МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 539.1.08

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР

С. М. Ахмад^{1,2}, В. И. Алексеев¹, В. А. Басков¹, В. А. Дронов¹, А. И. Львов¹, А. В. Кольцов¹, Ю. Ф. Кречетов³, В. В. Полянский¹, С. С. Сидорин¹, Е. А. Хафизова¹

> Представлены результаты калибровки на пучке вторичных электронов ускорителя "Пахра" Физического института им. П. Н. Лебедева РАН двухканального сцинтилляционного спектрометра толщиной $0.5X_0$. Регистрация световых сигналов в спектрометре осуществлялась фотоэлектронными умножителями ФЭУ-49. При энергии электронов $E \approx 30$ МэВ относительное энергетическое разрешение суммы сигналов обоих каналов составило ~5%, соответственно.

Ключевые слова: сцинтилляционный спектрометр, пучок электронов, энергетическое разрешение.

На тормозном пучке фотонов ускорителя C-25P "Пахра" ФИАН с максимальной энергией 500 МэВ создана установка, предназначенная для поиска ранее не наблюдавшихся, относительно легких долгоживущих заряженных частиц ℓ[±] с массой, лежащей между массой электрона и мюона, или "аномальных лептонов" [1]. Пучок фотонов падает на медную мишень толщиной 1 мм.

Диапазон энергий частиц, вылетевших из мишени и сепарируемых магнитом установки, находится в диапазоне до 50 МэВ. Для их регистрации используются сцинтилляционные спектрометры (рис. 1) [2]. Модельные расчеты показали, что для надежного выделения энергетического пика "аномальных лептонов" точность определения энергии регистрируемых сцинтилляционных спектрометров частиц должна быть лучше 10%.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

 $^{^2}$ МПГУ, 119435 Россия, Москва, Малая Пироговская улица, 1, стр. 1.

³ ОИЯИ, 141980 Россия, Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, 6.



Рис. 1: Схема экспериментальной установки по поиску "тяжелого лептона" на ускорителе ФИАН "Пахра": Т – медная мишень; S₁–S₃ – сцинтилляционные счетчики; Г₁ и Г₂ – сцинтилляционные годоскопы; М – постоянный магнит; СС₁ и СС₂ – сцинтилляционные спектрометры.

В процессе эксперимента конструкция спектрометров постоянно совершенствуется с целью получения требуемой точности [3, 4]. В работе представлены характеристики новой конструкции одного из сцинтилляционных спектрометров, предназначенного для регистрации заряженных частиц и определения их энергии (рис. 2). Сцинтилляционный спектрометр является модернизированным вариантом двухканального сцинтилляционного спектрометра (ДСС) [4].

Основой сцинтилляционного спектрометра является сцинтилляционный блок размером 200×200×200 мм³. Регистрация световых вспышек, возникающих от взаимодействия заряженных частиц с блоком, осуществляется с помощью двух фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49 со стандартными делителями напряжения.

ФЭУ двухканального сцинтилляционного спектрометра или ДСС2 относительно траектории заряженных частиц расположены таким образом, чтобы траектории ливневых частиц электромагнитного ливня, развиваемого в блоке, были параллельны фотокатодам ФЭУ (рис. 2). Оба ФЭУ-49 плотно без смазки прижаты к граням сцинтилляционного блока. Один ФЭУ расположен на верхней грани сцинтилляционного блока и "просматривает" объём блока в направлении вертикальной оси симметрии (первый канал), второй ФЭУ расположен на горизонтальной грани сцинтилляционного блока, параллельной траектории регистрируемых частиц, и "просматривает" объём блока в направлении горизонтальной оси симметрии, перпендикулярной траектории частиц (второй канал). В качестве отражающей поверхности использована белая бумага типа "ватман".



Рис. 2: Схема калибровки двухканального сцинтилляционного спектрометра (ДСС2) на пучке вторичных квазимонохроматических электронов ускорителя "Пахра" ФИАН (светонепроницаемые корпуса на ФЭУ-49 не показаны): 1 – сцинтилляционный блок; 2 – ФЭУ-49; 3 – ватман; 4 – черная бумага; 5 – делитель напряжения ФЭУ-49.

Калибровка ДСС2 выполнена на тестовом канале на основе спектрометрического магнита СП-3 квазимонохроматического вторичного электронного пучка с диапазоном энергий от 5 до 100 МэВ ускорителя С-25Р "Пахра" ФИАН [5]. Целью калибровки являлось определение энергетической зависимости и энергетического разрешения.

Вторичный электронный пучок формировался с помощью медного конвертора диаметром Ø3.2 мм и толщиной 1 мм. Электроны, выходящие из конвертора, отклонялись магнитным полем магнита СП-3 под углом 23° в свинцовый коллиматор К диаметром Ø15 мм и регистрировались сцинтилляционными счетчиками S_1 и S_2 размером $15 \times 15 \times 1$ мм³. Интенсивность электронного пучка составляла $\sim 10^2 e^{-}/c$ (рис. 2).

Блок-схема калибровки ДСС2 представлена на рис. 3. Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2 через формирователи Φ_1 , Φ_2 и задержки 3_1 , 3_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 блоков зарядоцифрового преобразователя (ЗЦП) и времяцифрового преобразователя (ВЦП). На входы "Анализ" блока ЗЦП через блоки задержек 3_4 и 3_5 подавались сигналы с ФЭУ-49. На вход "Stop" блока ВЦП через блок задержек 3_3 подавался сигнал от счетчиков



Рис. 3: Блок-схема калибровки ДСС2: K – коллиматор; S_1 и S_2 – триггерные сцинтилляционные счетчики; S_3 – сцинтилляционный счетчик контроля доли энергии электромагнитного ливня, выходящего из ДСС2; ДСС2 – сцинтилляционный спектрометр; $\Phi_1-\Phi_3$ – блоки формирователей; 3_1-3_5 – блоки задержек; СС – схема совпадений; ЗЦП – зарядочувствительный цифровой преобразователь; ВЦП – времяцифровой преобразователь; Start – сигнал запуска блоков ЗЦП и ВЦП; Stop – временные сигналы со счетчиков S_3 и S_t . Анализ – амплитудные сигналы с каналов ДСС2; КК – крейт-контроллер системы САМАС; ПС – персональный компьютер.

 S_3 размером $70 \times 70 \times 5$ мм³, который являлся счетчиком контроля потока электронов, выходящих из ДСС2. Сигнал "Start" являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контролер (КК) системы САМАС производилась "запись" сигналов в память компьютера (ПК).

Калибровка ДСС2 на пучке электронов проходила в два этапа. На первом этапе последовательно на пучке электронов с энергией более 40 МэВ, при которой происходит максимальное энерговыделение ливней в объеме ДСС2, были выравнены амплитуды сигналов обоих 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 обоих ФЭУ-49. Суть процедуры первого этапа определена тем, что полное среднее энерговыделение, которое оставляет электрон в объёме ДСС2 при прохождении пути, равного толщине спектрометра 20 см, составляет около $E \approx L \cdot dE/dx = 20 \cdot 2 \approx 40$ МэВ (L = 20 см – толщина ДСС2, $dE/dx \approx 2$ МэВ/см – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в пластиковом сцинтилляторе). Поэтому, при увеличении энергии электронов более 40 МэВ увеличения энерговыделения в ДСС2 не происходит, и средний канал, определяющий среднее энерговыделение ливней в ДСС2, не изменяется [4, 5, 7].



Рис. 4: Зависимость средней амплитуды суммы двух каналов ДСС2 (a) и средней энергии электронов, зарегистрированной ДСС2, (б) от тока магнита СП-3.

На рис. 4(а) представлена зависимость средней величины суммы сигналов двух амплитудных каналов ДСС2 от тока магнита СП-3. Каждая точка на рисунке представляет среднюю величину амплитудного спектра $\langle A \rangle$, со среднеквадратичным отклонением $\sigma = FWHM/2.35$ (FWHM – полная ширина на половине высоты амплитудного спектра суммы сигналов).

Характер зависимости аналогичен характеру зависимостей, полученных в [4, 6]. Начиная с тока магнита $I \approx 16.5$ A, суммарная амплитуда (зависимость 1 на рис. 4(а)) не изменяется, что означает полное энерговыделение в объеме ДСС2, соответствующее энергии электронов E = 40 МэВ. Этой энергии соответствует средняя суммарная амплитуда $\langle A \rangle = 1140$ каналов. Таким образом, коэффициент пропорциональности $k = E/\langle A \rangle = 40/1140 = 0.0351$ [МэВ/канал]. На рис. 4(б) представлена зависимость средней величины энергии, зарегистрированной ДСС2 от тока магнита СП-3. В диапазоне суммарных амплитуд от ~10 МэВ до ~35 МэВ в пределах ошибок зависимость имеет линейный характер. При энергиях меньше ~10 МэВ зависимость имеет нелинейный характер. Эта область определяется значительным низкоэнергетичным (≤ 1 МэВ) фоном, связанным с взаимодействием фотонного пучка с конвертером и с воздухом, при его транспортировке от последнего коллиматора до конвертора и после конвертора [6]. Данная область является нерабочей.



Рис. 5: Зависимость относительного энергетического разрешения спектрометра ДСС2 от величины зарегистрированной энергии электронного пучка.

На рис. 5 представлена зависимость относительного энергетического разрешения спектрометра ДСС2 от величины зарегистрированной энергии электронного пучка ($\delta = FWHM/\langle E \rangle/2.35 \cdot 100\%$). Минимальное относительное энергетическое разрешение наблюдается при энергии электронов $E \approx 30$ МэВ и составляет $\delta \approx 5\%$, что на 2% лучше разрешения спектрометра, описанного в работе [4], аналогичной конструкции с использованием ФЭУ-52 с воздушными светосборниками.

В дальнейшем предполагается модернизация ДСС2 добавлением временной системы, включающей регистрацию световых сигналов ФЭУ-87 или ФЭУ-85 с целью дополнительного измерения времени пролета заряженных частиц от счетчиков триггера S_1-S_3 до СС₁ и СС₂ (рис. 1). Погрешности значений средних амплитуд суммы двух каналов и средних энергий электронов, зарегистрированной ДСС2, (рис. 4) определялись процедурой фитирования амплитудных и энергетических спектров полиномом стандартной программы OriginPro 9.0. Значения ошибок относительного амплитудного разрешения (рис. 5) составили 15– 20% от значений величин ошибок, представленных на рис. 4(б).

Таким образом, результаты калибровки двухканального сцинтилляционного спектрометра с применением для считывания сигналов ФЭУ-49 на пучке вторичных электронов ускорителя "Пахра" на базе магнита СП-3 показали, что в области энергий электронов от ~10 до ~35 МэВ зависимость регистрируемой энергии от тока СП-3 имеет линейный характер. При энергии электронов $E \approx 30$ МэВ относительное энергетическое разрешение суммы сигналов каналов составляет ~5%. В диапазоне энергий электронов от ~15 до ~35 МэВ относительное энергетическое разрешение ДСС2 лучше 10%, что удовлетворяет требованию модельного расчета энергетического разрешения спектрометра установки и позволяет использовать двухканальный сцинтилляционный спектрометр в проводимом эксперименте.

ЛИТЕРАТУРА

- M. X. Аникина, В. А. Никитин, В. С. Рихвицкий, Препринт ОИЯИ Р1-022-62 (Дубна, 2023).
- [2] В. И. Алексеев, В. А. Басков, Е. А. Варфоломеева и др., Краткие сообщения по физике ФИАН 50(8), 49 (2023). https://doi.org/10.3103/S1068335623080031.
- [3] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., ПТЭ, № 1, 40 (2021). https://doi.org/10.31857/S003281622101002X.
- [4] В. И. Алексеев, В. А. Басков, Л. А. Варфоломеева и др., ПТЭ, № 4, 36 (2022). https://doi.org/10.31857/S0032816222040152.
- [5] В. И. Алексеев, А. И. Архангельский, В. А. Басков и др., ПТЭ, № 6, 59 (2023). https://doi.org/10.31857/S0032816223040109.
- [6] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., ПТЭ, № 5, 1 (2020). https://doi.org/10.31857/S0032816220050079.

Поступила в редакцию 18 ноября 2024 г.

После доработки 24 января 2025 г.

Принята к публикации 25 января 2025 г.