

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ АМПЛИТУДНО-КООРДИНАТНЫЙ
СПЕКТРОМЕТР

©2023 г. В. И. Алексеев^а, В. А. Басков^{а*}, В. А. Дронов^а, А. И. Львов^а,
А. В. Кольцов^а, Ю. Ф. Кречетов^б, В. В. Полянский^а,
С. С. Сидорин^а, Е. А. Хафизова^а

^аФизический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук

Россия, 11999, Москва, Ленинский проспект, 53

^бОбъединенный 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 03.08.2023 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.

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 времяпролетная 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 амплитудно-координатного спектрометра (САКС), предназначенного для регистрации заряженных частиц, определения их энергии и координаты входа частицы в спектрометр (рис. 1). САКС является сцинтилляционным блоком 1 размером $510 \times 145 \times 235$ мм³ [5]. Регистрация световых вспышек, возникающих от взаимодействия заряженных частиц с блоком и входящих через грань размером 510×145 мм², 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]).

Рис. 1

САКС состоит из амплитудной и координатной систем. Амплитудная система включает четыре фотоэлектронных умножителя ФЭУ-49, просматривающих сцинтилляционный блок с двух противоположных граней размером 145×235 мм² (“горизонтальные” C_1 и C_2) и с верхней грани размером 510×235 мм² (“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 О, проходящей через центр симметрии блока и разделяющей блок на два равных по объему меньших блока размерами $145 \times 255 \times 235$ мм³ (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 сцинтилляционный 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 САКС представлена на рис. 2. Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2 размером $10 \times 10 \times 1$ см³ через формирователи Φ_1 , Φ_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 Φ_3 , Φ_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-контролер системы САМАС проводилась запись сигналов в память компьютера.

Среднее энерговыделение, которое оставлял космический мюон в объеме САКС, составляло 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 Φ_3 и Φ_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 мюонов в спектрометр, которая осуществлялась изменением положений триггерных счетчиков относительно центра спектрометра на оси x (рис. 1 и 2).

Рис. 3

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].

Рис. 4

На рис. 4 представлены зависимости относительного амплитудного δ (кривая 1) и координатного σ_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 δ и σ_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. P1-2022-62. Дубна. 2023.
2. *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 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>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема сцинтилляционного амплитудно-координатного спектрометра (светонепроницаемый корпус не показан): 1 – сцинтилляционный блок, 2 – отражатель из бумаги для копирования, 3 – металлизированная 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 сцинтилляционные счетчики).

Рис. 2. Блок-схема калибровки сцинтилляционного амплитудно-координатного спектрометра: S_1 и S_2 – триггерные сцинтилляционные счетчики, C_1 – C_4 – амплитудная система, S_{t1} и S_{t2} – координатная система, Φ_1 – Φ_8 – блоки формирователей, Z_1 – Z_4 – блоки задержек, CC – схема совпадений, $ZЦП$ – зарядоцифровой преобразователь, $ВЦП$ – время-цифровой преобразователь, $Start$ – сигнал запуска блоков $ZЦП$ и $ВЦП$, $Stop$ – временные сигналы со счетчиков координатной системы S_{t1} и S_{t2} , $КК$ – крейт-контроллер системы САМАС, $ПС$ – персональный компьютер.

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

Рис. 4. Зависимость относительного амплитудного \sqrt{I} (кривая 1) и координатного $\sqrt{2}$ (кривая 2) разрешений САКС от точки входа космических мюонов в спектрометр.

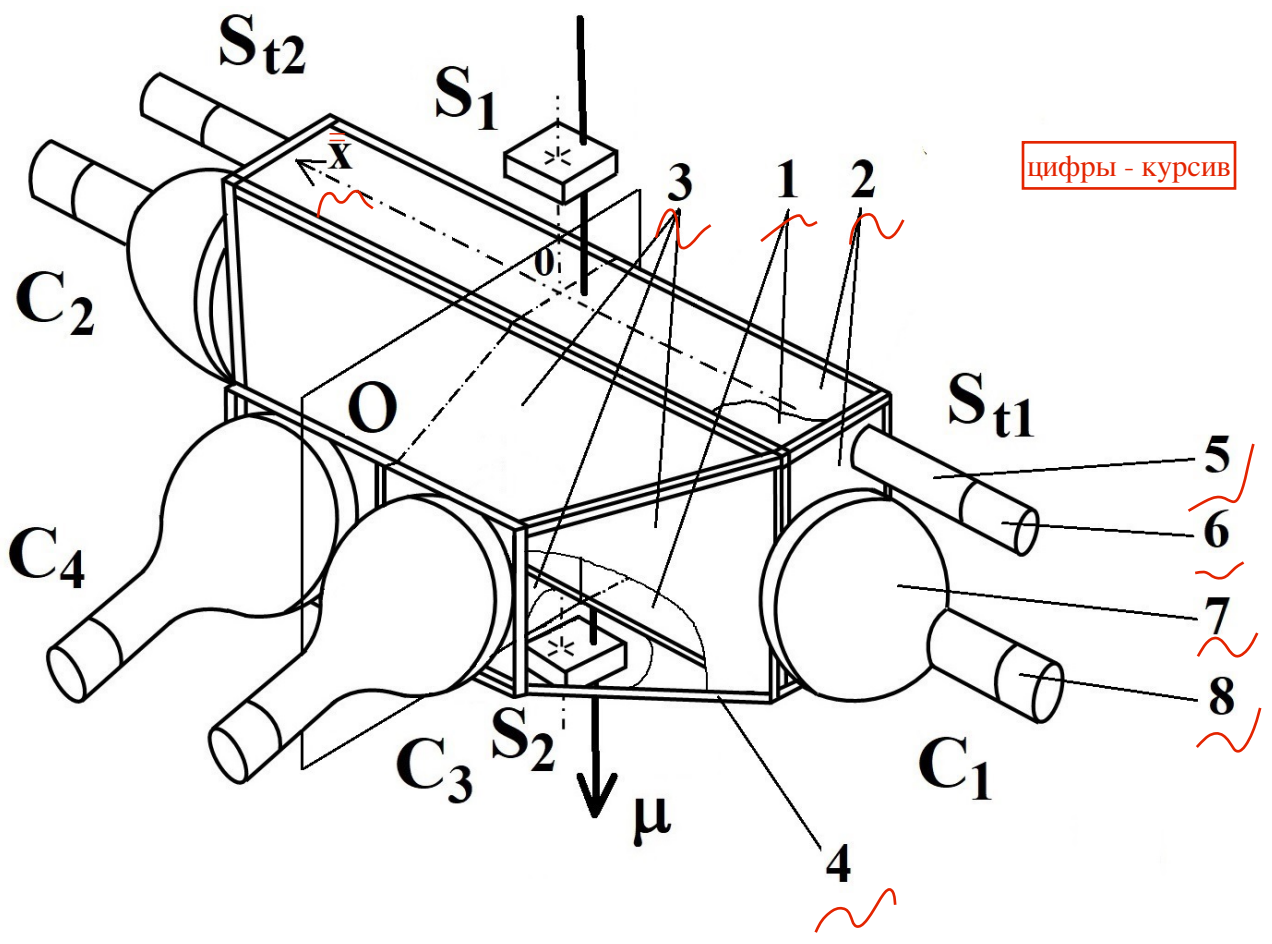


Рис. 1

Ф, З - прописные

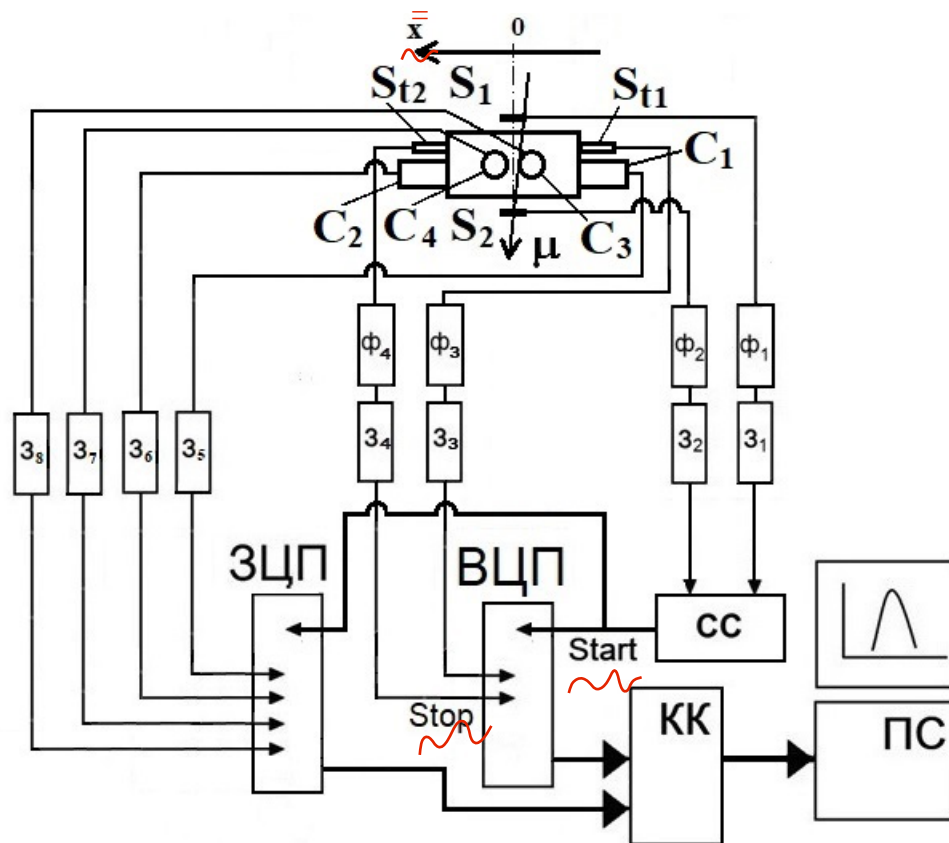
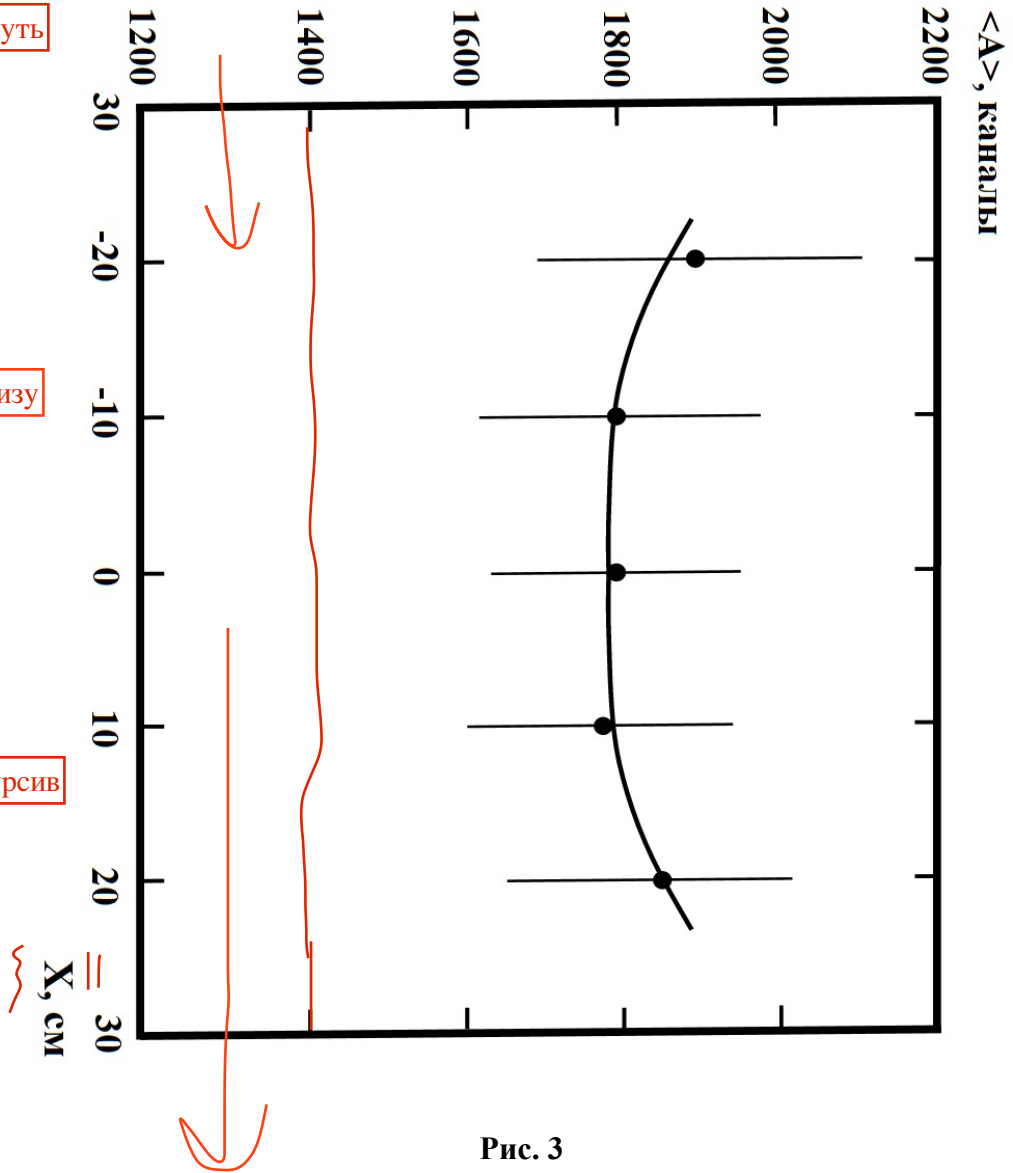


Рис. 2

рисунок повернуть

обрезать снизу

x - строчная курсив



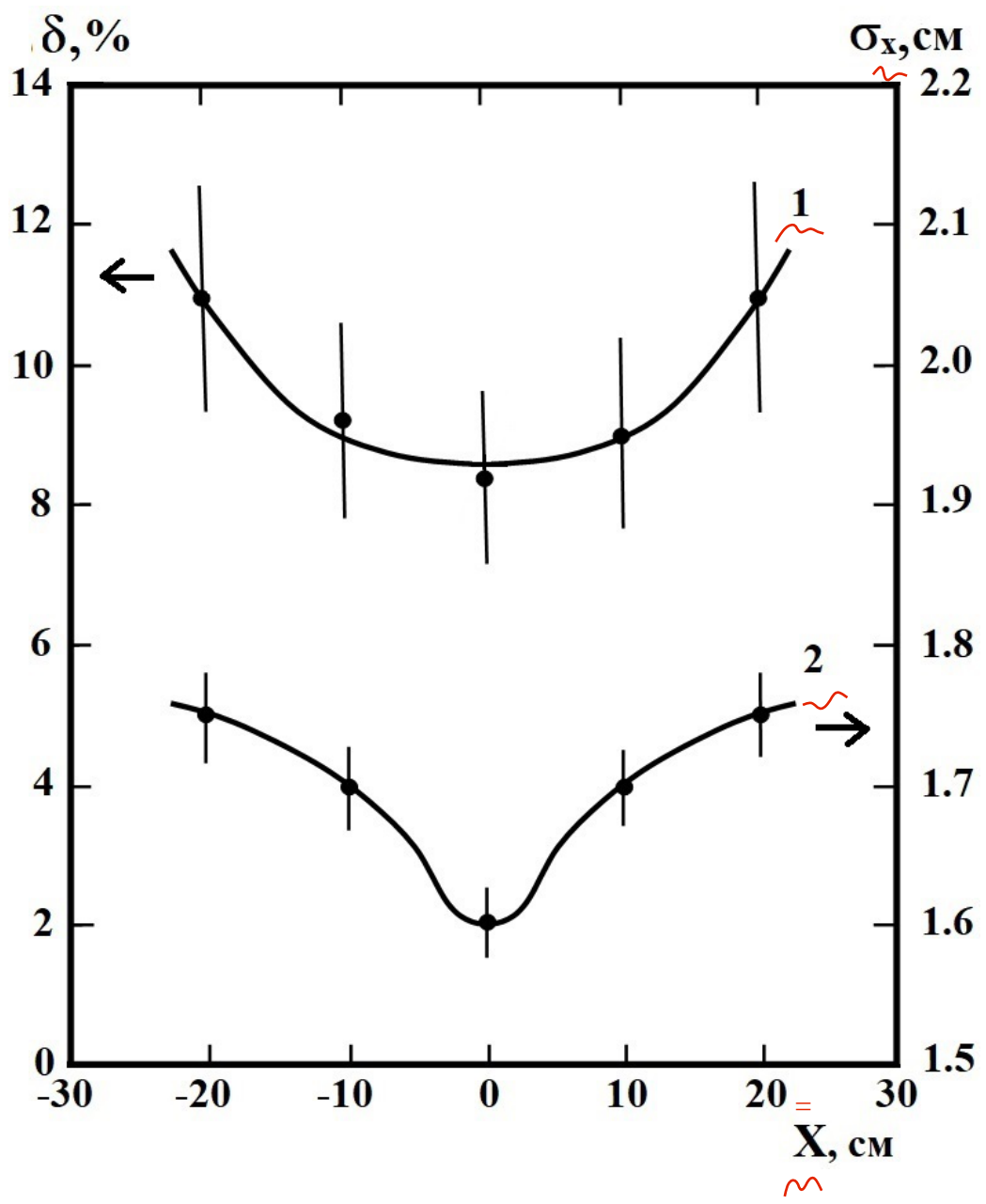


Рис. 4

Для связи с авторами:

Басков Владимир Алексеевич

Тел. 8-926-326-16-63 (моб.)

E-mail: paхра1@mail.ru

E-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

Для переводчика:

SCINTILLATION AMPLITUDE-COORDINATE SPECTROMETER

©2023 г. V. I. Alekseev¹, V. A. Baskov^{1,#}, V. A. Dronov¹,
E. A. Khafizova¹, A. I. L'vov¹, A. V. Kolzov¹, Yu. F. Krechetov²,
V. V. Poliansky¹, S. S. Sidorin¹

¹ P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow,
119991 Russia, 53 Leninsky Ave.

² Joint Institute for Nuclear Research,
141980 Russia, Moscow Region, Dubna, 6 Joliot-Curie Street

[#]E-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

The results of calibration on cosmic radiation of a scintillation amplitude-coordinate spectrometer with a thickness of 0.58 X0 are presented. The registration of light signals in the spectrometer was carried out by photoelectronic multipliers FEU-49 and FEU-85, which determine the amplitude and coordinate systems, respectively. It is found that the relative amplitude and coordinate resolutions depend on the point of passage of particles through the spectrometer. The best relative amplitude and coordinate resolutions were determined in the center of the spectrometer and amounted to ~8.7% and ~1.6 cm, respectively.

REFERENCES

1. Anikina M.H., Nikitin V.A., Rihvizky C.S. Search for New Charged Particle in Mass Interval 2–100 MeV // Preprint JINR. P1-2022-62. Dubna. 2023 (in Russian).
2. 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. A search for new light charged particles in photoproduction // EPJ Web of Conferences (Baldin ISHEPP XXIV). 2019. Vol. 204. P. 08009. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920408009>
3. Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., L'vov A.I., Kolzov A.V., Krechetov Yu.F., Polyansky V.V., Sidorin S.S., Varfolomeeva E.A. A Scintillation Hodoscopic Spectrometer

// Instruments and Experimental Techniques. 2021. V. 64. №.1. pp.34.

<https://doi.org/10.1134/S0020441221050018>

4. *Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., L'vov A.I., Kolzov A.V., Krechetov Yu.F., Polyansky V.V., Sidorin S.S., Varfolomeeva E.A.* Energy Characteristics of a Two-channel Scintillation Spectrometer // Instruments and Experimental Techniques. 2022. V.65. P. 568. <https://doi.org/10.1134/S0020441222040157>
5. *Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., L'vov A.I., Kolzov A.V., Krechetov Yu.F., Polyansky V.V.* Determination of the Energy Characteristics of an Electron Beam Using a Light Scintillator // Instruments and Experimental Techniques, 2020, V.63. P. 621. <https://doi.org/10.1134/S0020441220050073>
6. *Kalinovsky A.N., Mohov N.V., Nikitin Yu.V.* Passage of high-energy particles through matter // Energoatomizdat. Moscow. 1985 (in Russian).
7. *Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., L'vov A.I., Kolzov A.V., Krechetov Yu.F., Polyansky V.V., Sidorin S.S., Varfolomeeva E.A.* The Energy Characteristics of a Multichannel Scintillation Spectrometer // Instruments and Experimental Techniques. 2021. V.64. No.5. pp.663–668. <https://doi.org/10.1134/S0020441221050018>.