

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)  
Институт Ядерной Физики и Технологий  
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц и космологии»

УДК 539.165.2

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ  
ПОДКЛЮЧЕНИЯ КРЕМНИЕВОГО  
ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ К СИСТЕМЕ СБОРА ДАННЫХ  
CAEN FERS-5200

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н., доц.

\_\_\_\_\_ П. Е. Тетерин

Консультант,  
старший преподаватель

\_\_\_\_\_ Ф. А. Дубинин

Консультант,  
лаборант

\_\_\_\_\_ А. М. Захаров

Студентка

\_\_\_\_\_ К. А. Тертышная

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эксперимент SPD</b>	<b>3</b>
1.1 Описание установки SPD . . . . .	4
1.2 Beam-Beam Counter . . . . .	5
1.3 CAEN FERS-5200 . . . . .	6
1.4 Задача . . . . .	7
1.5 Методика измерений . . . . .	7
1.5.1 Внешний фильтр . . . . .	8
1.5.2 Без фильтра: плоская пара . . . . .	9
1.5.3 Без фильтра: коаксиальный кабель . . . . .	9
<b>2 Представление результатов</b>	<b>10</b>
2.1 Внешний фильтр . . . . .	10
2.2 Без фильтра: плоская пара . . . . .	11
2.3 Без фильтра: коаксиальный кабель . . . . .	11
2.4 Анализ и сравнение результатов . . . . .	12
<b>Заключение</b>	<b>13</b>
<b>Список литературы</b>	<b>14</b>

## Введение

NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) – это новый ускорительный комплекс, который создаётся на базе Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств плотной барионной материи. На коллайдере предусмотрены две точки пересечения пучков заряженных частиц, в одной из которых предполагается установить детектор SPD. Измерения спина в SPD на коллайдере NICA откроют новые возможности для понимания спиновой структуры нуклона.

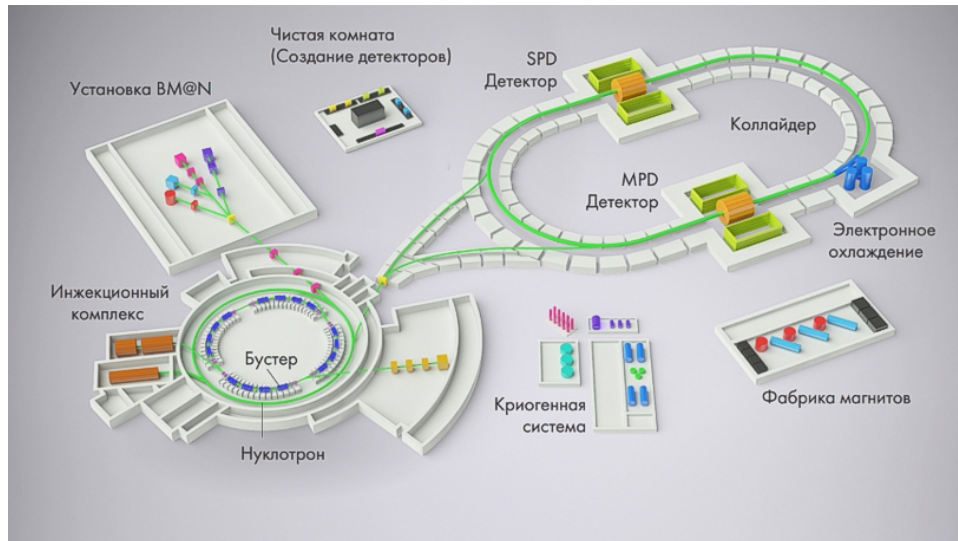


Рисунок 1 — Схема комплекса NICA

## 1 Эксперимент SPD

Spin Physics Detector - это универсальная установка для исследования спиновой структуры нуклонов и других спиновых явлений. Установка будет использовать поляризованные пучки протонов и дейтронов ( $pp$  и  $dd$  столкновения).

Спин нуклона формируется из спинов орбитальных моментов кварков и глюонов. Вклад кварков в общий спин нуклона был довольно точно измерен коллаборациями HERMES (DESY) и COMPASS (CERN). Измерения по глюонной компоненте точными не являются. Основная цель эксперимента SPD - комплексное исследование поляризованной глюонной компоненты нуклона в реакциях рождения чармониев, очарованных частиц и прямых фотонов. Планируется работать с поляризованными пучками частиц с энергией до 27 ГэВ в системе центра масс, частотой соударения 3 МГц и светимостью до  $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [1]. Первый этап эксперимента будет нацелен на изучение поляризованных и неполяризованных явлений при столкновении на низких энергиях и пониженной светимости пучков тяжелых ионов и поляризованных протонов и дейтронов (упругое  $pp$  и  $dd$  рассеяние). Продолжительность первого этапа займет не более двух лет. Реализация второго этапа (основного) планируется в 2030 году. Данная фаза эксперимента предполагает исследование поляризованных глюонов в протоне и дейтроне.

Эксперимент SPD должен закрыть энергетический зазор между существующими экспериментами в области физики спина частиц.

## 1.1 Описание установки SPD

Экспериментальная установка SPD является комплексным 4- $\pi$  детектором цилиндрической формы [2]. Основные детекторные системы (Рисунок 2):

- Вершинный детектор (VD) — детектор на основе кремния, отвечает за точное определение первичной точки взаимодействия и измерение вторичных вершин по распадам короткоживущих частиц, должен обеспечить разрешение на уровне менее 100 мкм, необходимое для реконструкции вторичных вершин распадов D-мезонов.
- Трековый детектор (TS) — система на основе straw трубок, помещенная в соленоидальное магнитное поле до 1 Тл на оси детектора, должна обеспечить разрешение по поперечному импульсу  $\approx 2\%$  для импульса частицы 1 ГэВ/с. Участвует в идентификации частиц посредством измерения энерговыведения ( $dE/dx$ ).
- Время-пролетная система (TOF) обладает временным разрешением  $\approx 60$  пс, обеспечит разделения  $\pi/K$  для энергии 1.2 ГэВ/с и  $K/p$  2.2 ГэВ/с на уровне  $3\sigma$ .
- Аэрогелевый Черенковский детектор может расширить диапазон энергий для разделений  $\pi/K$  и  $K/p$ .
- Электромагнитный калориметр (EC) — необходим для регистрации и идентификации частиц, вылетающих в телесный угол  $4\pi$ . Обеспечит обнаружение  $\gamma$  и  $\pi^0$ . Энергетическое разрешение калориметра  $5\%/\sqrt{E}$ .
- Мюонная система (RS) используется для идентификации мюонов.
- Счетчик столкновений пучков (BBC) будет отвечать за локальную поляриметрию и количество пролетевших частиц.
- Калориметр нулевого угла (ZDC) будет установлен в зонах разделения пучков по обе стороны от точки взаимодействия для определения светимости пучка и создания временной метки для разделения событий. Вместе с BBC измеряет локальную поляриметрию.

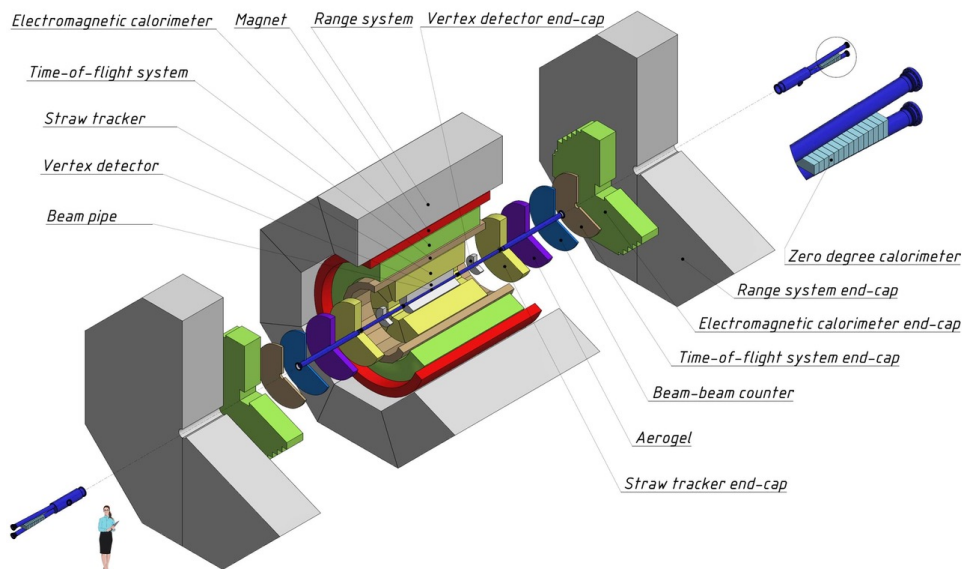


Рисунок 2 — Детекторная система SPD

## 1.2 Beam-Beam Counter

В качестве инструмента для локальной поляриметрии и контроля светимости на SPD планируется система Beam-Beam Counter. Сцинтилляционный детектор имеет секторную структуру - он состоит из 16 секторов, образующих одно из двух колец. Каждый сектор состоит из 26 тайлов. Высокогранулярные сцинтилляционные пластины соединены с кремниевыми фотопумножителями (SiPM) через спектросмещающее оптоволокно [3]. Внутри тайла волокно скручено в несколько витков. Сцинтилляторы имеют трапециевидную форму, и между каждой парой трапеций предусмотрены зазоры. Зазоры необходимы для избежания взаимного засвечивания тайлов при попадании частицы в один из них. Сверху пластины покрыты слоем светоотражающей белой краски. Светоотражающее покрытие не позволяет фотонам покидать рабочую область сцинтиллятора, что способствует увеличению сбора света волокном и, соответственно, усилению сигнала.

Спектросмещающее волокно (WLS) - это оптическое волокно с добавкой переизлучателя, благодаря которому волокно способно захватить свет, проходящий через волокно под углом, большим чем угол полного внутреннего отражения. Эффективность захвата света волокном составляет 7%. Применение данного волокна способно повысить однородность считывания светового сигнала с тайлов.

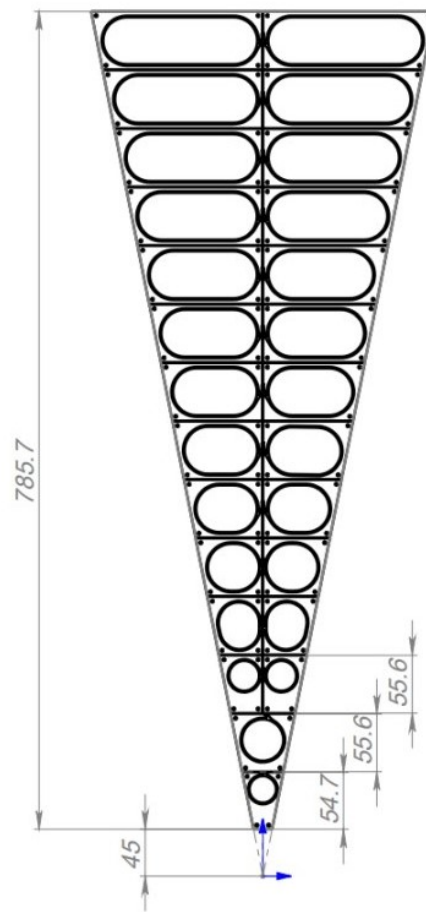


Рисунок 3 — Сектор BBC

### 1.3 CAEN FERS-5200

FERS-5200 [4] — это система предварительной обработки данных, предназначенная для считывания данных с больших массивов детекторов, таких как полупроводниковые детекторы, многоанодные фотоэлектронные умножители, газовые трубки и другие [5]. Главная часть FERS-5200 - микросхема Citiros-1A, который помещён на плату (Рисунок 4). Плата содержит 64 канала и включает в себя электронику предварительной обработки данных (Front End), аналого-цифровые преобразователи (АЦП), триггерную логику, синхронизацию, локальную память и интерфейс считывания данных.

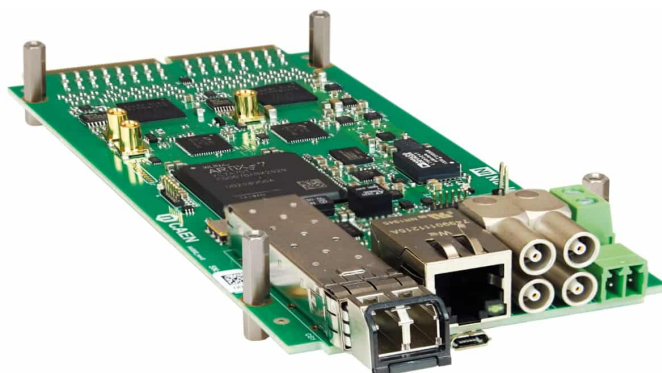


Рисунок 4 — Плата A5202 FERS-5200

Все устройства FERS оснащены портами USB 2.0 и Ethernet 10/100T для автономного использования. Также, FERS предусматривает LEMO разъёмы.

Каждый канал считывания состоит из предусилителя и двух формирователей сигнала: Slow Shaper с детектором пиковых значений, и Fast Shaper, за которым следует дискриминатор. Каждый канал считывания может принимать сигналы LVDS и измерять их фронт. Таким образом, устройство способно восстанавливать время прихода сигналов и время превышения порога (ToT), что позволяет оценить амплитуду и восстанавливать энергетический спектр.



Рисунок 5 — Корпус FERS-5200

## 1.4 Задача

Целью работы является определение оптимальной схемы подключения SiPM к системе считывания CAEN FERS-5200 для дальнейшего использования в прототипе детектора BBC на SPD.

В данной рассматривается 3 вида подключения SiPM к FERS: плата питания с внешним фильтром, плоская пара и коаксиальный кабель.

## 1.5 Методика измерений

Экспериментальная установка проводимого исследования состояла из полупроводникового детектора SiPM Onsemi  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ , системы считывания CAEN FERS-5200 и внешнего триггера. В качестве внешнего триггера выступал CAEN SP5601 LED-driver с длиной волны  $\lambda = 400 \text{ нм}$ . Все измерения проводились при яркости 3,5 в режиме HIGH FREQ. Источником питания для SiPM также служил FERS-5200. Считывание сигнала (как и подача напряжения) происходило с 62 канала, с формировкой 12,5нс и усилением (HG) 60.



Рисунок 6 — LED-driver

SiPM подключается в режиме закрытого диода. LED-driver генерирует вспышку, которую регистрирует SiPM. Сигнал с фотоумножителя поступает на плату CAEN FERS (Citiroc 1A). Далее сигнал, предварительно усиленный на предусилителе, оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя. Если сигнал с LED-driverа (триггер) поступил на FERS, значит SiPM зафиксировал событие, а не шумовой импульс, следовательно амплитуда данного сигнала будет записана в гистограмму, преобразуя мВ в единицы канала кодировщика. Работа с FERS-5200 осуществляется с помощью специального программного обеспечения - Janus.

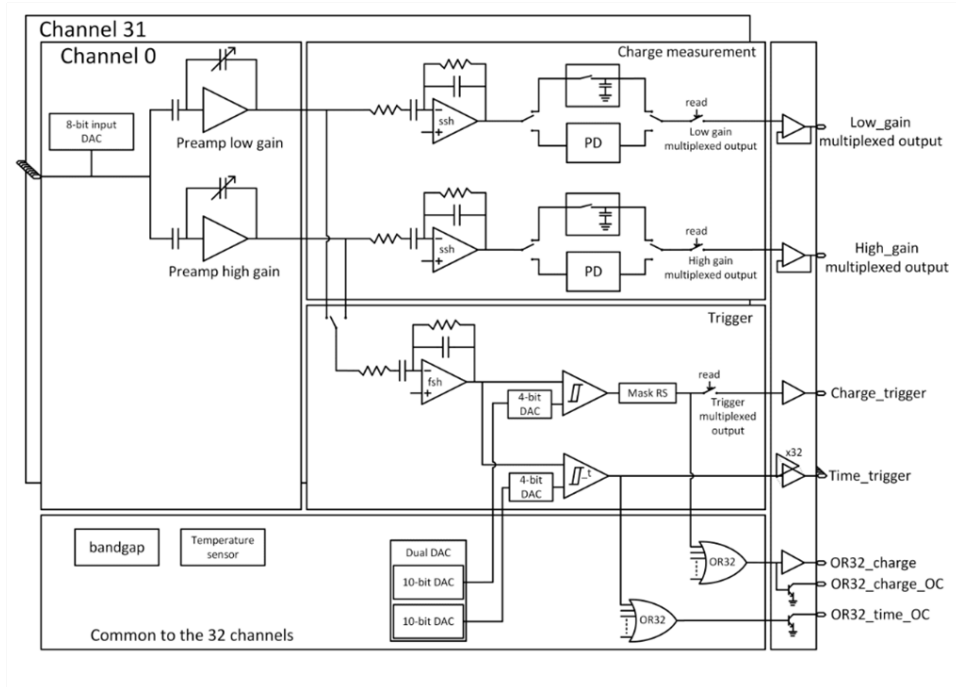


Рисунок 7 — Citiroc 1A

### 1.5.1 Внешний фильтр

Внешний фильтр представляет собой интегральную электрическую цепь с дополнительной нагрузкой в виде сопротивления 500 Ом. Напряжение на SiPM подавалось с помощью отдельного провода с канала FERS. Сигнал с фотомножителя поступал на систему считывания через жилу коаксиального кабеля. Оплётка кабеля была подключена к земле схемы питания.

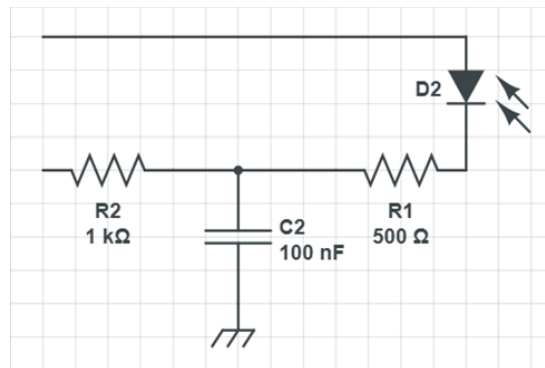


Рисунок 8 — Плата питания с фильтром



### 1.5.2 Без фильтра: плоская пара

Плоская пара представляет собой два проводника, каждый из которых находится в изоляции. Напряжение на SiPM подавалось через один провод кабеля, съём сигнала происходил через другой провод.

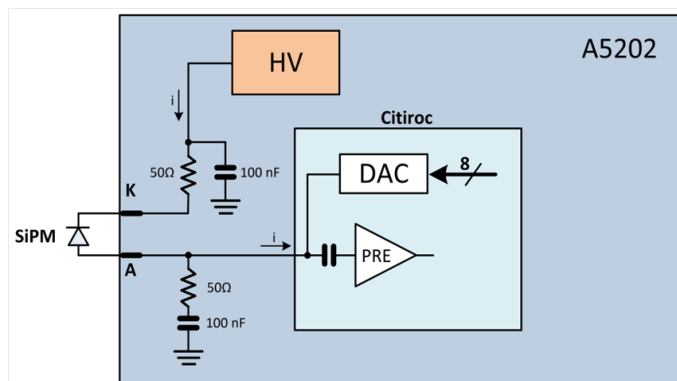


Рисунок 9 — Схема подключения SiPM через плоскую пару

### 1.5.3 Без фильтра: коаксиальный кабель

Коаксиальный кабель — электрический кабель состоящий из соосно расположенных центрального проводника - жилы и внешнего проводника - оплётки. Центральный проводник изготовлен из меди и отвечает за передачу сигнала. Между жилой и оплёткой находится изоляция - диэлектрик. Внешний проводник выполнен в виде сетки, которая служит для экранирования и защиты сигнала от электромагнитных помех. Снаружи экран покрыт внешней оболочкой.



Рисунок 10 — Коаксиальный кабель

В данном варианте подключения SiPM к CAEN FERS питание приходило с оплётки коаксиального кабеля, а сигнал поступал через центральный проводник.

## 2 Представление результатов

Разрешение - один из главных параметров детектора. Оно зависит от схемы подключения детектора, подачи питания и многих других факторов. В данной работе необходимо определить оптимальную схему подачи питания и вывода сигнала, поэтому разрешение подходит как критерий для сравнения трёх видов подключения SiPM. Разрешение проще всего определить по одноэлектронному спектру. Одноэлектронный спектр - это спектр сигналов с SiPM при регистрации единичных фотонов. Первый пик отображает события, когда не сработала ни одна ячейка фотоумножителя. Второй пик показывает события, в которых сработал один пиксель и т.д.. Относительное разрешение определяется формулой:

$$\delta = \frac{2,35 \times \sigma}{\text{mean}_3 - \text{mean}_2} \times 100\% \quad (1)$$

$\sigma$  - среднеквадратичное отклонение

2,35 - коэффициент пропорциональности между  $\sigma$  и шириной пика на половине высоты

$2,35 \times \sigma$  - ширина пика на половине высоты

mean - положение середины пика

$\text{mean}_{i+1} - \text{mean}_i$  - коэффициент усиления SiPM в ед. каналах кодировщика

Для сравнения и анализа этих параметров экспериментальным путем были получены гистограммы, соответствующие одноэлектронному спектру, для каждого способа подключения SiPM к FERS-5200. Экспериментальные данные обрабатывались с помощью математического пакета ROOT. Для оценки разрешения схемы выбран второй пик, соответствующий отклику одной ячейки SiPM. Определение ширины и положения пика проходило с помощью фитирования выделенного пика функцией Гаусса.

### 2.1 Внешний фильтр

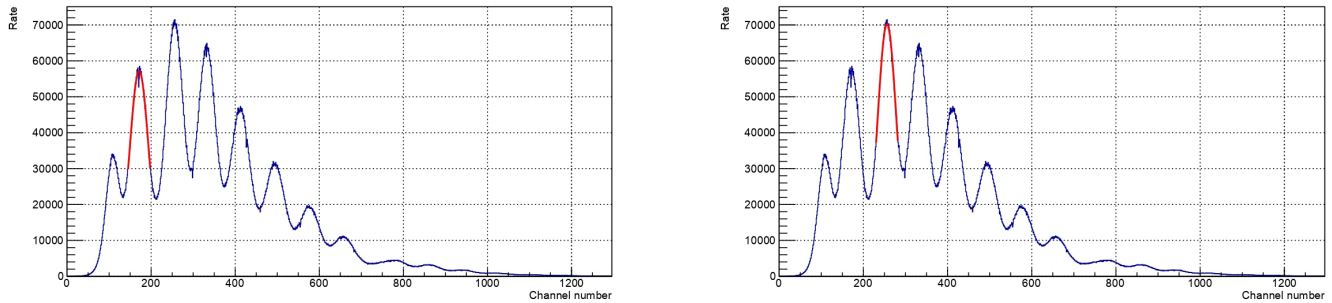


Рисунок 11 — Одноэлектронный спектр, полученный при подключении SiPM через плату питания с внешним фильтром

$$\text{mean}_2 = (1715,7 \pm 0,2) \times 0,1$$

$$\text{mean}_3 = (2561,5 \pm 0,2) \times 0,1$$

$$\sigma = (231,7 \pm 0,4) \times 0,1$$

$$\text{mean}_3 - \text{mean}_2 = (845,7 \pm 0,2) \times 0,1$$

$$\delta = (64,38 \pm 0,11)\% \sim 64\%$$

## 2.2 Без фильтра: плоская пара

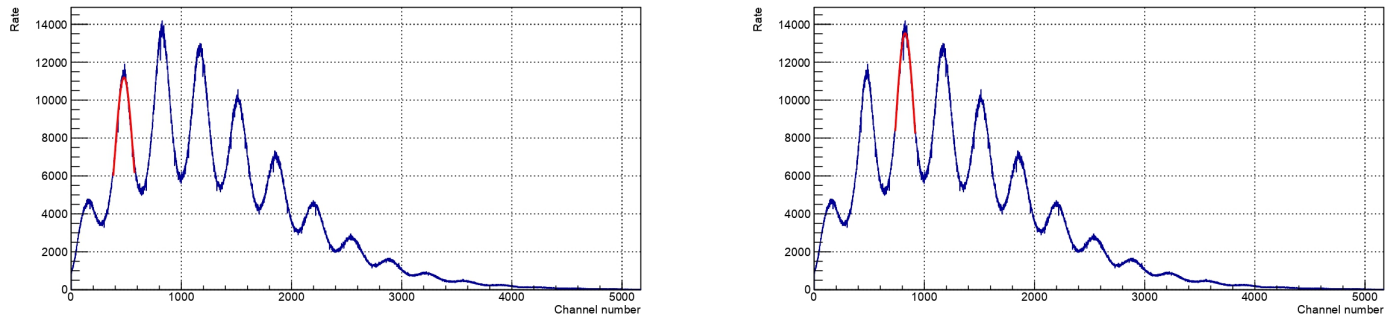


Рисунок 12 — Одноэлектронный спектр, полученный при подключении SiPM через плоскую пару

$$\begin{aligned} \text{mean}_2 &= 479,45 \pm 0,11 \\ \text{mean}_3 &= 825,82 \pm 0,12 \\ \sigma &= 87,3 \pm 0,2 \\ \text{mean}_3 - \text{mean}_2 &= 346,4 \pm 0,2 \\ \delta &= (59,23 \pm 0,14)\% \sim 59\% \end{aligned}$$

## 2.3 Без фильтра: коаксиальный кабель

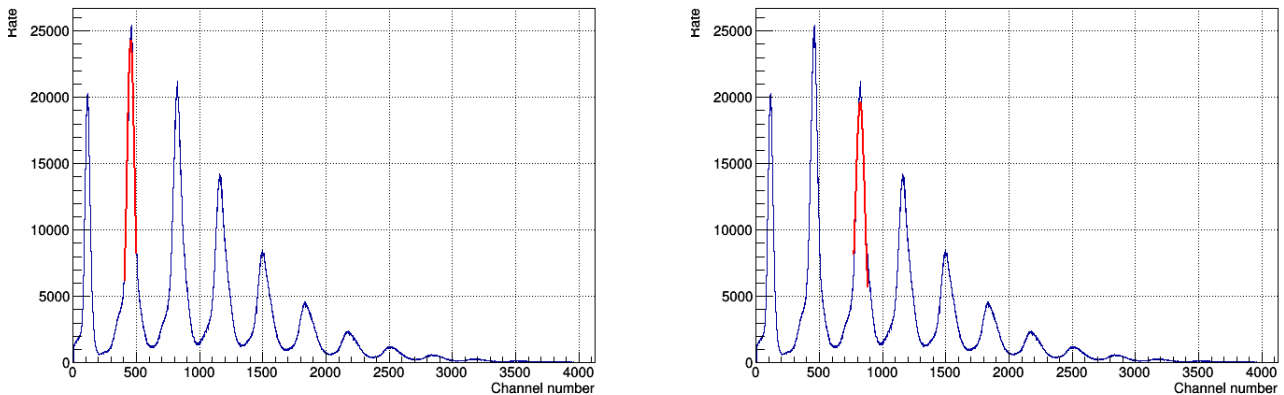


Рисунок 13 — Одноэлектронный спектр, полученный при подключении SiPM через коаксиальный кабель

$$\begin{aligned} \text{mean}_2 &= (4584,4 \pm 0,3) \times 0,1 \\ \text{mean}_3 &= (8357,4 \pm 0,4) \times 0,1 \\ \sigma &= (304,6 \pm 0,3) \times 0,1 \\ \text{mean}_3 - \text{mean}_2 &= 377,30 \pm 0,10 \\ \delta &= (189,7 \pm 0,2) \times 0,1\% \sim 19\% \end{aligned}$$

## 2.4 Анализ и сравнение результатов

Расстояние между пиками при использовании схемы с фильтром и при прямом подключении SiPM к FERS является разным. Во время срабатывания SiPM на резисторе  $R_1$  возникает скачок напряжения отрицательной полярности. Данный импульс накладывается на прямой сигнал, снимаемый с катода SiPM. В результате амплитуда конечного сигнала снижается.

Ожидалось, что амплитуда при подключении без внешнего фильтра будет одинаковой. Из обработанных результатов видно, что расстояние между пиками для коаксиального кабеля и для плоской пары отличается на 8%, причём для плоской пары амплитуда сигнала меньше. Причиной данного отклонения могла быть разница температуры SiPM, но для такой разницы между амплитудами температура должна была повыситься на 10 градусов, чего не наблюдалось. Предположительно, уменьшение амплитуды с плоской парой может быть связано с потерями на излучение линией.

В данной работе относительное амплитудное разрешение определяется отношением ширины пика на половине высоты к расстоянию между соседними пиками (коэффициенту усиления). Сравнив полученные результаты относительного разрешения для каждой из схем подключения, приходим к выводу, что коаксиальный кабель является оптимальным решением, поскольку обладает наилучшим относительным разрешением. Подключение без внешнего фильтра через коаксиальный кабель показывает на одноэлектронном спектре наименьшее количество шумов, что объясняется экранированием жилы, по которой передаётся сигнал с SiPM, оплёткой.

## Заклучение

В ходе работы рассмотрены три варианта подключения SiPM к системе считывания CAEN FERS-5200 для прототипа детектора BBC на SPD. Для каждого из способов подключения SiPM получены одноэлектронные спектры. Одноэлектронные пики в спектре аппроксимировались функцией Гаусса, рассчитаны амплитудные разрешения пиков для подключения с внешним фильтром, через плоскую пару и коаксиальный кабель. Относительное разрешение составило  $\sim 64\%$ ,  $\sim 59\%$  и  $\sim 19\%$ , соответственно. Показано, что наилучшим результатом является  $19\%$ , что соответствует подключению SiPM через коаксиальный кабель без внешнего фильтра.

## Список литературы

1. Abazov V. et al. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. — 2024. — 4. — 2404.08317.
2. Abazov V. M. et al. Conceptual design of the Spin Physics Detector. — 2021. — 1. — 2102.00442.
3. Zakharov A. M. et al. Tile Detector Configurations Testing for the SPD Beam-Beam Counter Prototype // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2024. — Vol. 21, no. 4. — P. 735–738.
4. CAEN. FERS-5200 Front-End Readout System. — <https://www.caen.it/subfamilies/fers-5200/>. — Accessed: 2023-10-20.
5. Tishevsky A. V., Dubinin F. A. et al. Development of the SPD Beam-Beam Counter Scintillation Detector Prototype with FERS-5200 Front-End Readout System // Phys. Atom. Nucl. — 2024. — Vol. 87, no. 4. — P. 451–458.