# = ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА =

УДК 539.1.08

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

© 2021 г. В. И. Алексеев<sup>*a*</sup>, В. А. Басков<sup>*a*,\*</sup>, Е. А. Варфоломеева<sup>*b*</sup>, В. А. Дронов<sup>*a*</sup>, А. И. Львов<sup>*a*</sup>, А. В. Кольцов<sup>*a*</sup>, Ю. Ф. Кречетов<sup>*c*</sup>, В. В. Полянский<sup>*a*</sup>, С. С. Сидорин<sup>*a*</sup>

<sup>а</sup> Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53 <sup>b</sup> Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31 <sup>c</sup> Объединенный институт ядерных исследований Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6 \*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru Поступила в редакцию 15.03.2021 г. После доработки 28.03.2021 г. Принята к публикации 30.03.2021 г.

Представлены результаты калибровки многоканального сцинтилляционного спектрометра толщиной 2.5 $X_0$  на пучке вторичных электронов ускорителя "Пахра" Физического института имени П.Н. Лебедева РАН с энергиями в диапазоне от 23 до 280 МэВ. Относительное энергетическое разрешение спектрометра зависит от энергии электронов и толщины спектрометра. Наилучшее относительное энергетическое разрешение спектрометра достигается при энергии электронов ~90 МэВ и составляет  $\delta = 13\%$  и  $\delta = 9.4\%$  при толщинах спектрометра 1 $X_0$  и 2.5 $X_0$  соответственно.

DOI: 10.31857/S0032816221050013

#### **ВВЕДЕНИЕ**

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 энергии продуктов взаимодействия фотонного пучка с экспериментальной мишенью в диапазоне энергий до 100 МэВ создан сцинтилляционный годоскопический спектрометр (*СГС*) [2].

Калибровка *СГС* на пучке вторичных электронов ускорителя "Пахра" показала удовлетворительное значение координатного разрешения, составившее  $\sigma_x = 9.5$  мм. Тем не менее, значение относительного энергетического разрешения в рабочем диапазоне энергий поискового эксперимента E < 100 МэВ составило  $\delta = 22-25\%$  ( $\delta = = \Delta E/\langle E \rangle/2.35$ ,  $\Delta E$  – полная ширина энергетического спектра *СГС* на половине его высоты,  $\langle E \rangle$  – среднее энерговыделение электронов в *СГС*). Такое значение разрешения недостаточно для решения поставленной задачи. Предварительные наборы экспериментальной статистики с использованием сцинтилляционного спектрометра размером 20 × 20 × 20 см [3] дали оценку энергетического разрешения спектрометра, которая должна составлять не менее 15%. Для получения необходимой энергетической точности был создан многоканальный сцинтилляционный спектрометр (*MCC*). Кроме того, сцинтилляционный спектрометр с хорошим энергетическим разрешением и быстродействием крайне необходим при исследованиях характеристик калибровочных пучков электронов ускорителя "Пахра" [3–6].

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР

Многоканальный сцинтилляционный спектрометр является сборкой из пяти независимых одинаковых сцинтилляционных блоков размером  $20 \times 20 \times 20$  см, расположенных последовательно друг за другом (рис. 1а). Общая длина сборки составляет 100 см или  $2.5X_0$ , где  $X_0$  – радиационная длина (для пластического сцинтиллятора  $X_0 \approx 40$  см [6]).

Каждый блок с двух сторон "просматривается" двумя фотоумножителями (ф.э.у.) (рис. 1б). Оба ф.э.у. расположены таким образом, чтобы траектории ливневых частиц электромагнитного ливня, развиваемого в блоке, были параллельно фотокатодам ф.э.у. В вертикальной плоскости



Рис. 1. Схема многоканального сцинтилляционного спектрометра (*MCC*): **а** – схема калибровки *MCC* на пучке вторичных электронов ускорителя ФИАН "Пахра" ( $\Theta$  – угол между траекторией электронов и осью симметрии *MCC*); **б** – конструкция отдельного блока *MCC* без светонепроницаемого корпуса (*1* – сцинтилляционный блок размером 20 × 20 × 20 см; 2 – белый ватман; 3 – черная бумага; 4 – металлизированный майлар; 5 – светосборник; 6 – ФЭУ-52; 7 – делитель напряжения ФЭУ-52; 8 – корпус ФЭУ-53; *10* – делитель напряжения ФЭУ-63.

объем блока "просматривает" спектрометрический ФЭУ-52 (фотокатод Ø70 мм), предназначенный для определения энергии зарегистрированных частиц, в горизонтальной – "временной" ФЭУ-63 (фотокатод Ø100 мм), предназначенный для формирования временного сигнала Stop во "времяпролетной" методике, используемой для регистрации "аномальных лептонов". В установке, использующей "времяпролетную" методику, сигнал Start задается системой триггерных сцинтилляционных счетчиков, находящихся за мишенью [2]. Для регистрации сигналов в ф.э.у. обоих типов используются стандартные делители напряжения, диапазон рабочих напряжений на которых составляет 1500-1750 В (для ФЭУ-52) и 2000-2400 В (для ФЭУ-63).

Для эффективного собирания света спектрометрическим ФЭУ-52, возникающего в значительном объеме блока от прохождения заряженных частиц, используется светосборник с отражателем на основе металлизированного майлара. Расстояние от фотокатода ФЭУ-52 до грани сцинтиллятора составляет 10 см. Фотокатод "временного" ФЭУ-63 плотно без смазки прижат к



Рис. 2. Блок-схема калибровочного канала вторичных электронов ускорителя ФИАН "Пахра".  $C_1, C_2$  – триггерные счетчики, A – счетчик антисовпадений, K – коллиматор,  $\Phi_1 - \Phi_3$  – блоки формирователей,  $3_1 - 3_8$  – блоки задержек, CC – схема совпадений,  $\mathcal{J} \amalg \Pi$  – восьмивходовый зарядочувствительный цифровой преобразователь, KK – крейт-контроллер системы САМАС,  $\Pi K$  – персональный компьютер; *Start* – триггерный сигнал, *Анализ* – амплитудные сигналы с каналов *MCC*.

грани сцинтиллятора. Каждый сцинтиллятор со всех сторон, исключая грани, занятые фотокатодом ФЭУ-63 и светосборником для ФЭУ-52, обернут ватманом и черной бумагой. Блок с обоими ф.э.у. находится в светонепроницаемом корпусе.

#### КАЛИБРОВКА МНОГОКАНАЛЬНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Калибровка МСС была выполнена на калибровочном квазимонохроматическом пучке вторичных электронов ускорителя ФИАН "Пахра" [4, 5]. Блок-схема калибровки МСС представлена на рис. 2. Сигналы с триггерных счетчиков  $C_1$  и  $C_2$ размером  $10 \times 10 \times 5$  мм через блоки формирователей  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и задержек  $3_1$  и  $3_2$  подавались на входы схемы совпадений СС. На вход СС "анти" через блоки формирователя  $\Phi_3$  и задержки  $3_3$  подавался сигнал со счетчика антисовпадений А размером  $90 \times 60 \times 10$  мм с отверстием Ø10 мм. Сигнал со схемы совпадений СС являлся триггерным сигналом Start для запуска восьмивходового зарядоцифрового преобразователя (ЗЦП), на входы "Анализ" которого через блоки задержек  $3_4 - 3_8$ подавались сигналы с пяти каналов МСС. Сигнал Start являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контроллер системы САМАС про-



**Рис. 3.** Зависимость средней амплитуды  $\langle A_m \rangle$  спектра амплитуд отдельных каналов *MCC* от энергии электронов (*m* = 1,..., 5 – номер канала).

водилась "запись" сигналов с *MCC* в память компьютера.

Перед счетчиком антисовпадений A находился свинцовый коллиматор K с отверстием  $\emptyset$ 5 мм, который задавал апертуру электронного пучка. Вторичный электронный пучок формировался с помощью медного конвертора  $\emptyset$ 3.2 и толщиной 2 мм. Интенсивность электронного пучка составляла  $\sim 10^2 e^{-}/c$ .

Калибровка *MCC* проходила в два этапа. На первом этапе *MCC* был расположен на пучке вторичных электронов таким образом, чтобы электроны входили в первый блок *MCC* точно по оси симметрии спектрометра в продольном направлении (рис. 1а). Далее происходило последовательное выравнивание амплитуд сигналов всех ФЭУ-52 *MCC* таким образом, чтобы амплитудный спектр с ф.э.у. каждого блока был расположен в рабочей области *ЗЦП*. Так как длина каждого блока *MCC* составляет 20 см, то средняя энергия, оставленная электронами в сцинтилляторе, составляет  $\langle E \rangle \approx 2$  [МэВ/см] · 20 [см]  $\approx$  40 МэВ. При энергии электронов >40 МэВ энерговыделение в *MCC* не увеличивается [2, 3, 6], поэтому максимальное энерговыделение в канале *MCC* также должно составлять не более  $\langle E \rangle = \langle E_{\text{max}} \rangle \approx 40 \text{ M}$ эB. Первый этап калибровки был осуществлен при энергии электронного пучка E = 280 MэB с тем, чтобы во всех блоках *MCC* выделялась энергия  $\approx$ 40 МэB.

В результате, средняя амплитуда каждого канала *MCC* составила ~260 каналов *ЗЦП* при максимальной величине рабочей области 512 каналов. Изменение величины средней амплитуды канала *MCC*, как и в случае калибровки *СГС*, происходило изменением величины напряжения на делителе напряжения ф.э.у. данного канала.

На втором этапе осуществлялась энергетическая калибровка *MCC* при энергиях электронов в диапазоне от 23 до 280 МэВ. Амплитуда *MCC*, зарегистрировавшего *i*-й электрон, определялась суммой амплитуд всех каналов  $A_i = \sum_{m=1}^{5} A_{mi}$ , где  $A_{mi}$  – амплитуда в *m*-м канале *MCC*; m = 1, ..., 5 – номер канала. Энергия электрона определялась как  $E_i = \sum_{m=1}^{5} E_{mi} = \sum_{m=1}^{5} k_m A_{mi}$ , где  $k_m$  – коэффициент пропорциональности *m*-канала *MCC*.



**Рис. 4.** Зависимость средней амплитуды  $\langle A \rangle_n$  спектра амплитуд суммы каналов *MCC* от энергии электронов (n = 1, ..., 5 – число суммируемых каналов).

Коэффициент k<sub>m</sub> определялся по методу калибровки спектрометров на пучке электронов, описанному в [3]. На рис. 3 представлена зависимость средней амплитуды  $\langle A_m \rangle$  амплитудного спектра отдельных каналов MCC (m = 1, ..., 5 – номер канала) от энергии электронов. На рис. 4 представлены зависимости средней амплитуды  $\langle A \rangle_n$  спектра амплитуд суммы каналов МСС от энергии электронов (n = 1, ..., 5 - число суммируемых каналов).Из рис. 3 и 4 видно, что, начиная с энергии электронов 40 МэВ, последовательно через каждые ~40 МэВ происходит резкое изменение зависимости, которая при дальнейшем увеличении энергии электронов как в случае отдельных каналов, так и суммы каналов меняется слабо. Линейная зависимость суммарной амплитуды МСС (рис. 4) от энергии электронов для *MCC* толщиной  $0.5X_0$  (n = 1) простирается до величины  $E \approx 35$  МэВ, для  $1X_0$ (n = 2) до  $E \approx 85$  МэВ, для  $1.5X_0$  (n = 3) до  $E \approx 110$  МэВ, для  $2X_0$  (n = 4) до  $E \approx 200$  МэВ, для  $2.5X_0$  (n = 5) до *E* ≈ 260 МэВ.

Экстраполяция зависимостей средних амплитуд каналов *MCC* от энергии электронов, представленных на рис. 3, до "точки перегиба" и за "точкой



**Рис. 5.** Относительное амплитудное разрешение  $\delta_n$  спектра суммы каналов *MCC* в зависимости от энергии электронов и толщины *MCC* (без вычета энергетического разброса электронного пучка).

перегиба" в "точку перегиба" дает значения амплитуды  $A_m^{\text{калибр}}$  каждого канала (блока) *MCC*, в которых выделяется энергия ≈40 МэВ. Коэффициент  $k_m$ для каждого канала, таким образом, определялся как  $k_m = 40/A_m^{\text{калибр}}$  [МэВ/канал].

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Относительное амплитудное разрешение  $\delta_n$  спектра суммы каналов *MCC* в зависимости от энергии электронов и толщины *MCC* (без вычета энергетического разброса электронного пучка) представлено на рис. 5. Видно, что разрешение *MCC*, исключая значения энергетического разрешения или первого блока, имеет минимум при энергии электронов  $E \approx 90$  МэВ. При увеличении энергии электронов  $\delta_n$  начинает ухудшаться, и начиная с энергии  $E \approx 140$  МэВ зависимость



**Рис. 6.** Зависимости энергии  $E_n$ , зарегистрированной *МСС*, и его относительного энергетического разрешения  $\delta_n$  (за вычетом энергетического разброса электронного пучка) для толщин спектрометра: **a** – 1X<sub>0</sub> (n = 2), **б** – 2.5X<sub>0</sub> (n = 5).

практически становится линейной, достигая при энергии электронов 280 МэВ значения  $\delta_n \approx 27\%$ . Подобная зависимость наблюдалась также в [2]. Можно предположить, что, начиная с энергии электронов  $E \approx 90$  МэВ и толщины спектрометра  $1X_0$  (n = 2) и более, часть энергии электромагнитных ливней, которые развиваются в объеме *MCC* [3, 7, 8], выходят из объема через боковые стенки и заднюю полусферу спектрометра, ухудшая точность определения энергии.

Зависимости энергии  $E_n$ , зарегистрированной *МСС*, и его относительного энергетического разрешения  $\delta_n$  (за вычетом энергетического разрешения электронного пучка) для толщины спектрометра  $1X_0$ , являющейся рабочей толщиной для проводимого эксперимента, и толщины  $2.5X_0$  (n = 5), являющейся рабочей при исследованиях характе-



**Рис.** 7. Зависимость энергии электронов (**a**) и энергетического разрешения (**б**) *MCC* относительно горизонтальной координаты *x* и углах входа электронов в спектрометр  $\Theta = 0$  (*1*) и  $\Theta = 5^{\circ}$  (*2*), где угол  $\Theta$  является углом между траекторией электронов и осью симметрии *MCC*.

ристик электронных калибровочных пучков ускорителя "Пахра", представлены на рис. 6. Видно, что значения энергий, определяемые *MCC*, соответствуют энергиям электронного пучка до энергии пучка  $E \sim 80$  МэВ и  $E \sim 200$  МэВ при толщинах *MCC* 1X<sub>0</sub> и 2.5X<sub>0</sub> соответственно. Наилучшее относительное энергическое разрешение *MCC* достигается при энергии электронов  $E \approx 90$  МэВ и составляет  $\delta_2 \approx 13\%$  и  $\delta_5 \approx 9.4\%$  для обеих толщин *MCC* соответственно.

Рабочий диапазон энергий вторичных заряженных частиц, выходящих из мишени в поисковом эксперименте, ожидается в пределах энергий до 100 МэВ, поэтому энергетические характеристики *MCC* в зависимости от точки входа и угла входа электронов в спектрометр были исследованы при толщине *MCC* 1 $X_0$  (n = 2) и энергии электронов E = 60 МэВ.

Зависимость энергии электронов и энергетического разрешения *MCC* относительно горизонтальной координаты *x* и углах входа электронов в спектрометр  $\Theta = 0$  и  $\Theta = 5^{\circ}$ , где угол  $\Theta$  является углом между траекторией электронов и осью симметрии МСС (рис. 1а), представлена на рис. 7. Из рисунка видно, что при отклонении входа электронов в спектрометр относительно оси симметрии в пределах -5 см < x < 5 см (x = 0 – координата оси симметрии МСС в продольном направлении относительно траектории электронов (рис. 1)) при обоих углах входа электронов в спектрометр энергия электронов, определяемая *MCC* (рис. 7а), и его энергетическое разрешение (рис. 76) постоянны. В точках  $x \le -5$  см и  $x \ge 5$  см зависимость энергии, определяемой спектрометром, от точки входа электронов в МСС имеет нелинейный характер (численные значения энергии уменьшаются) и точность определения энергии ухудшается. Можно также видеть, что при  $\Theta = 0$  зависимости энергии, регистрируемой МСС, и энергетического разрешения симметричны относительно x = 0. При  $\Theta = 5^{\circ}$  значение энергии при x = -9 см уменьшилось на ~20%, а при x = 9 см увеличилось на ~10% соответственно. При этом энергетическое разрешение в точке при x = -9 см ухудшилось в ~1.8 раза, а в точке при x = 9 см улучшилось на ~10%

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты калибровки многоканального сцинтилляционного спектрометра на пучке вторичных электронов ускорителя "Пахра" с энергиями от 23 до 280 МэВ показали, что в области энергий электронов E < 100 МэВ, при которых проводится поисковый эксперимент, зависимость энергии, определяемой МСС, состоящего из двух сцинтилляционных блоков, до энергии электронов ~80 МэВ имеет линейный характер. Зависимость энергии, определяемой МСС, состоящего из 5 сцинтилляционных блоков, который используется при исследованиях энергетических характеристик электронных пучков ускорителя "Пахра", имеет линейный характер до энергии электронов ~200 МэВ. Относительное энергетическое разрешение МСС минимально при энергии электронов *E* ~ 90 МэВ и составляет  $\delta = 13\%$  и  $\delta = 9.4\%$  при толщинах *MCC*  $1X_0$  и 2.5 $X_0$  соответственно.

Величины энергии, регистрируемой *MCC*, и его относительного энергетического разрешения при углах входа электронов в спектрометр  $\Theta = 0$  и  $\Theta = 5^{\circ}$  в горизонтальной плоскости относительно траектории электронов и оси симметрии спек-

трометра сохраняют однородность при отклонении пучка на  $\pm 5$  см относительно точки симметрии спектрометра.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Т. Ралко за помощь в работе и группу эксплуатации ускорителя ФИАН "Пахра" под руководством Г.Г. Субботина за успешное и плодотворное сотрудничество

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (NICA – РФФИ) № 18-02-40061 и № 18-02-40079.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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 Conf. 2019. V. 204. P. 08009. https://doi.org/10.1051/epjconf/201920408009
- 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
- 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
- 4. Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кречетов Ю.Ф., Малиновский Е.И., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В., Сидорин С.С. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 5. https://doi.org/10.1134/S0032816219020162
- Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. // Краткие сообщения по физике. 2020. № 7. С. 18. https://doi.org/10.3103/S1068335620070027
- 6. Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. // Краткие сообщения по физике. 2020. № 9. С. 12.

https://doi.org/10.3103/S106833562009002X

- Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. // Прохождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- Огрзевальский З., Стругальский З.С. Препринт ОИЯИ P1-4562. Дубна, 1969.