

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
МЮОННЫЙ ТЕЛЕСКОП ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТА SPD

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

Москва 2025

Содержание

Введение	3
1 Эксперимент SPD	3
1.1 Описание установки SPD	4
1.2 Beam-Beam Counter	5
1.3 CAEN FERS-5200 DT5202	6
1.4 Цель и задачи	7
1.5 Мюонный телескоп	7
1.6 Методика эксперимента	8
2 Результаты измерений	9
2.1 Определение рабочего напряжения для SiPM	9
2.2 Калибровка шкалы в режиме Spectroscopy	10
2.3 Мюоны в режиме ToT	12
Заключение	15
Список литературы	16

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.

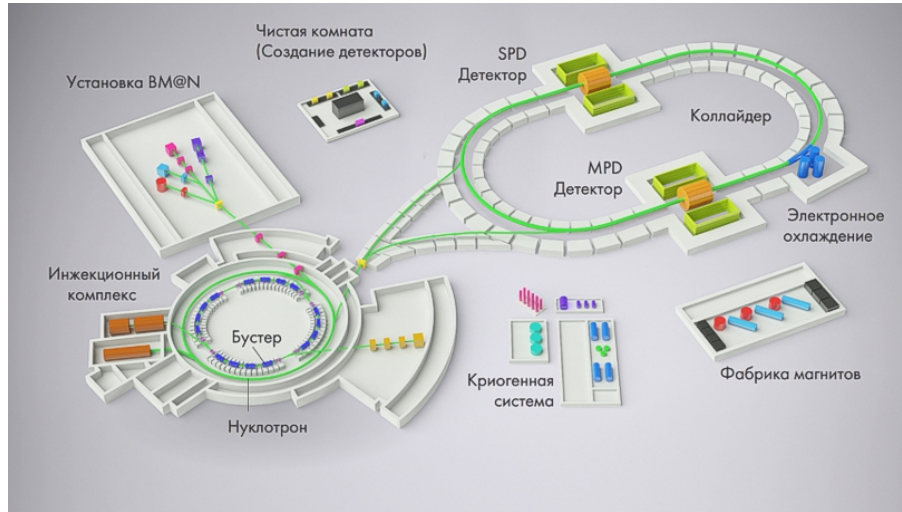


Рисунок 1 — Схема комплекса NICA

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 спин-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 диапазон между существующими экспериментами в области физики спина частиц.

1.1 Описание установки SPD

Экспериментальная установка SPD является комплексным 4- π 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 соленоид с магнитным полем 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 ≈ 60 пс, обеспечивает разделения π/K для энергии 1.2 ГэВ/с и K/p для 2.2 ГэВ/с на уровне 3σ .
- Аэрогелевый Черенковский детектор (Бэларускаы) может расширить диапазон энергий для разделений π/K и K/p .
- Электромагнитный калориметр (ЕС) — необходим для регистрации и идентификации частиц, вылетающих в телесный угол 4π . Обеспечит обнаружение γ и π^0 . Энергетическое разрешение калориметра $5\%/\sqrt{E}$.
- Мюонная система (RS) используется для идентификации мюонов.
- Счетчик столкновений пучков (BBC) будет отвечать за локальную поляризацию и регистрацию количества 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 поляризацию.

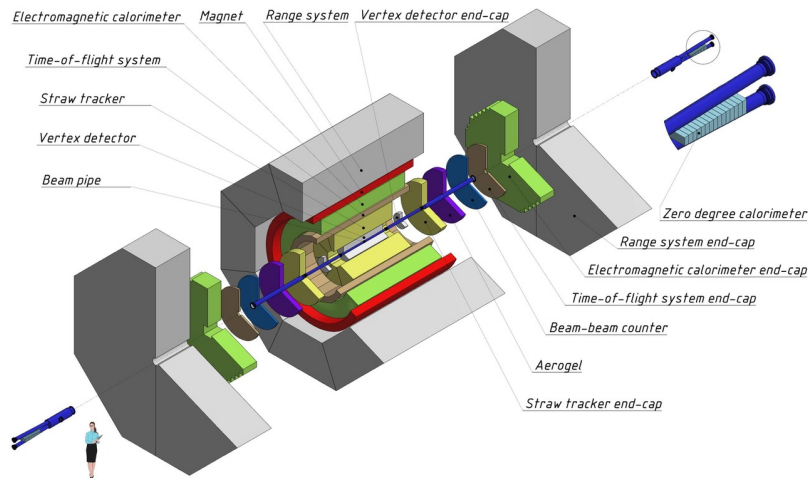


Рисунок 2 — Детекторная система SPD

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. Сцинтилляционные пластины соединены с кремниевыми фотоумножителями (SiPM) через тракт, состоящий из спектросмещающего оптоволоконна (шифтер) и чистого оптоволоконна [3]. Внутри тайла шифтер скручен в 3 витка. 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 и переизлучения света волокном составляет 4% . Применение данного волокна способно повысить однородность считывания светового сигнала с тайлов.

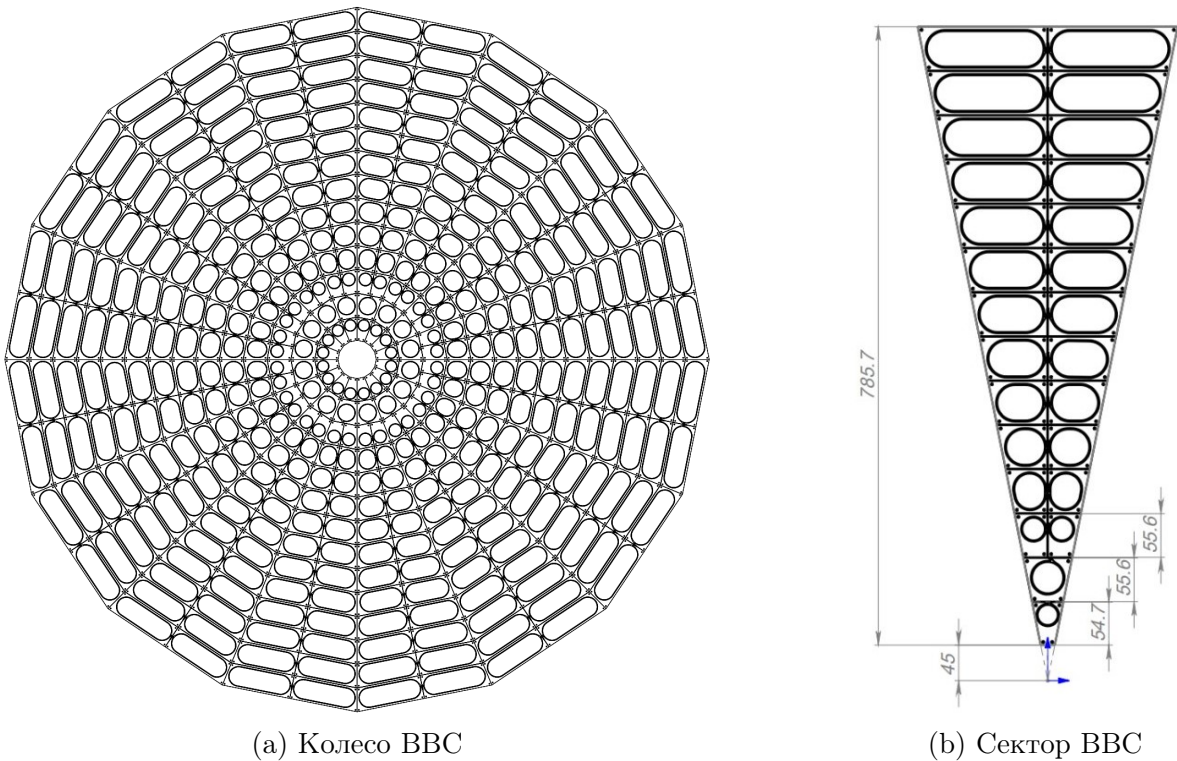


Рисунок 3 — Детектор BBC

1.3 CAEN FERS-5200 DT5202

CAEN DT5202 [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 DT5202 - микросхема Citiroc-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.

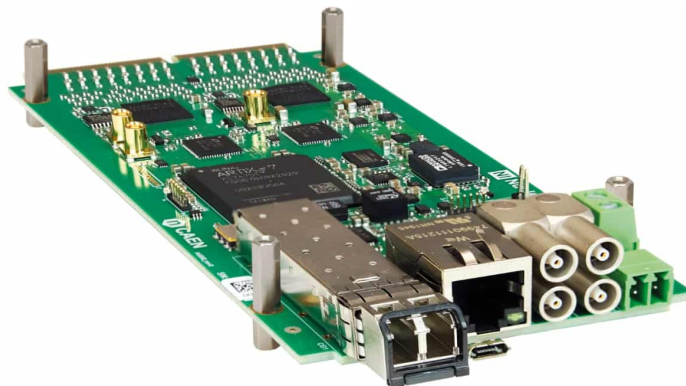


Рисунок 4 — Плата A5202 FERS-5200

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 CAEN DT5202

Задняя часть корпуса DT5202 предполагает возможность присоединения разных модулей. В данной работе использовалась матрица 8×8 SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08 [6] (Рисунок 6).

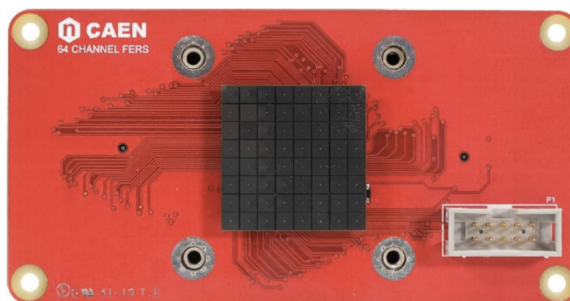


Рисунок 6 — Матрица Hamamatsu

1.4 Цель и задачи

Целью работы является получение отклика тайлов детектора BBC SPD в режиме ToT.

Задачи:

1. Выставить рабочее напряжение на каждом из используемых SiPMов.
2. Прокалибровать шкалу DT5202 в режиме измерения амплитуды импульса в фотоэлектронны.
3. Сопоставить шкалы кодировщика в режимах Spectroscopy и ToT.

1.5 Мюонный телескоп

Телескоп состоит из десяти одинаковых сцинтилляторов 2-ого ряда сектора BBC. В качестве спектросмещающего оптоволокна использовалось волокно SG BCF-92. Торцы волокон, приходящие на SiPMы, были одновременно заполированы. Все тайлы телескопа помещены в стойку для соблюдения соосности (Рисунок 7). Верхний и нижний тайлы телескопа являются триггерными. Общая высота телескопа составляет 16 см. Для фиксации соединения шифтеров с SiPM матрица Hamamatsu помещена в коннектор с отверстиями диаметром 1 мм, расположенными со сдвигом на 1 мм по диагонали от центра каждого из фотоумножителей (Рисунок 8). Сдвиг необходим, так как в центре SiPMов неходится область с пониженной чувствительностью. Волокна с восьми тайлов телескопа приходят на второй вертикальный ряд матрицы, то есть считывание сигналов происходит с 4-7 (1-ый чип Citiroc1A) и 36-39 (2-ой чип Citiroc1A) каналов DT5202. Шифтеры триггерных тайлов приходят на соседний третий ряд матрицы на верхний и нижний SiPM, что соответствуем 12 и 45 каналам электроники.

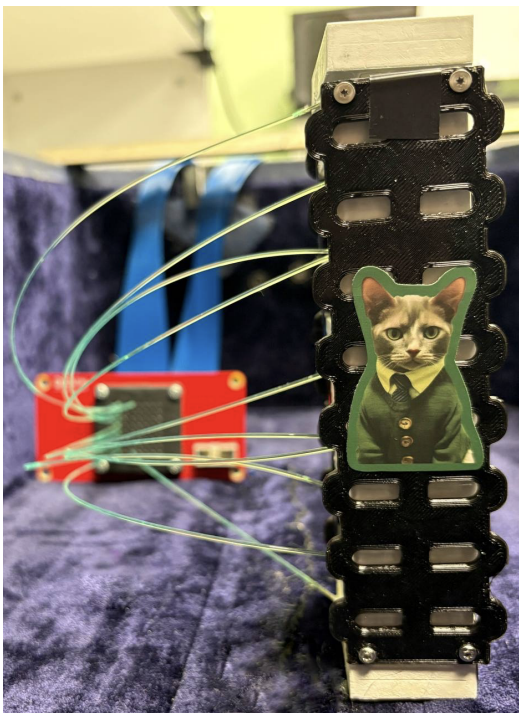


Рисунок 7 — Мюонный телескоп



Рисунок 8 — Коннектор на матрицу Hamamatsu

1.6 Методика эксперимента

Экспериментальная установка проводимого исследования состоит из матрицы полупроводниковых детекторов SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08, мюонного телескопа и системы считывания CAEN FERS5200 DT5202, которая так же служит источником питания для матрицы SiPMов.

Работа с CAEN DT5202 осуществляется с помощью специального программного обеспечения - Janus.

Сбор данных с тайлов телескопа осуществляется в двух режимах: измерение амплитуды импульса (РНА) и ToT (Time over Threshold - время над порогом). Триггером для записи сигналов с 8-ми исследуемых тайлов телескопа служит совпадение верхнего и нижнего тайлов - 12 и 45 каналы DT5202. Если триггер поступил на FERS, значит через весь телескоп прошел мюон - интересное нас событие, а не шумовой импульс, следовательно амплитуды и время над порогом данных сигналов будут записаны в гистограмму, преобразуя напряжение и время в единицы канала кодировщика.

Телескоп, высота которого составляет 16 см, регистрирует почти вертикальные мюоны.

Режим измерения амплитуды является линейным, а режим ToT нелинейен относительно инжектируемого заряда. Шкала режима РНА в единицах канала кодировщика может быть прокалибрована с помощью одноэлектронного спектра сигналов SiPM, что не подходит для шкалы в режиме ToT, вследствие его нелинейности. Поэтому, данные, полученные в режиме измерения амплитуды, являются референсными для калибровки режима ToT.

2 Результаты измерений

2.1 Определение рабочего напряжения для SiPM

Для определения пробойного напряжения каждого из 10-ти SiPMов были построены графики зависимости приложенного напряжения от расстояния между двумя соседними пиками одноэлектронного сигнала SiPM (Рисунок 9). Точка пересечения прямых с осью y соответствуют пробойному напряжению SiPM.

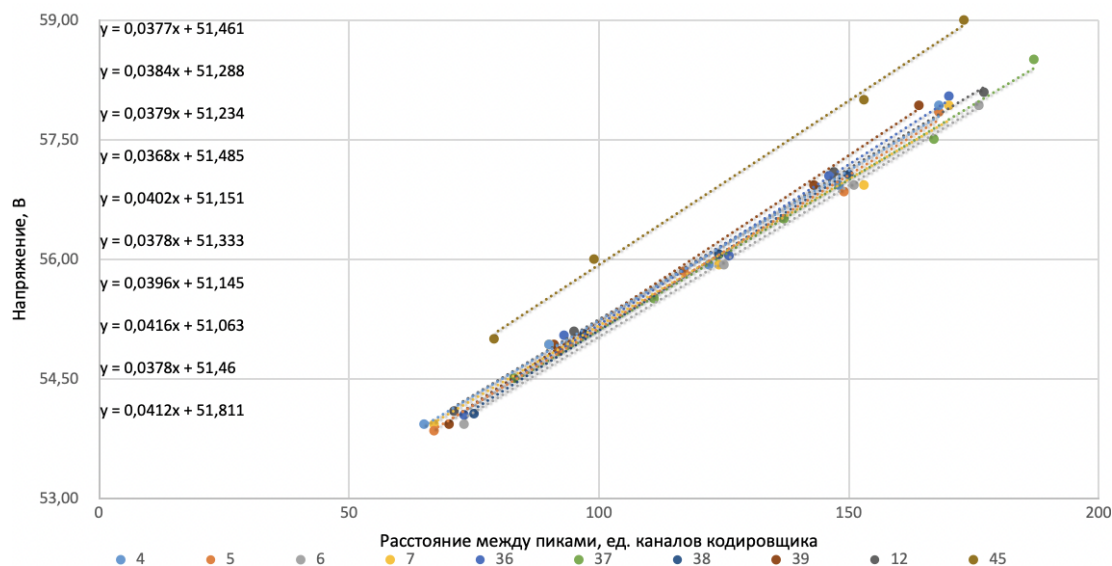


Рисунок 9 — Зависимость напряжения на SiPM от расстояния между пиками

Перенапряжение, выбранное для дальнейшей работы, соответствует 7В. Итоговые напряжения для каждого из SiPM:

Номер канала	Рабочее напряжение, В
4	58,46
5	58,29
6	58,23
7	58,49
12	58,46
36	58,15
37	58,33
38	58,15
39	58,06
45	58,81

Таблица 1 — Рабочее напряжение SiPMов

2.2 Калибровка шкалы в режиме Spectroscopy

В первую очередь для калибровки шкалы "Номер канала" в "Фотоэлектроны" были получены одноэлектронные спектры для восьми SiPM телескопа (Рисунок 10).

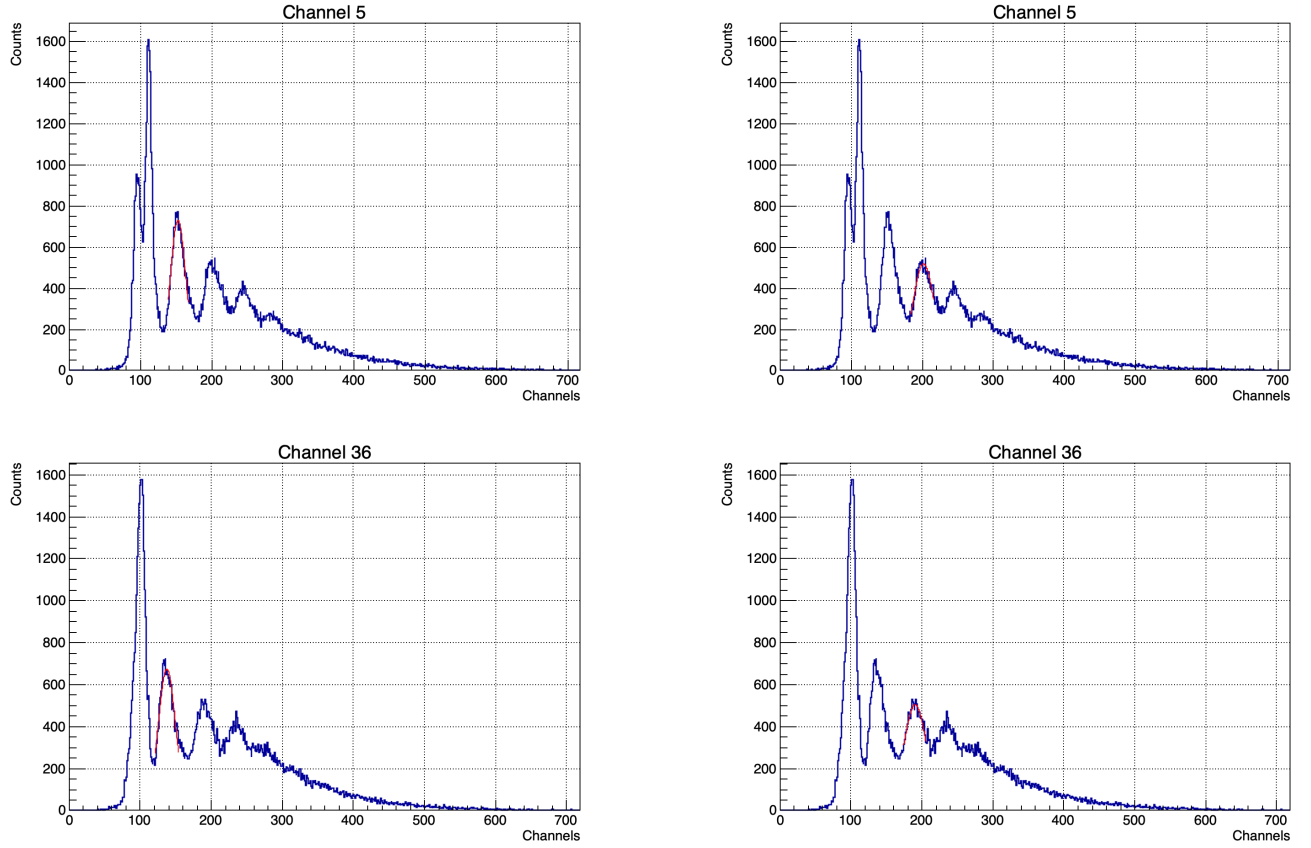


Рисунок 10 — Одноэлектронные спектры

Данные обрабатывались с помощью математического пакета ROOT. Определение положения пиков проходило с помощью фитирования пиков функцией Гаусса. Расстояние между двумя соседними пиками постоянно для одного спектра и соответствует одному фотоэлектрону в единицах каналов кодировщика. Данные калибровки представлены в Таблице 2.

Номер канала	Расстояние между соседними пиками в единицах каналов кодировщика
4	50
5	48
6	48
7	50
36	54
37	54
38	52
39	49

Таблица 2 — Калибровка каналов электроники

Далее были получены спектры энергетических потерь космического излучения (космических мюонов) в сцинтилляторе для восьми тайлов телескопа. Пример спектра энергетических потерь для пятого канала представлен на Рисунке 11. Для каждого полученного спектра была выполнена калибровка шкалы "Каналы" в "Фотоэлектроны" (Рисунок 12).

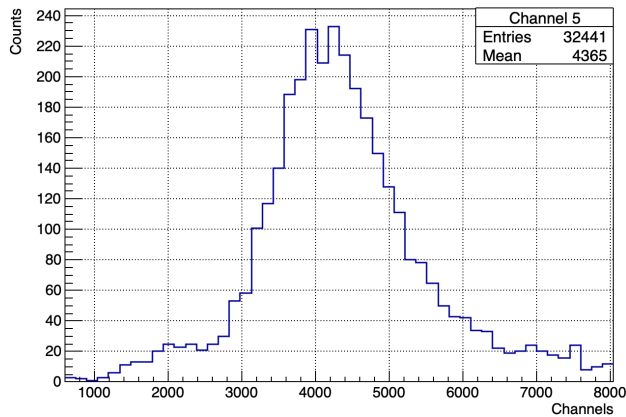


Рисунок 11 — Спектр энергетических потерь мюонов в тайлах

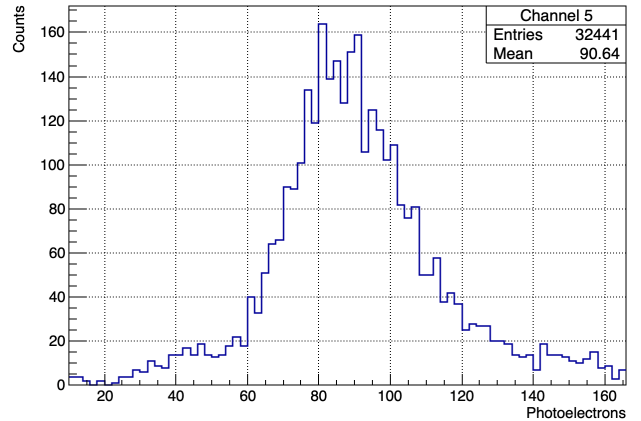


Рисунок 12 — Откалиброванный энергетический спектр

Положение широкого пика на оси "Фотоэлектроны" определялось с помощью аппроксимацией пика гистограммы свёрткой функций Ландау и Гаусса (Рисунок 13).

Возвращаемое значение MPV (most probable value - наиболее вероятное значение) соответствует пику энергетических потерь и числу сработавших ячеек SiPM. Согласно техническому паспорту Hamamatsu S13361-3050AE-08: при перенапряжении 7В оптическая связь ячеек SiPM составляет 10%. Это значение было учтено при определении окончательного количества фотоэлектронов. Итоговые данные занесены в Таблицу 3.

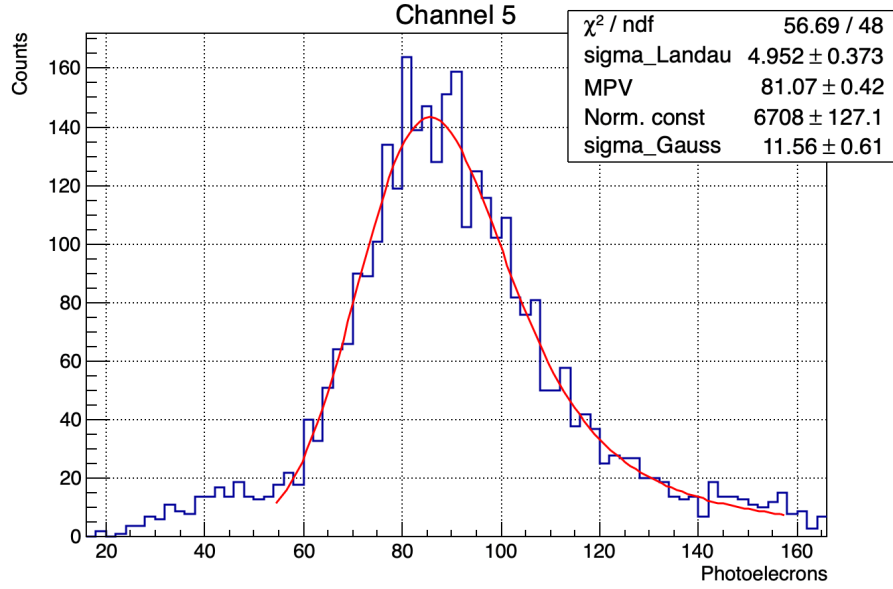


Рисунок 13 — Аппроксимация свёрткой функций Ландау и Гаусса пика энергетических потерь мюона в сцинтилляторе

Номер канала	Фотоэлектроны
4	54
5	73
6	67
7	67
36	57
37	57
38	57
39	59

Таблица 3 — Значения MPV для восьми тайлов телескопа

Среднее число фотоэлектронов: 61

Стандартное отклонение: 7

2.3 Мюоны в режиме ToT

Режим ToT нелинейный. Зависимость каналов кодировщика от инжектируемого заряда в режиме ToT представлена на Рисунке 14. Поэтому и спектры энергетических потерь мюонов в данном режиме имеют вид с поправкой на нелинейность.

Для аппроксимации спектров энергетических потерь свертка функций Ландау и Гаусса была модифицирована с помощью предложенного метода в руководстве по использованию DT5202:

$$\text{ToT} = 0.0409 Q_{\text{in}}^3 + 19.749 Q_{\text{in}}^2 - 1.4547 Q_{\text{in}} + 26.873$$

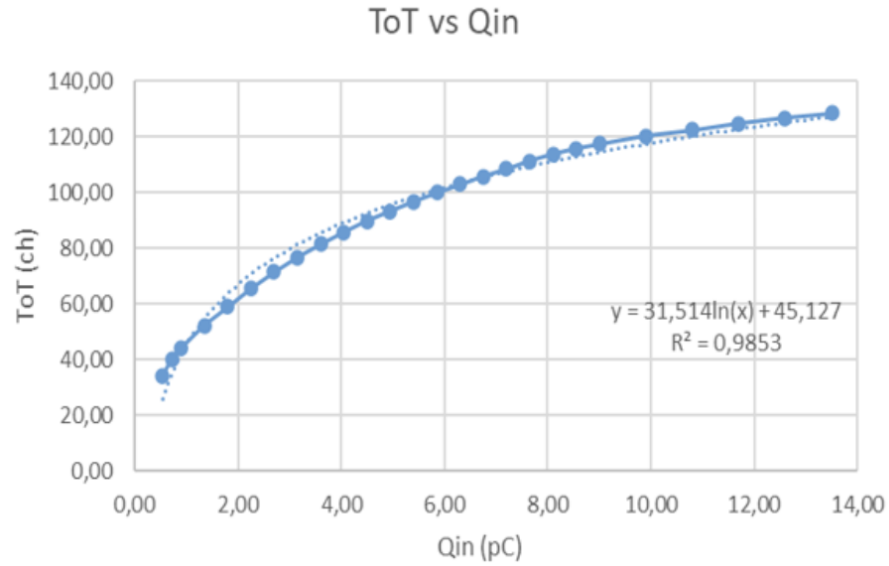


Рисунок 14 — Значение ToT от инжектируемого заряда

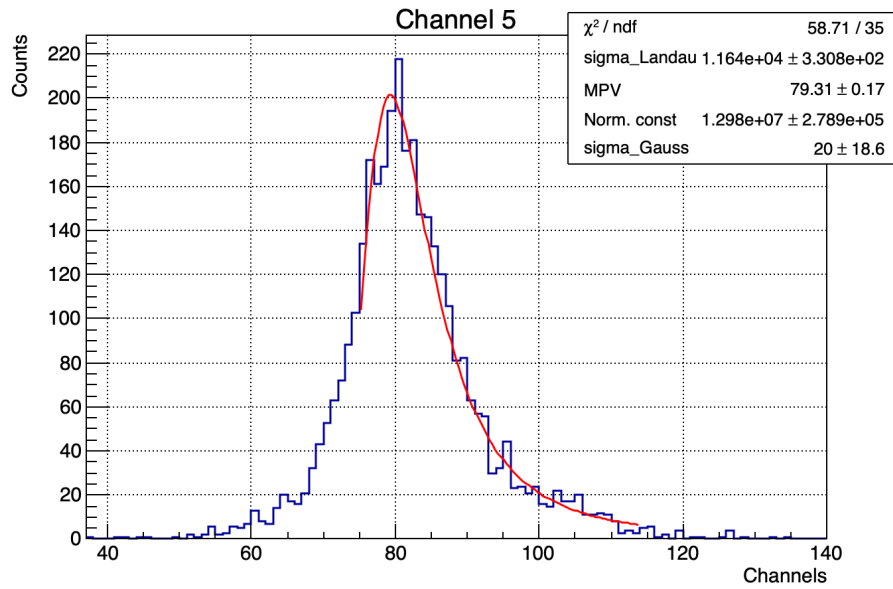


Рисунок 15 — Аппроксимация модифицированной свёрткой функций Ландау и Гаусса пика энергетических потерь мюона в режиме ToT

Модифицированная свёртка плохо описывает левый хвост распределения, который возник вследствие краевых эффектов тайла - вероятность захвата фотона, родившегося вне кольца из шифтера, меньше, чем родившегося внутри. Значения MPV для восьми тайлов представлены в Таблице 4.

Сопоставим значения MPV для режима Spectroscopy и режима ToT и получим калибровку одного канала шкалы калориметра режима ToT в фотоэлектронах.

Номер канала	MPV
4	73
5	77
6	76
7	77
36	77
37	77
38	77
39	75

Таблица 4 — Значения MPV для восьми тайлов телескопа в режиме ToT

Номер канала	Канал кодировщика	Фотоэлектроны
4	73	54
5	77	73
6	76	67
7	77	67
36	77	57
37	77	57
38	77	57
39	75	59

Таблица 5 — Калибровка одного канала электроники в режиме ToT

Заключение

В ходе работы выполнено несколько задач. Для каждого из десяти SiPM подобрано и установлено рабочее напряжение детекторов. Шкала каждого из восьми каналов DT5202 прокалибрована в фотоэлектроны в режиме РНА. Проведена аппроксимация сверткой функций Ландау и Гаусса. Для режима ToT функция аппроксимации была модифицирована с поправкой на нелинейность шкалы ToT. Для 8-ми каналов в режиме ToT проведена калибровка одного канала кодировщика в фотоэлектроны.

Список литературы

1. Abazov V. et al. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // Natural Science Review. — 2025. — Apr. — Vol. 1, no. 1. — P. 1. — Access mode: <https://nsr-jinr.ru/index.php/nsr/article/view/35>.
2. Abazov V. M. et al. Conceptual design of the Spin Physics Detector. — 2021. — Jan. — 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.
6. MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) arrays: S13361-3050 series. — 2024. — Nov. — Access mode: http://www.hamamatsu.com/sp/ssd/doc_en.html.