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.фм.н., доц.	 П. Е. Тетерин
Консультант, старший преподаватель	Ф. А. Дубинин
Консультант, лаборант	 А. М. Захаров
Студентка	 К. А. Тертышная

Содержание

B	веден	ше	3
1	Эк	сперимент SPD	3
	1.1	Описание установки SPD	4
	1.2	Beam-Beam Counter	5
	1.3	CAEN FERS-5200	6
	1.4	Цель и задачи	7
	1.5	Методика эксперимента	7
		1.5.1 Подготовка тайлов	7
		1.5.2 Установка	9
2	Пр	едставление результатов	10
	2.1	Сборка 8-ми тайлового телескопа	10
	2.2	Оценка разброса величины отклика тайлов при регистрации космических	
		МЮОНОВ	10
	2.3	Оценка эффективности детектора по заряженным релятивистским частицам	13
За	клю	чение	14
Ст	исон	к литературы	15

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 сооударения 3 МГц и светимостью до 10^{32} см⁻² 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 косплексным $4-\pi$ 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 соленоид с магнитным полем до 1 Тл на оси детектора, должна обеспечить разрешение по поперечному импульсу ≈ 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, обеспечит разделения π/K для энергии 1.2 ГэB/с и K/p для 2.2 ГэB/с на уровне 3σ.
- Аэрогелевый Черенковскый детектор (Бэларускаы) может расширить даипазон 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 π⁰. Энергетическое разрешение калориметра 5%/√E.
- Мюонная система (RS) используется для идентификации мюонов.
- Счетчик столкновений пучков (BBC) будет отвечать за локальную поляриметрию 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 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. Сцинтилляционные пластины соединены с кремниевыми фотоумножителями (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 ВВС

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 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 А
5202 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

Задняя часть корпуса FERS 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 исследование воспроизводимости отклика тайлов детектора BBC SPD.

Задачи:

- 1. Собрать установку на основе 8 одинаковых тайлов в мюонный телескоп.
- 2. Оценить разброс величины отклика тайлов при регистрации космических мюонов.
- 3. Оценить эффективность детектора по заряженным релятивистским частицам.

1.5 Методика эксперимента

Экспериментальная установка проводимого исследования состояла из матрицы полупроводниковых детекторов SiPM Hamamatsu 3×3 мм² (размер матрицы 8×8 SiPM), телескопа из восьми тайлов, двух триггеров и системы считывания CAEN FERS-5200. В качестве триггеров выступали тайл и сцинтиллятор. Триггерный тайл располагается сверху мюонного телескопа, и подключен к SiPM Onsemi 1×1 мм², питание которого происходит с помощью источника питания Keithley 2400. Сцинтиллятор расположен под телескопом и подключен к двум ФЭУ.

Работа с FERS-5200 осуществляется с помощью специального программного обеспечения - Janus.

1.5.1 Подготовка тайлов

В качестве сцинтилляторов для телескопа были выбраны тайлы 3-ого ряда сектора BBC. Для изготовления тайлов в сцинтилляционные пластины необходимо уложить и заклеить спектросмещающее оптоволокно. Спектросмещающее волкно тоже требует предварительной подготовки.

Для создания данного телескопа использовалось волокно SG BCF-92. Каждое из восьми волокон было отрезано лезвием по 54,5см. Далее шифтер помешался в коннектор на восемь волокон для дальнейшей полировки (Рисунок 7). Перед полировкой в коннекторе следует отрезать лезвием несколько миллиметров шифтера так, чтобы он стал вровень с коннектором. Ручная полировка на наждачной бумаге требует легкого давления на коннектор. Полировка начиналась на наждачной бумаге с зернистостью 3000, продолжалась на зернистости 5000, и закончилась полировка на 7000. По окончании полировки необходимо проверить состояние шифтера под микроскопом.



Рисунок 7 — Восемь шифтеров, помещенных в коннектор



Рисунок 8 — Шифтеры после полировки

Конец шифтера, который будет находиться внутри тайла, без предварительной обработки протягивается через коннектор для матрицы (Рисунок 9) и закрашивается белой краской в два слоя. После полировки шифтеры следует обработать спиртом по всей поверхности для устранения загрязнений. На данном этапе рекомендуется работать в перчатках. Далее в канавку тайла необходимо уложить шифтер в три оборота. Внутрь канавки заливается двухкомпонентный оптический клей СКТН-мед. Он обеспечивает отсутсвие воздушного зазора между сцинтиллятором и оптоволокном.



Рисунок 9 — Коннектор для матрицы Hamamatsu 8×8 SiPM

1.5.2 Установка

В первую очередь сигнал с SiPM верхнего тайла идёт на инвертор. Далее этот сиглан и сигналы с двух ФЭУ поступают на дискриминатор, где при превышении выставленных значений он формирует логическую единицу на выходе. После, сигналы с ФЭУ идут на логическиую схему совпадений. На выходе получается один сигнал, полученный логической операцией "AND". Далее этот сигнал и сигнал с верхнего тайла идут на вторую схему совпадений с логической опирацией "AND", на выходе формируется логическая единица. Полученный сигнал стандарта NIM приходит на FERS в качестве внешнего тригерра в T0-IN, подключенного в режиме Validation Signal.

Шифтеры с тайлов телескопа приходят на второй вертикальный ряд матрицы, то есть считывание сигналов происходит с 4-7 и 36-39 каналов. Когда вторая схема совпадений выдаёт логическую единицу и триггерный сигнал приходит на FERS, амплитуды сигналов с тайлов телескопа пишуться в гистограмму, преобразуя мВ в единицы канала кодировщика.



Рисунок 10 — Блок-схема эксперимента

2 Представление результатов

2.1 Сборка 8-ми тайлового телескопа

Готовые тайлы помещаются в пластиковую этажерку, обеспечивающую соосность всех тайлов и зазор между ними. Данная конструкция образует телескоп (Рисунок 11).



Рисунок 11 — 8-ми тайловый телескоп

2.2 Оценка разброса величины отклика тайлов при регистрации космических мюонов

В первую очередь для калибровки шкалы "Номер канала" в "Фотоэлектроны" были получены одноэлектронные спектры для каждого из восьми SiPM (Рисунок 12).



Рисунок 12 — Одноэлектронный спектр

Данные обрабатывались с помощью математического пакета ROOT. Определение положения пиков проходило с помощью фитирования пиков функцией Гаусса. Цены деления определялись как расстояние между 2 и 3 пиками, что соответствует одному фотоэлектрону. Данные калибровки представлены в Таблице 1.

	Расстояние между соседними
Номер канала	пиками в единицах
	каналов кодировщика
4	79
5	77
6	79
7	77
36	85
37	88
38	86
39	88

Таблица 1 — Калибровка каналов

Далее были получены спектры энергетических потерь космического излучения (космических мюонов) для каждого из тайлов телескопа. Набор данных происходил около 5ти дней. Малая статистика объяснима регестрацией в первом приближении вертикальных мюонов, объяснимой геометрией телескопа.

На Рисунке 13 в качестве примера представлен спектр 4-ого канала.



Рисунок 13 — Энергетический спектр

Для каждого полученного спектра была выполнена калибровка шкалы "Номер канала" в "Фотоэлектроны" (Рисунок 14). Положение широкого пика на оси "Фотоэлектроны" соответсвует числу сработавших ячеек SiPM.

Положение пика определялось с помощью фитирования пика свёрткой функций Ландау и Гаусса (Рисунок 15).



Рисунок 14 — Откалиброванный энергетический спектр



Рисунок 15 — Откалиброванный энергетический спектр фитированный свёрткой функций Ландау и Гаусса

Данные о количестве сработавших ячеек для каждого из каналов находятся в Таблице 2.

По окончании эксперимента было обнаружено, что шифтер 5-ого канала был выдвинут из коннектора ближе к фотоумножителям, чем остальные волокна. Вследствие этого соответсвующий SiPM выдавал большую амплитуду сигнала. Данные о величене отклика для данного тайла не будут рассматриваться в дальнейших расчетах, так как условие эксперимента для этого тайла отличалось от условий остальных 7-ми тайлов.

Номер канала	Фотоэлектроны
4	27
5	39
6	35
7	34
36	30
37	30
38	30
39	30

Таблица 2 — Количество сработавших ячеек

Среднее число фотоэлектронов: 31 Стандартное отклонение: 2,6

Ожидаемый максимум отклика тайлов составляет (31 ± 3) фотоэлектронов. разброс значений укладывается от 22 до 39 фотоэлектронов. Данной амплитуды сигнала достасточно для превышения шумовых сигналов электроники.

2.3 Оценка эффективности детектора по заряженным релятивистским частицам

Для оценки эффективности детектора необходимо было выбрать два референсных тайла, относительно которых будет рассчитывать эффективность регистрации мюонов. Для данного эксперимента были выбраны верхний и нижний тайлы, соотвествующие 4 и 37 каналам FERS. Если сигнал с этих двух тайлов одновременно послупает на FERS, то система пишет амплитуду сигналов остальных SiPM.

Эффективность вычисляется по формуле:

$$\epsilon = \frac{N_{>5ef}}{\text{entries}} \tag{1}$$

 $N_{>5ef}$ - количество событий, превышающих 5 фэ entries - общее количество событий

Номер канала	Эффективность, %
5	98
6	99
7	98
36	98
38	99
39	100

Таблица 3 — Эффективность 8-ми тайлового телескопа

Средняя эффективность: 99%

Заключение

В ходе работы выполнено несколько задач. Для каждого из тайлов телескопа получена величина отклика и определён разброс величины отклика тайлов при регистрации космических мюонов. Положение ожидаемого максимума отклика каждого из 7-ми тайлов составил (31 ± 3) фотоэлектронов, разброс составил 8 фотоэлектронов. Данный диапазон удовлетворяет условиям регистрации частицы. Оценена средняя эффективность телескопа, она составила 99%.

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://nsrjinr.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.