

УДК 539.1.08

## СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ АМПЛИТУДНО-КООРДИНАТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР

© 2024 г. В. И. Алексеев<sup>а</sup>, В. А. Басков<sup>а,\*</sup>, В. А. Дронов<sup>а</sup>, А. И. Львов<sup>а</sup>, А. В. Кольцов<sup>а</sup>,  
Ю. Ф. Кречетов<sup>б</sup>, В. В. Полянский<sup>а</sup>, С. С. Сидорин<sup>а</sup>, Е. А. Хафизова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53  
<sup>б</sup>Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6  
\*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

Поступила в редакцию 03.08.2023 г.

После доработки 13.08.2023 г.

Принята к публикации 22.09.2023 г.

Представлены результаты калибровки на космическом излучении сцинтилляционного амплитудно-координатного спектрометра толщиной  $0.58X_0$ . Регистрация световых сигналов в спектрометре осуществлялась фотоэлектронными умножителями ФЭУ-49 и ФЭУ-85, определяющими амплитудную и координатную системы, соответственно. Обнаружено, что относительное амплитудное и координатное разрешения зависят от точки прохождения частиц через спектрометр. Наилучшие относительное амплитудное и координатное разрешения определены в центре спектрометра и составили примерно 8.7% и 1.6 см соответственно.

DOI: 10.31857/S0032816224030017 EDN: OWAKWX

### 1. ВВЕДЕНИЕ

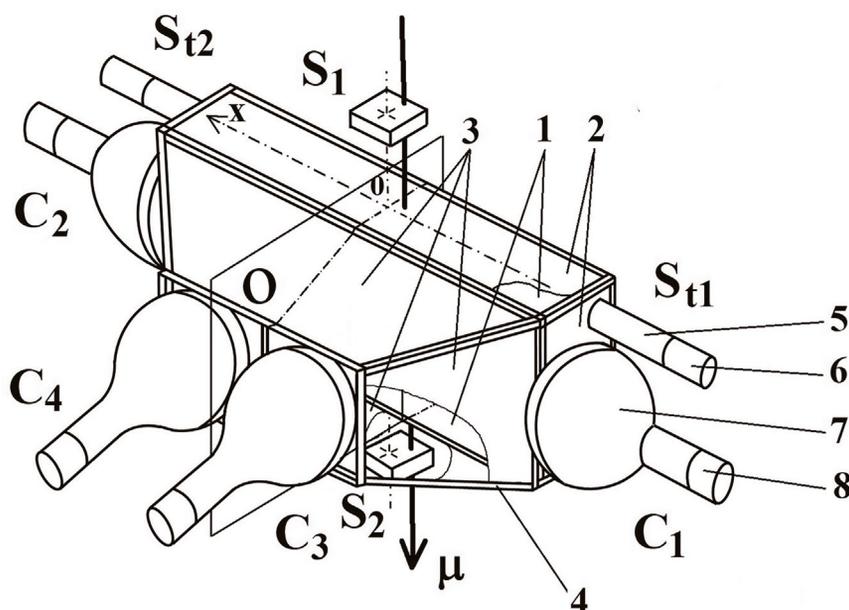
На тормозном пучке фотонов ускорителя С-25Р “Пахра” ФИАН с энергией до 500 МэВ создана экспериментальная установка, предназначенная для поиска ранее не наблюдавшихся относительно легких долгоживущих заряженных частиц  $l^\pm$  с массой около 9 МэВ или “аномальных лептонов” [1, 2].

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

Энергия частиц, вылетевших из мишени и сепарируемых магнитом, находится в диапазоне до 50 МэВ. Для их регистрации используется сцинтилляционный спектрометр (СС). Модельные расчеты показывают, что для надежного выделения энергетического пика “аномальных лептонов” погрешность определения энергии регистрируемых СС частиц должна составлять менее 10%. В процессе эксперимента конструкция СС постоянно совершенствуется с целью получения требуемой точности [3, 4].

### 2. КОНСТРУКЦИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО АМПЛИТУДНО- КООРДИНАТНОГО СПЕКТРОМЕТРА

В данной работе представлены характеристики новой конструкции сцинтилляционного ам-



**Рис. 1.** Схема сцинтиляционного амплитудно-координатного спектрометра (светонепроницаемый корпус не показан): 1 — сцинтиляционный блок, 2 — отражатель из бумаги для копирования, 3 — металлизированный фольга, 4 — металлический каркас, 5 — ФЭУ-85, 6 — делитель напряжения ФЭУ-85, 7 — ФЭУ-49, 8 — делитель напряжения ФЭУ-49 ( $S_1$  и  $S_2$  — триггерные сцинтиляционные счетчики).

плитудно-координатного спектрометра (САКС), предназначенного для регистрации заряженных частиц, определения их энергии и координаты входа частицы в спектрометр (рис. 1). САКС является сцинтиляционным блоком 1 размером  $510 \times 145 \times 235$  мм<sup>3</sup> [5]. Регистрация световых вспышек, возникающих от взаимодействия заряженных частиц с блоком и входящих через грань размером  $510 \times 145$  мм<sup>2</sup>, осуществляется с помощью фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49 и ФЭУ-85 со стандартными делителями напряжения. Радиационная длина блока при таком варианте входа заряженных частиц составляет  $0.58X_0$ , где  $X_0$  — радиационная длина (для пластического сцинтиллятора  $X_0 \approx 40$  см [6]).

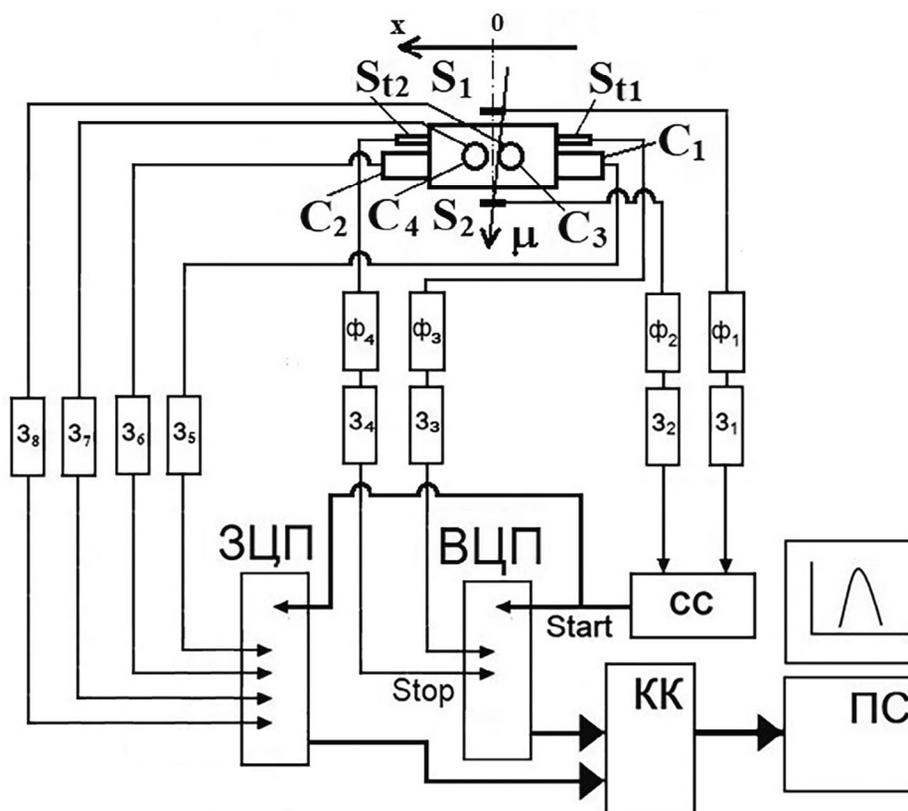
САКС состоит из амплитудной и координатной систем. Амплитудная система включает четыре фотоэлектронных умножителя ФЭУ-49, просматривающих сцинтиляционный блок с двух противоположных граней размером  $145 \times 235$  мм<sup>2</sup> (“горизонтальные”  $C_1$  и  $C_2$ ) и с верхней грани размером  $510 \times 235$  мм<sup>2</sup> (“вертикальные”  $C_3$  и  $C_4$ ). Горизонтальные ФЭУ непосредственно без смазки плотно прижаты к граням блока, вертикальные расположены в 16 см от верхней грани блока симметрично плоскости  $O$ , проходящей через центр симметрии блока и разделяющей блок на два равных по объему меньших блока размерами

$145 \times 255 \times 235$  мм<sup>3</sup> (рис. 1). В качестве отражателя света использована бумага для копирования 2, исключая верхнюю грань спектрометра и части боковых граней, занятых фотокатодами ФЭУ-49 и ФЭУ-85 (5 и 7). В качестве боковых отражателей для сбора света с верхней грани использована фольга 3. Все ФЭУ-49 отобраны по коэффициентам усиления и минимальному относительному амплитудному разрешению.

Координатная система состоит из двух ФЭУ-85 ( $S_{11}$  и  $S_{12}$ ), расположенных рядом с ФЭУ-49 и просматривающих сцинтиляционный блок с двух противоположных граней. ФЭУ-85 также без смазки плотно прижаты к граням блока. Как и в случае с ФЭУ-49, ФЭУ-85 были отобраны по критерию наилучшего временного разрешения, определяемого по полной ширине на половине высоты временного спектра при регистрации космических мюонов на установки отбора ФЭУ.

### 3. КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА

Предварительная калибровка САКС была выполнена на космическом излучении (рис. 1). Целью калибровки являлось определение зависимости энергетических и координатных характеристик САКС от точки входа мюонов в спектрометр.



**Рис. 2.** Блок-схема калибровки сцинтиляционного амплитудно-координатного спектрометра:  $S_1$  и  $S_2$  — триггерные сцинтиляционные счетчики,  $C_1$  —  $C_4$  — амплитудная система,  $S_{11}$  и  $S_{12}$  — координатная система,  $\Phi_1$  —  $\Phi_8$  — блоки формирователей,  $Z_1$  —  $Z_4$  — блоки задержек, СС — схема совпадений, ЗЦП — зарядо-цифровой преобразователь, ВЦП — время-цифровой преобразователь, *Start* — сигнал запуска блоков ЗЦП и ВЦП, *Stop* — временные сигналы со счетчиков координатной системы  $S_{11}$  и  $S_{12}$ , КК — крейт-контроллер системы САМАС, ПС — персональный компьютер.

Блок-схема калибровки САКС представлена на рис. 2. Сигналы с триггерных счетчиков  $S_1$  и  $S_2$  размером  $10 \times 10 \times 1$  см<sup>3</sup> через формирователи  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и задержки  $Z_1$ ,  $Z_2$  подавались на входы схемы совпадений СС. Длительность сигналов составляла 10 нс. Сигнал со схемы совпадений СС длительностью 350 нс являлся триггерным сигналом *Start* для запуска четырех блоков на входе зарядо-цифрового преобразователя (ЗЦП) и время-цифрового преобразователя (ВЦП). На входы *Stop* блока ВЦП через блоки формирователей  $\Phi_3$ ,  $\Phi_4$  и блоки задержек  $Z_3$ ,  $Z_4$  подавались сигналы от ФЭУ-85 координатной системы  $S_{11}$  и  $S_{12}$ . На входы ЗЦП через блоки задержек  $Z_5$  —  $Z_8$  подавались сигналы от четырех ФЭУ-49 амплитудной системы  $C_1$ — $C_4$ . Сигнал *Start* являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контроллер системы САМАС проводилась запись сигналов в память компьютера.

Среднее энерговыделение, которое оставлял космический мюон в объеме САКС, состав-

ляло около  $E \approx L \cdot dE/dx = 23.5 \cdot 2 \approx 47$  МэВ, где  $L = 23.5$  см — толщина САКС,  $dE/dx \approx 2$  МэВ/см — средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в сцинтилляторе [6].

Калибровка САКС на космическом излучении проходила в два этапа. На первом этапе последовательно были выравнены амплитуды сигналов всех ФЭУ-49 таким образом, чтобы амплитудный спектр с каждого ФЭУ был расположен в рабочей области ЗЦП. Выравнивание амплитуд сигналов происходило изменением величин напряжения на делителях напряжения всех ФЭУ. Временные спектры с ФЭУ-85 с помощью изменения величин задержек блоков  $\Phi_3$  и  $\Phi_4$  были также помещены в рабочие диапазоны обоих каналов ЗЦП.

На втором этапе происходила основная калибровка САКС, заключающаяся в определении амплитудных и координатных характеристик в зависимости от точки входа космических мю-

онов в спектрометр, которая осуществлялась изменением положений триггерных счетчиков относительно центра спектрометра на оси  $x$  (рис. 1 и 2).

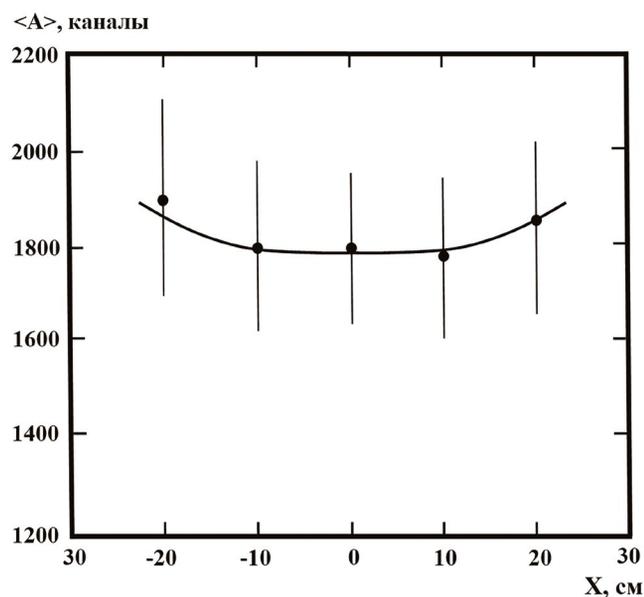


Рис. 3. Зависимость средней суммарной амплитуды четырех каналов САКС от точки входа космических мюонов в спектрометр.

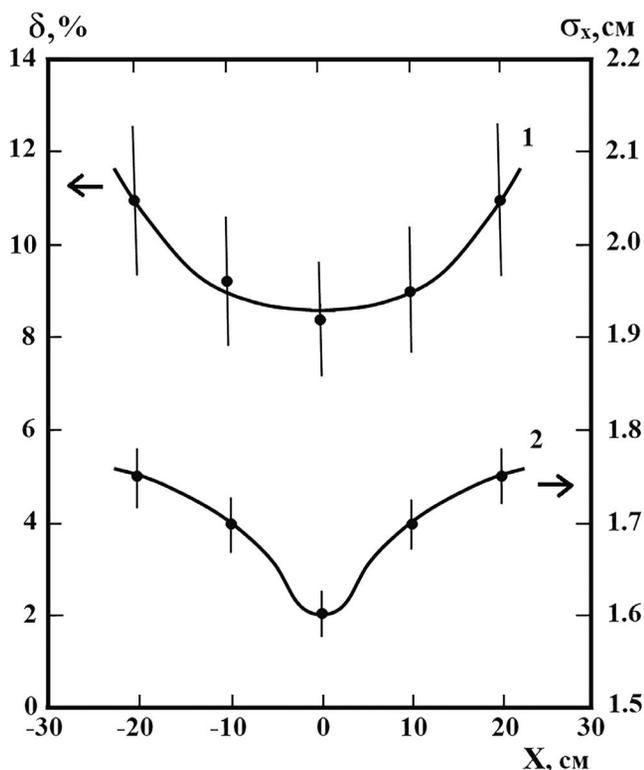


Рис. 4. Зависимость относительного амплитудного (кривая 1) и координатного (кривая 2) разрешений САКС от точки входа космических мюонов в спектрометр.

На рис. 3 представлена зависимость средней суммарной амплитуды четырех каналов САКС от точки входа космических мюонов в спектрометр. Видно, что диапазон изменений суммарной амплитуды между минимальными и максимальными значениями в центре спектрометра и боковыми гранями составляет около 500 каналов. В пределах ошибок зависимость средней суммарной амплитуды каналов САКС от точки входа космических мюонов в спектрометр можно считать линейной. Аналогичная зависимость наблюдалась в работе [7].

На рис. 4 представлены зависимости относительного амплитудного  $\delta$  (кривая 1) и координатного  $\sigma_x$  (кривая 2) разрешений САКС также от положения триггерных счетчиков на оси  $x$ . Видно, что характер изменения обеих зависимостей одинаков с минимальными соответствующими значениями  $\delta = 8.7\%$  и  $\sigma_x = 1.6$  см в центре спектрометра ( $x = 0$ ). В обоих случаях  $\delta$  и  $\sigma_x$  ухудшаются при приближении триггерных счетчиков к боковым граням САКС до значений  $\delta \sim 11\%$  и  $\sigma_x \sim 1.8$  см соответственно.

Надо отметить, что на рис. 3 и 4 линии, описывающие экспериментальные результаты, проведены для наглядности. Погрешности значений относительного амплитудного и координатного разрешений на рис. 4 определялись процедурой подгонки амплитудных и координатных спектров полиномом стандартной программы OriginPro 9.0 и составили 15–20% от значений величин, представленных на рисунках.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты калибровки сцинтилляционного амплитудно-координатного спектрометра на космическом излучении показали, что в зависимости от точки входа мюонов в спектрометр (при энерговыделении мюоном в спектрометре около 50 МэВ) относительное амплитудное разрешение составляет около 10%. Координатное разрешение изменяется незначительно от  $\sigma_x = 1.6$  см в центре до  $\sigma_x \sim 1.8$  см вблизи боковых граней. Таким образом, спектрометр способен определять энергию заряженных частиц области энергий 50 МэВ с точностью около 10% и может быть использован в установке для дальнейшего поиска “аномальных лептонов”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникина М.Х., Никитин В.А., Рихвицкий В.С.* Препринт ОИЯИ. Р1-2022-62, Дубна. 2023.
2. *Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., Krechetov Yu.F., Lvov A.I., Pavlyuchenko L.N., Polyanskiy V.V., Sidorin S.S.* // EPJ Web of Conferences (Baldin ISHEPP XXIV). 2019. V. 204. P. 08009.  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201920408009>
3. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С.* // ПТЭ. 2021. № 1. С. 40.  
<https://doi.org/10.31857/S003281622101002X>
4. *Алексеев В.И., Басков В.А., Варфоломеева Л.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С.* // ПТЭ. 2022. № 4. С. 36.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816222040152>
5. *Алексеев В.И., В.А. Басков, 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>
6. *Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П.* Прохождение частиц высоких энергий через вещество. Москва: Энергоатомиздат, 1985.
7. *Алексеев В.И., Басков В.А., Варфоломеева Л.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>