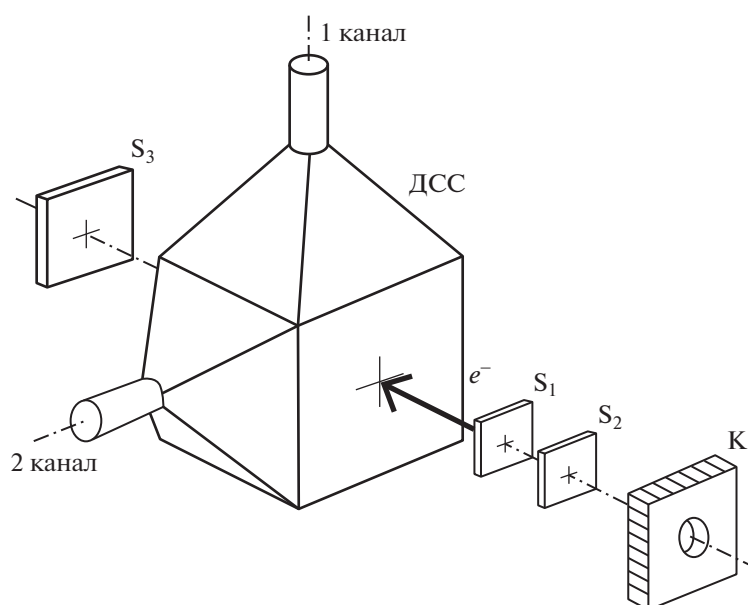


**Рис. 2.** Зависимости относительного амплитудного разрешения  $\delta$  каналов ДСС от напряжения на делителях напряжения ФЭУ: 1 – первый канал, 2 – второй канал.

размером  $15 \times 15 \times 1$  мм через формирователи  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и задержки  $Z_1$  и  $Z_2$  подавались на входы схемы совпадений СС. Длительность сигналов составляла 20 нс. Сигнал со схемы совпадений СС длительностью 120 нс являлся триггерным сигналом *Start* для запуска 8-входового зарядоцифрового преобразователя (ЗЦП), на входы “Анализ” которого через блоки задержек  $Z_3$  и  $Z_4$  подавались

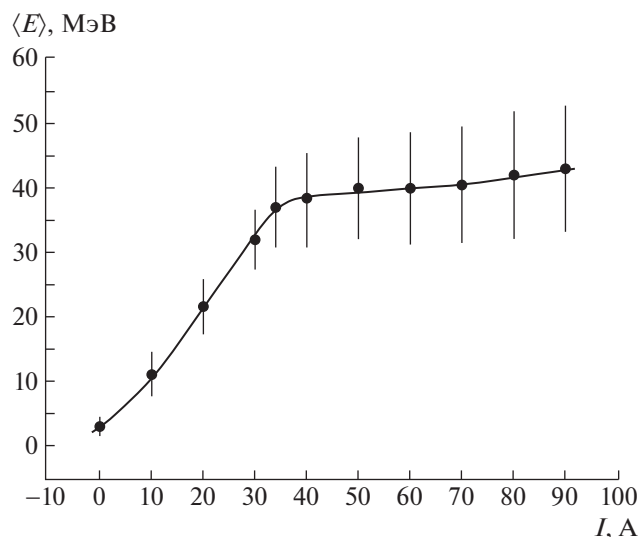
сигналы от двух каналов ДСС. *Start* являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контроллер системы САМАС осуществлялась “запись” сигналов с ДСС в память компьютера. В счетчиках  $S_1$  и  $S_2$  использовались фотоумножители ФЭУ-85 с напряжением питания на делителях  $U = 1000$  В.

При энергии электронов больше 40 МэВ электромагнитные ливни, возникающие при взаимодействии электронов с ДСС, начинают выходить из сцинтилляционного блока. Для контроля потока электронов, потерявших не всю энергию в ДСС, за ДСС расположен сцинтилляционный счетчик  $S_3$  размером  $70 \times 70 \times 5$  мм. Сигнал с  $S_3$  формировался формирователем  $\Phi_3$  и через задержку  $Z_3$  подавался на блок времяцифрового преобразователя (ВЦП) с рабочим диапазоном шкалы 1024 канала и ценой деления 50 пс/канал. Стартом для запуска блока ВЦП являлся сигнал *Start*, сигналом *Stop* был сформированный сигнал  $S_3$ . По форме временного спектра и количеству событий в спектре контролировалась энергия электронов, а именно: при энергии электронов меньше 40 МэВ временной спектр практически отсутствовал, при энергии больше 40 МэВ начинал формироваться временной спектр, показывающий наличие частиц в задней полусфере ДСС. Наличие временного спектра указывало на величину энергии больше 40 МэВ. Чем больше энергия электронов, тем больше частиц должно выходить из ДСС и тем больше событий во временном спектре.



**Рис. 3.** Схема калибровки ДСС на пучке вторичных квазимонохроматических электронов ускорителя “Пахра” ФИАН. К – коллиматор;  $S_1$  и  $S_2$  – триггерные сцинтилляционные счетчики;  $S_3$  – сцинтилляционный счетчик доли энергии электромагнитного ливня, выходящего из двухканального сцинтилляционного спектрометра ДСС.





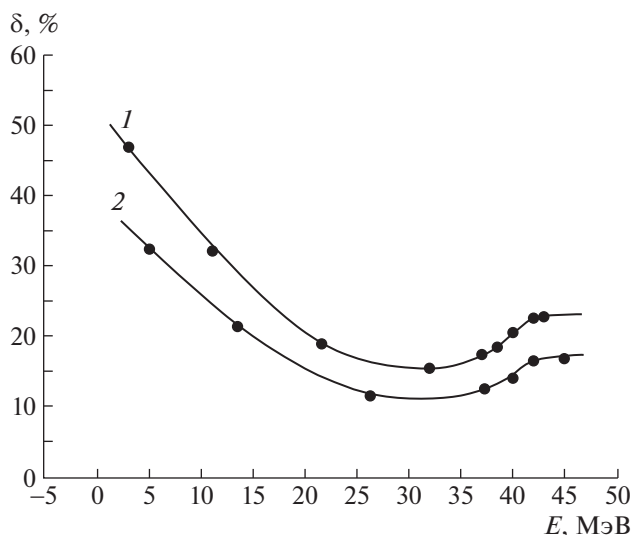
**Рис. 5.** Средняя энергия электронов, зарегистрированная вторым каналом ДСС, от тока магнита СП-3.

го из ДСС, к энерговыделению ливня, оставшегося в ДСС.

Исследована зависимость относительного энергетического разрешения ДСС в случае суммирования сигналов обоих каналов. Данная зависимость представлена на рис. 6 (кривая 2). Относительное энергетическое разрешение для суммы сигналов составило  $\sim 12\%$ .

С учетом относительного энергетического разрешения электронного пучка с энергией  $\approx 32$  МэВ, составившего, как указано выше,  $\sim 10\%$ , относительные энергетические разрешения каналов ДСС и суммы сигналов обоих каналов равны  $\sim 11$  и  $\sim 7\%$  соответственно.

Результаты калибровки двухканального сцинтиляционного спектрометра на пучке вторичных электронов на базе магнита СП-3 ускорителя “Пахра” показали, что в области энергий электронов до 40 МэВ, при которых проводился эксперимент по поиску “аномальных лептонов”, а именно от  $\sim 5$  до  $\sim 35$  МэВ, зависимость регистрируемой энергии от тока магнита СП-3 имеет линейный характер. Зависимости относительного энергетического разрешения отдельных каналов ДСС от энергии электронов практически идентичны. При энергии электронов  $E \approx 32$  МэВ отно-



**Рис. 6.** Зависимости относительного энергетического разрешения (без вычета относительного энергетического разрешения электронного пучка) от величины зарегистрированной средней энергии электронов для второго канала ДСС (1) и суммы сигналов двух каналов (2).

сительные энергетические разрешения каналов ДСС и суммы сигналов обоих каналов составили  $\sim 11$  и  $\sim 7\%$  соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., Krechetov Yu.F., L'vov A.I., Pavlyuchenko L.N., Polyanskiy V.V., Sidorin S.S.* // EPJ Web of Conferences (Baldin ISHEPP XX-IV). 2019. V. 204. P. 08009. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920408009>
2. *Алексеев В.И., Басков В.А., Варфоломеева Е.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С.* // ПТЭ. 2021. № 5. С. 28. <https://doi.org/10.31857/S0032816221050013>
3. Particle Data Group. *Tanabashi M. et al.* // Phys. Rev. 2018. V. 98. D. 030001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001>
4. *Grupen C.* Particle detectors. Cambridge, University Press, 1996.
5. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В.* // ПТЭ. 2020. № 5. С. 10. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050079>