

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
ТЕСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО
ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD С
ПОМОЩЬЮ МЮОННОГО ТЕЛЕСКОПА

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 2026

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 Проверка с помощью ^{90}Sr	9
2.2 Определение рабочего напряжения для SiPM	10
2.3 Калибровка шкалы в режиме Spectroscopy	12
2.4 Мюоны в режиме ToT	14
Заключение	16
Список литературы	17

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.

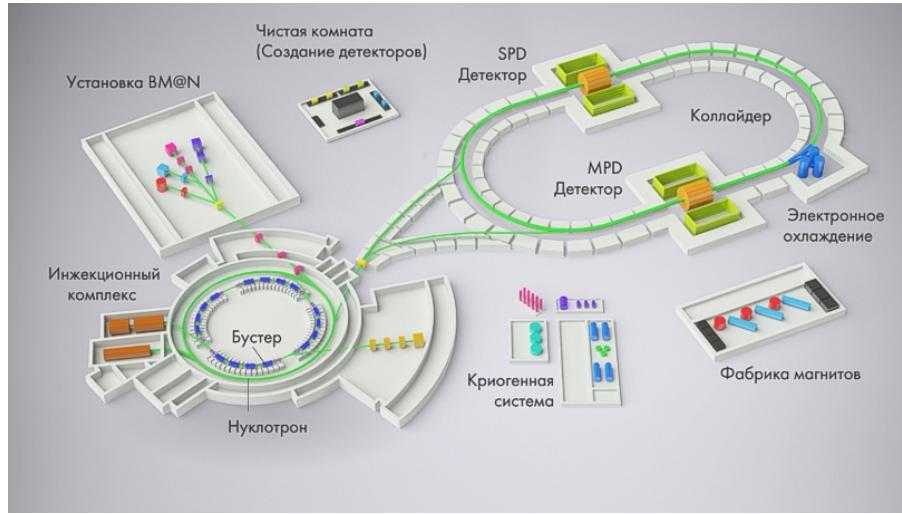


Рисунок 1 — Схема комплекса NICA

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 энерговыделения (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 (EC) — 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.

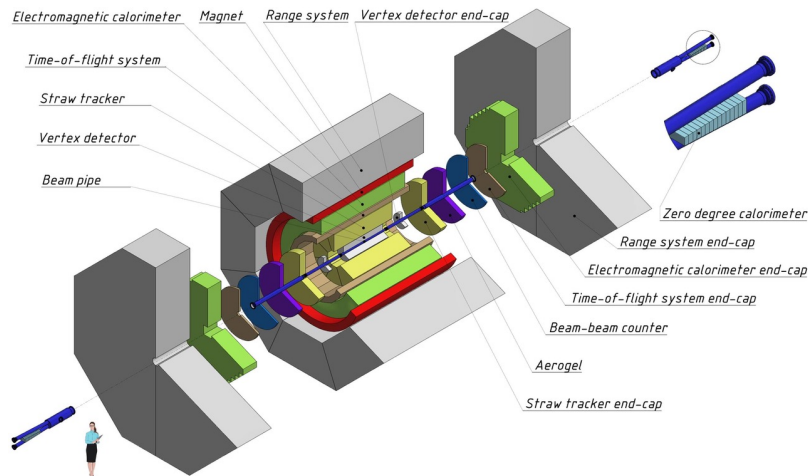


Рисунок 2 — Детекторная система SPD

1.2 Beam-Beam Counter

В качестве инструмента для локальной поляриметрии и контроля светимости на SPD планируется система Beam-Beam Counter. Сцинтиляционный детектор имеет секторную структуру - он состоит из 16 секторов, образующих одно из двух колец. Каждый сектор состоит из 26 тайлов. Сцинтиляционные 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.

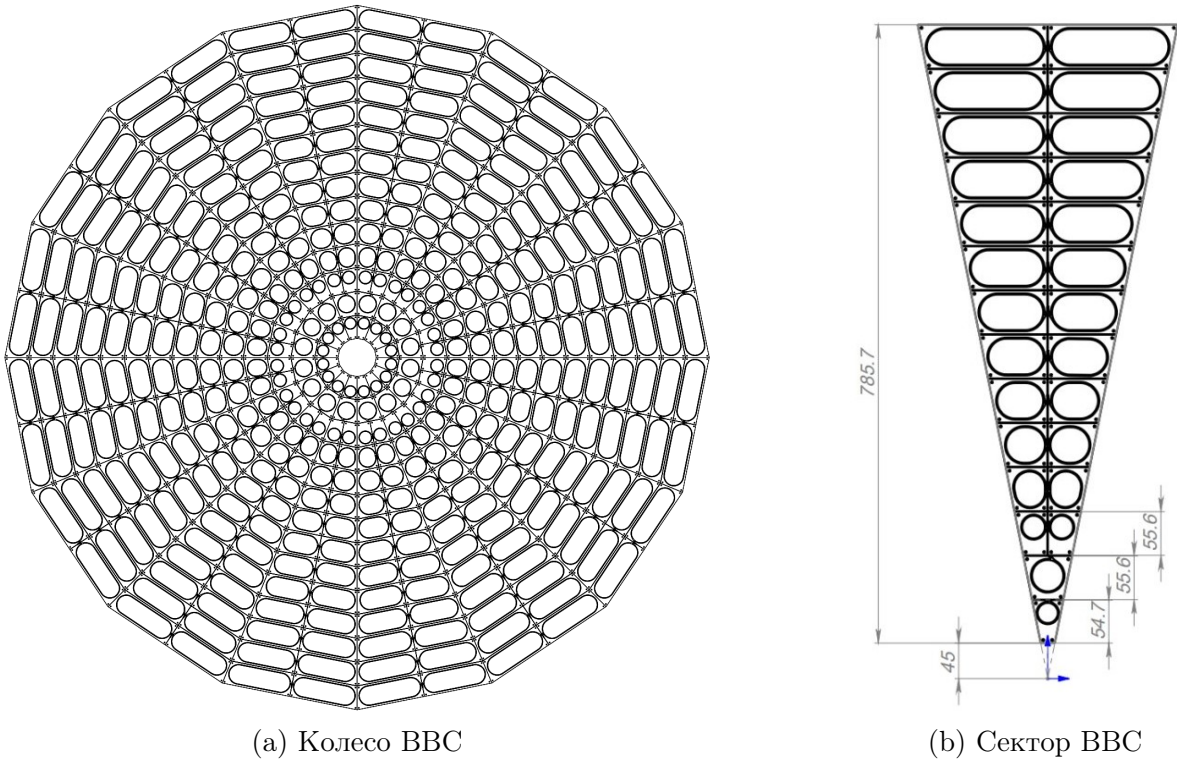


Рисунок 3 — Детектор ВВС

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.

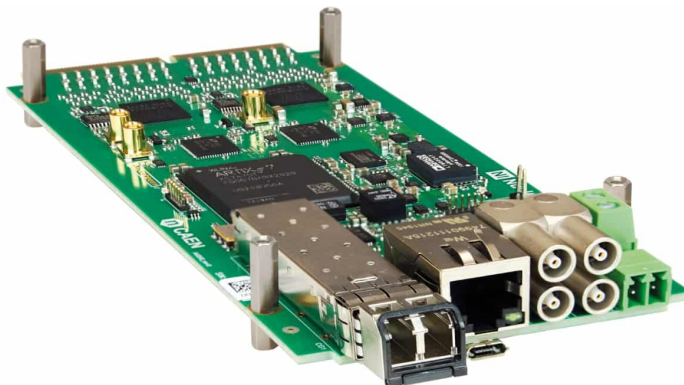


Рисунок 4 — Плата A5202 FERS-5200

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

1.4 Цель и задачи

Целью работы является оценка работы прототипов детектора BBC SPD при помощи мюонного телескопа.

Задачи:

1. Выставить рабочее напряжение на каждом из используемых SiPMов;
2. Оценить работоспособность тракта тайл - SiPM;
3. Получить распределение импульсов детектора от космических мюонов в режиме измерения амплитуды.

1.5 Мюонный телескоп

Телескоп состоит из десяти одинаковых сцинтиляторов 2-ого ряда сектора BBC. В качестве спектросмещающего оптоволоконна использовалось волокно SG BCF-92. Свободные торцы волокон вклеены в отверстия коннектора с помощью двухкомпонентной эпоксидной смолы (Рисунок 6). По установленному регламенту все волокна были одновременно запечатаны. Все тайлы телескопа помещены в стойку для соблюдения соосности (Рисунок 7). Общая высота телескопа составляет 16 см.

Собранный свет в тайле через шифтер попадает на SiPMы. 12 SiPM Onsemi 1×1 мм располагаются на печатной плате (Рисунок 8). Так же на плате располагается ответная часть коннектора, обеспечивающая соосность и надежное соединение между волокнами и SiPM. Плата соединяется с DT5202 посредством шлейфа.

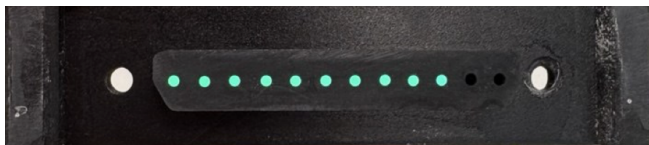


Рисунок 6 — Коннектор с вклеенными волокнами

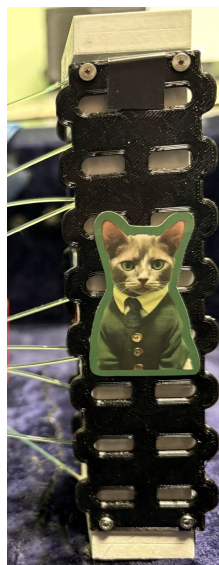


Рисунок 7 — Мюонный телескоп

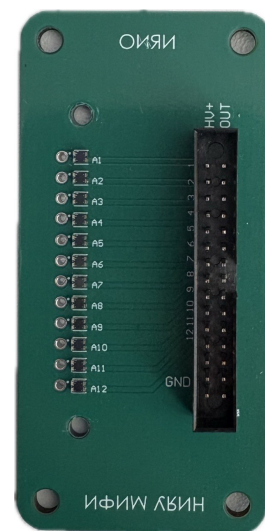


Рисунок 8 — Печатная плата с SiPM

1.6 Методика эксперимента

Экспериментальная установка проводимого исследования состоит из печатной платы на 12 SiPM, мюонного телескопа и системы считывания CAEN FERS5200 DT5202, которая так же служит источником питания для SiPMов.

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

Для начала в качестве быстрой проверки работоспособности установки использовался источник ^{90}Sr . Индивидуально на каждый тайл телескопа был установлен стронций и получены спектры импульсов стронция, по которым можно определить работоспособность тракта.

Сбор данных с тайлов телескопа осуществляется в двух режимах: измерение амплитуды импульса (PNA) и ToT (Time over Threshold - время над порогом). Триггером для записи сигналов с тайлов телескопа служит совпадение двух из первого, предпоследнего и последнего тайлов (два из 18, 34 и 36 каналов). Если триггер поступил на FERS, значит через весь телескоп прошел мюон - интересующее нас событие, 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.

2 Результаты измерений

2.1 Проверка с помощью ^{90}Sr

Для быстрой проверки соосности шиферов и SiPM, светопередачи и работоспособности тайлов, каждый тайл облучался радиоактивным ^{90}Sr . Время наборов данных спектров было одинаково и составляло 150 сек. На рисунках и представлены спектры импульсов стронция-90. В качестве параметра оценки состоятельности тайла была выбрана точка пересечения продолжения прямолинейного участка распределения с осью X. Для этого на прямолинейную часть спектра был наложен фит прямой. Коэффициент b - критерий отбора.

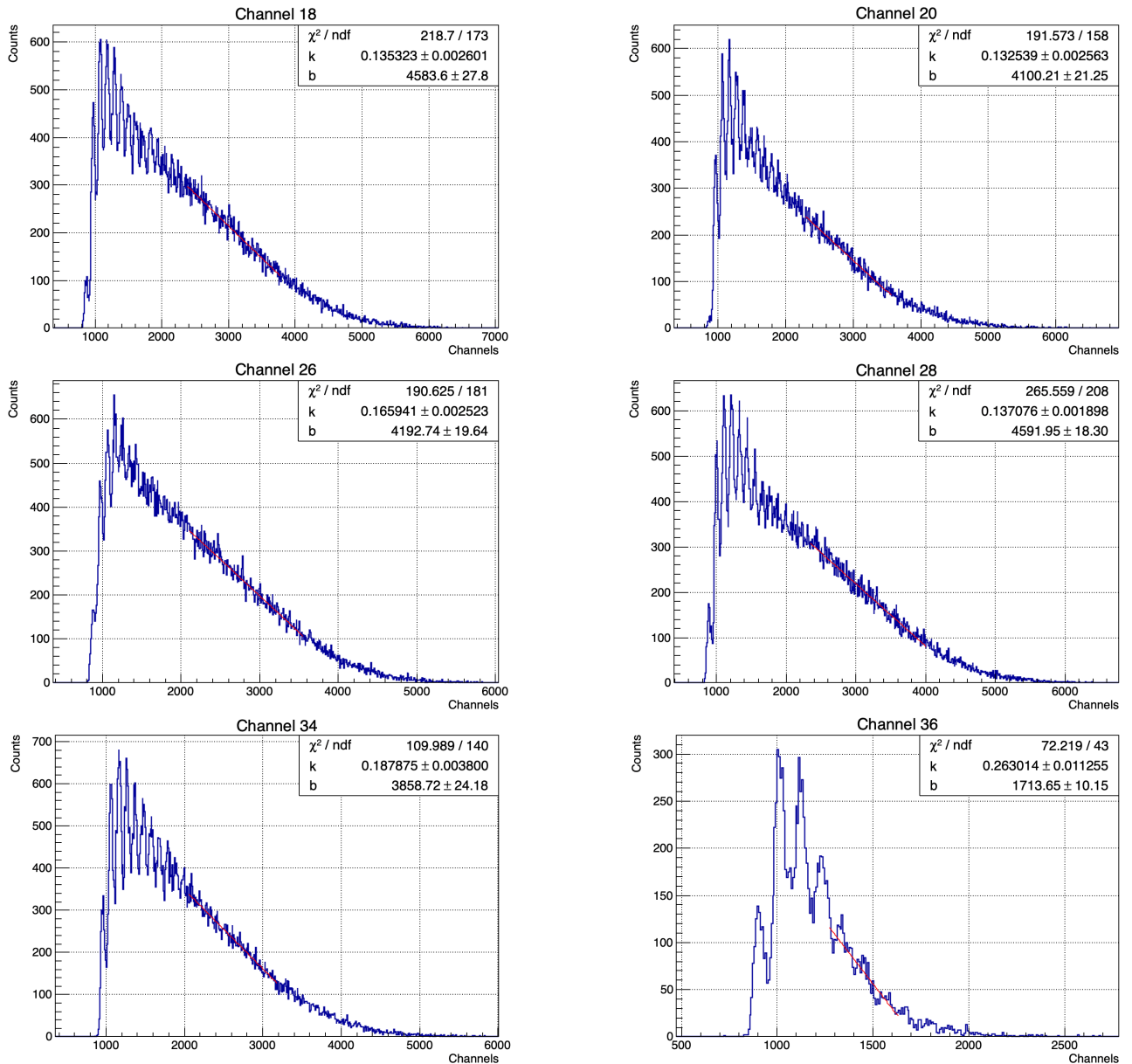


Рисунок 9 — Спектры импульсов ^{90}Sr

Номер канала	Коэффициент b , каналы
18	4583,6
20	4100,21
22	5444,83
24	4000,00
26	4192,74
28	4591,95
30	4155,46
32	4232,52
34	3858,72
36	1713,65

Таблица 1

Результаты полученных коэффициентов b для каждого из спектров записаны в Таблицу 1.

Среднее значение b (без учета 36 канал): 4351,11

Стандартное отклонение (без учета 36 канал): 476,22

Значение параметра b 36-ого канала не укладывается в 3σ , значит данный тайл обладает дефектом и не может работать исправно. Для того, что бы повысить эффективность телескопа, к триггерным тайлам был добавлен 34 канал. По итогу как триггер стоит можаритарное совпадение двух из 18, 34 и 36 каналов.

2.2 Определение рабочего напряжения для SiPM

Для определения пробойного напряжения 10-ти SiPMов была снята зависимость приложенного напряжения от расстояния между двумя соседними пиками одноэлектронного спектра сигналов SiPM. Примеры представлены на Рисунках 10. Точки пересечения прямых с осью Y соответствуют пробойному напряжению SiPM.

Перенапряжение, выбранное для дальнейшей работы, соответствует 5В. Итоговые напряжения для каждого из SiPM:

Номер канала	Рабочее напряжение, В
18	29,48
20	29,50
22	29,72
24	29,67
26	30,05
28	29,75
30	29,66
32	29,61
34	29,60
36	29,75

Таблица 2 — Рабочее напряжение SiPMов

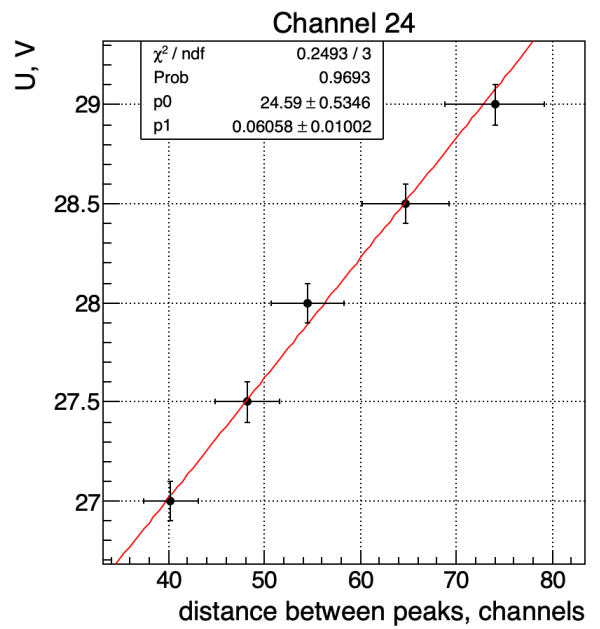
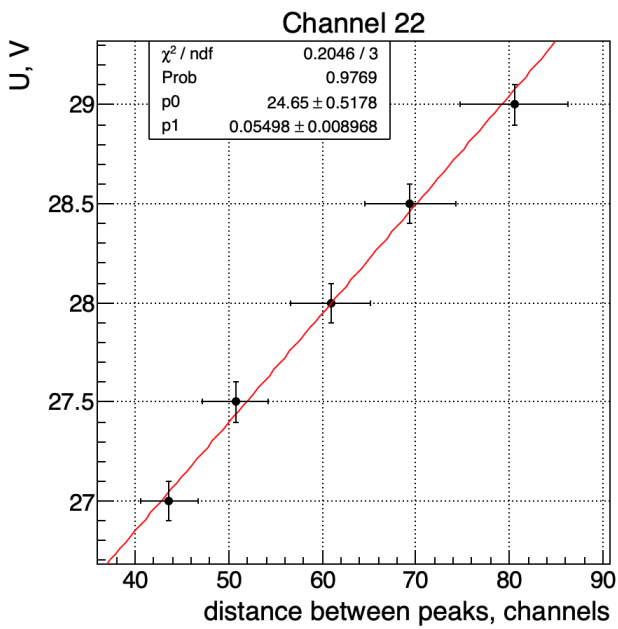
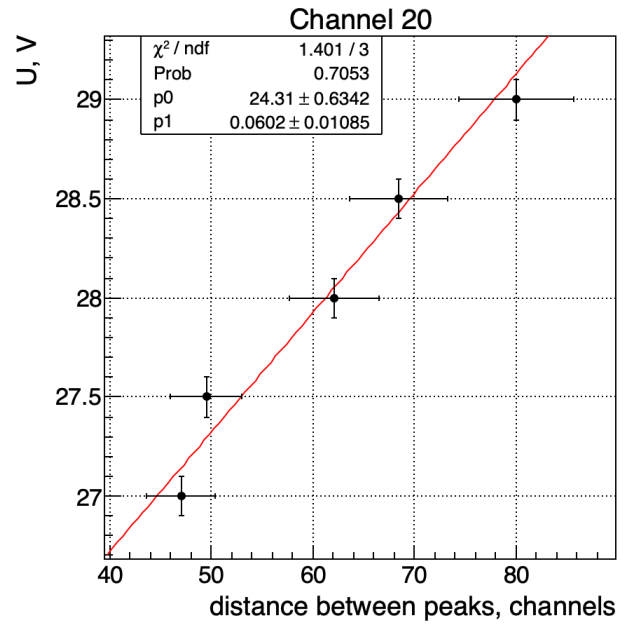
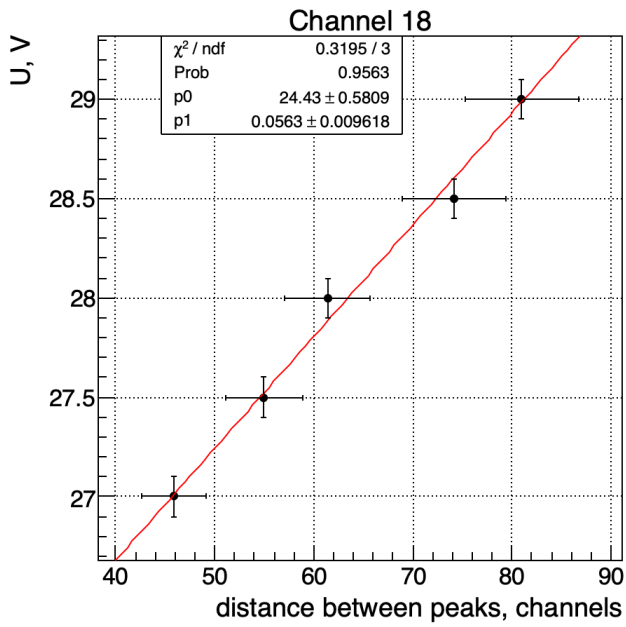


Рисунок 10 — Зависимость напряжения на SiPM от расстояния между пиками

2.3 Калибровка шкалы в режиме Spectroscopy

В первую очередь для калибровки шкалы "Номер канала" в "Фотоэлектроны" были получены одноэлектронные спектры для десяти SiPM телескопа (Рисунок 11).

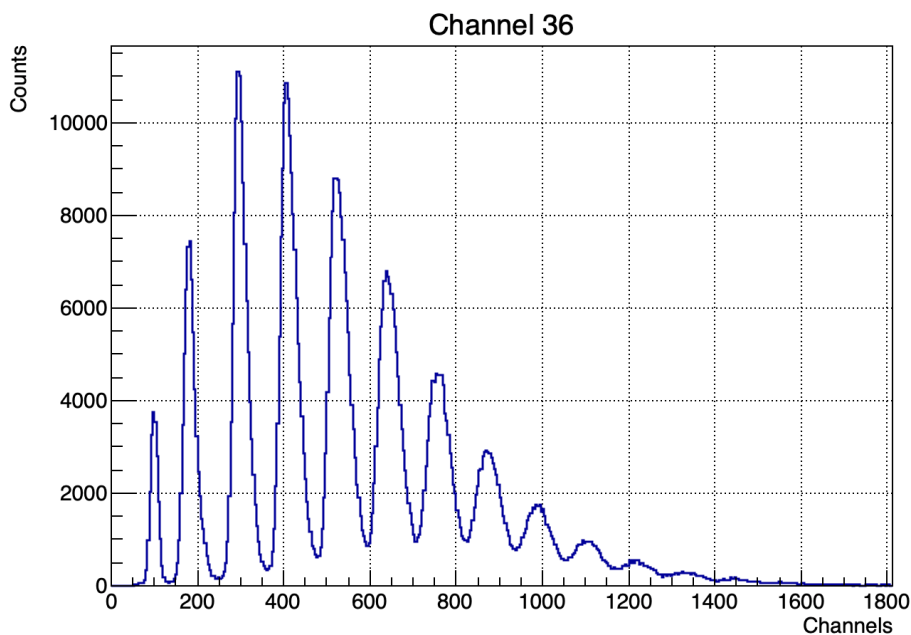


Рисунок 11 — Одноэлектронный спектр сигналов SiPM

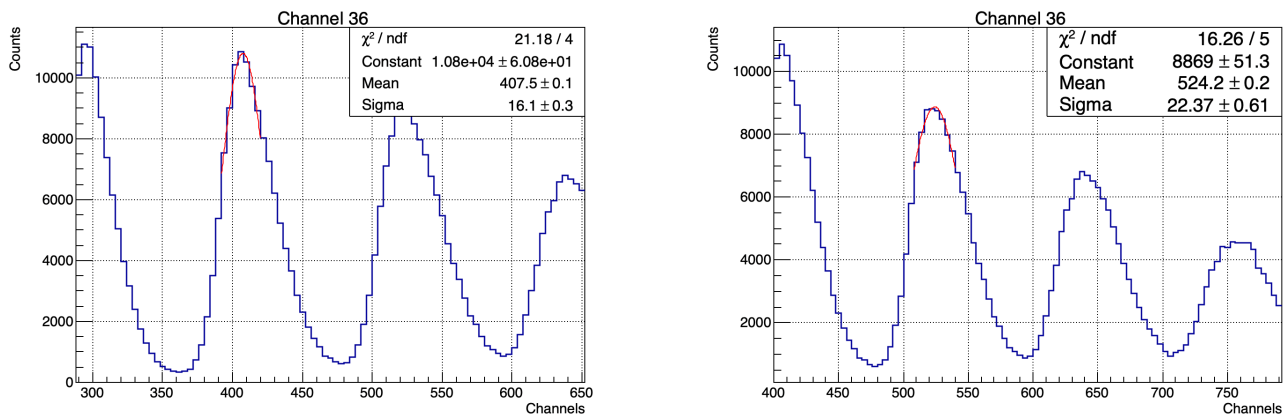


Рисунок 12 — Отфитированные пики одноэлектронного спектра

Данные обрабатывались с помощью математического пакета ROOT. Определение положения пиков проходило с помощью фитирования пиков функцией Гаусса (Рисунок 12). Расстояние между двумя соседними пиками постоянно для одного спектра и соответствует одному фотоэлектрону в единицах каналов кодировщика. Данные калибровки представлены в Таблице 3.

Номер канала	Расстояние между соседними пиками в единицах каналов кодировщика
18	108
20	111
22	116
24	109
26	100
28	116
30	112
32	103
34	109
36	111

Таблица 3 — Калибровка каналов электроники

Далее были получены спектры энергетических потерь космического излучения (космических мюонов) в сцинтилляторе. Для каждого полученного спектра была выполнена калибровка шкалы "Каналы" в "Фотоэлектроны" (Рисунок 11). Положение широкого пика на оси "Фотоэлектроны" определялось с помощью аппроксимацией пика гистограммы свёрткой функций Ландау и Гаусса (Рисунок 13).

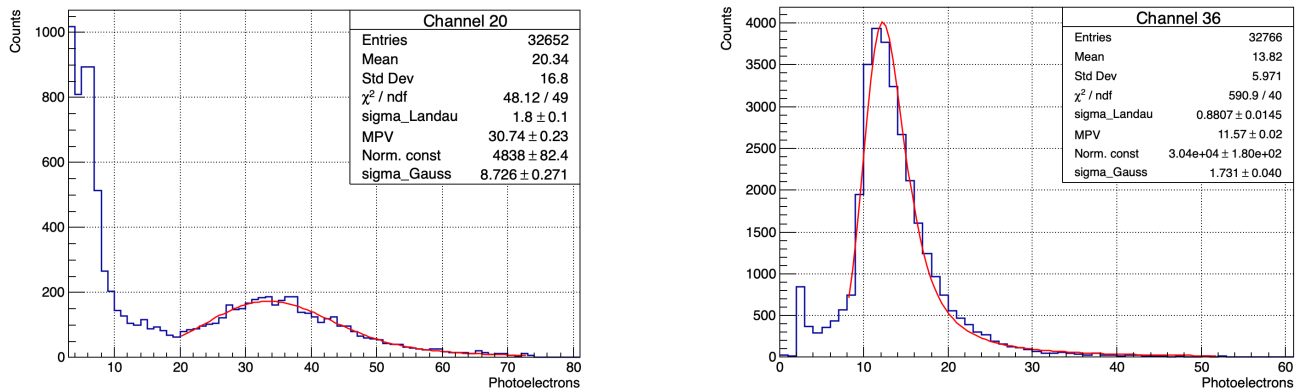


Рисунок 13 — Аппроксимация свёрткой функций Ландау и Гаусса пика энергетических потерь мюона в сцинтилляторе

Возвращаемое значение MPV (most probable value - наиболее вероятное значение) соответствует пику энергетических потерь и числу сработавших ячеек SiPM.

Номер канала	Фотоэлектроны
18	32,74
20	30,74
22	34,22
24	29,31
26	37,12
28	35,39
30	31,96
32	34,54
34	31,31
36	11,57

Таблица 4 — Значения MPV тайлов телескопа

Среднее число фотоэлектронов: 30,89

Стандартное отклонение: 6,80

Среднее число фотоэлектронов (без учета 36 канала): 33,04

Стандартное отклонение (без учета 36 канала): 2,34

2.4 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.

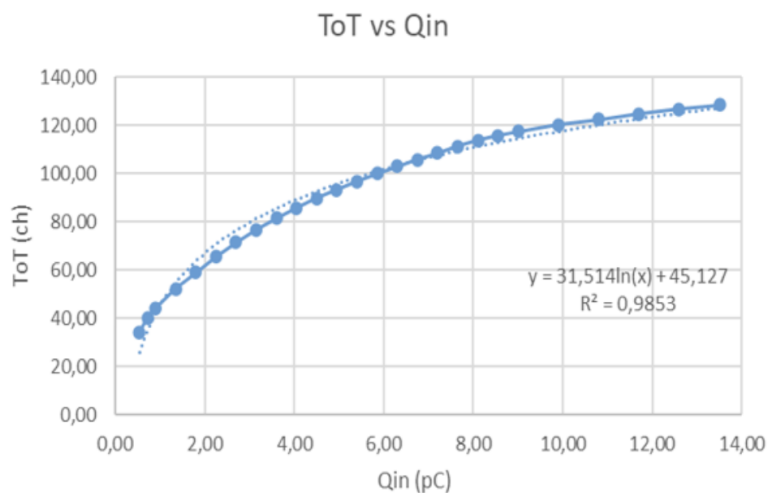


Рисунок 14 — Значение ToT от инжектируемого заряда

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

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

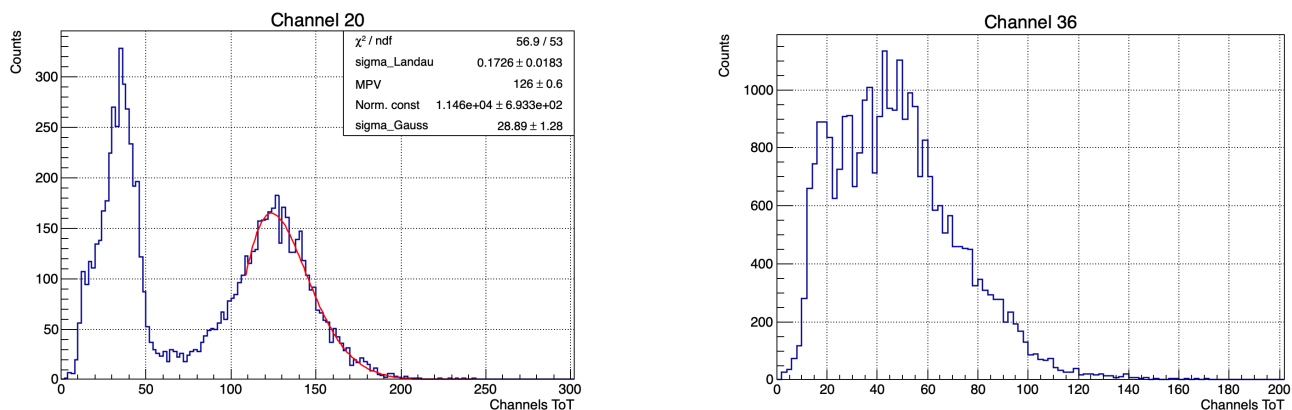


Рисунок 15 — Аппроксимация модифицированной свёрткой функций Ландау и Гаусса пика энергетических потерь мюона в сцинтиляторе

Значения MPV для тайлов представлены в Таблице 5.

Номер канала	MPV, каналы ToT
18	129,5
20	126,0
22	138,0
24	121,5
26	132,6
28	139,8
30	131,2
32	129,2
34	128,7

Таблица 5 — Значения MPV для восьми тайлов телескопа в режиме ToT

Заключение

В ходе работы выполнено несколько задач. Была обнаружена несоосность между волокнами и SiPM. Большой вклад в несоосность вносит коннектор для волокон. Для каждого из десяти SiPM подобрано и установлено рабочее напряжение. С помощью облучения сцинтилляторов Sr-90 был обнаружен тайл с дефектом. Шкала каждого из 10-ти каналов DT5202 прокалибрована в фотоэлектроны в режиме РНА. Проведена аппроксимация сверткой функций Ландау и Гаусса. Ожидаемый максимум отклика тайлов составляет (33 ± 2) фотоэлектрона;

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.