

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
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»

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

Разработка коннекторов для оптического
волокна для прототипа детектора ВВС в
эксперименте SPD@NICA

Студент

А. М.Торохов

Научный руководитель

П. Е.Тетерин

Москва 2023

Содержание

1	Введение	2
2	Цели и задачи эксперимента	4
2.1	Цели и задачи NICA	4
2.2	Цели и задачи SPD	5
3	Состав SPD	6
4	Обзор BBC	9
5	STAR EPD	11
5.1	Отличие BBC от EPD	14
6	Заключение	15
7	Список источников	16

1 Введение

NICA (Nuclotron-based Ion facility) – это новый ускорительный комплекс, который создается в ОИЯИ (Объединённом институте ядерных исследований) (Дубна, Россия). Любой детектор в физике высоких энергий — большой и сверхсложный объект. Его работу обеспечивают три основные системы: сбора данных, синхронизации и медленного контроля.

В своей работе NICA будет использовать взаимодействия пучков самых разных частиц: от протонов и поляризованных дейтронов до массивных ионов золота. Тяжелые ионы планируется разгонять до энергий 4,5 ГэВ (на нуклон), протоны – до 12,6 ГэВ. Регистрация параметров столкновений потоков частиц будет проводиться в двух точках. В них будут расположены проектирующиеся детекторы: MPD (Multi-Purpose Detector), предназначенный для проведения экспериментов в области релятивистской ядерной физики при столкновениях пучков ядер тяжелых элементов (золота), ядер тяжелых элементов с протонами и 7 протон-протонных столкновениях, а также SPD (Spin Physics Detector), предназначенный для проведения экспериментов по физике спина при столкновениях пучков ядер легких элементов. Эксперименты, которые будут проводиться на этих детекторах, а также эксперимент BMaN (Baryonic Matter at Nuclotron) на выведенном пучке, будут являться основными экспериментами суперколлайдера NICA. SPD (Spin Physics Detector) - это строящийся эксперимент на коллайдере NICA. Основная цель эксперимента — проверка основ квантовой хромодинамики путем

изучения поляризованной структуры нуклона и спиновых явлений при столкновении продольно и поперечно поляризованных протонов и дейтронов с энергией центра масс до 27 ГэВ и светимостью до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Изучение экстремально горячей и плотной ядерной материи представляет интерес для современной физики в связи с возможностью обнаружить новое и пока слабо изученное состояние материи – кварк-глюонную плазму (КГП), существование которой предсказано квантовой хромодинамикой (КХД) – теорией, изучающей сильное взаимодействие. В результате изучения КГП при высоких энергиях сталкивающихся нуклонов $\sqrt{S_{NN}} = 10 - 200 \text{ ГэВ}$ был обнаружен ряд новых явлений, таких как сильные коллективные потоки вторичных частиц, значительное уширение распределений по поперечным импульсам, сильная немонотонность отношения k/π в зависимости от энергии столкновения, повышенный выход странных частиц, подавление струй при прохождении через возбужденную ядерную струю и другие закономерности, представляющие огромный интерес для современной физики. Также эти исследования позволят изучить аспекты возникновения Вселенной несколько миллиардов лет назад и, прежде всего, процесс формирования из глюонов и кварков частиц барионной материи, существовавшей только на ранних этапах эволюции Вселенной и в недрах нейтронных звезд.



Рис. 1: Схема ускорительного комплекса NICA

2 Цели и задачи эксперимента

2.1 Цели и задачи NICA

- Исследование фазовой диаграммы сильно сжатой барионной материи в лабораторных условиях
- Исследование фазовой диаграммы ядерной материи, кварк-глюонной плазмы

Планируется осуществлять прикладные и фундаментальные исследования в таких областях науки и технологии, как:

- развитие реакторов, управляемых пучком ускорителя («производство энергии» с подкритичной сборкой), и технологий трансмутации отходов ядерной энергетики;
- тестирование радиационной стойкости электронных устройств;
- радиобиология и космическая медицина;
- терапия раковых заболеваний;
- Развитие и строительство экспериментального ком-

плекса:

- Исследование ядерных столкновений
- Анализ данных и интерпретация результатов

2.2 Цели и задачи SPD

Основным объектом является кольцевой ускоритель частиц, на котором будут расположены два детектора: MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector). В систему строящегося детектора SPD планируется установить счетчик столкновений пучков - Beam-Beam Counter (BBC). Перед проектируемым детектором ставятся следующие задачи:

- измерения локальной поляриметрии, на основе измерений азимутальных асимметрий инклюзивного рождения заряженных частиц в протон-протонных поляризованных столкновениях - мониторинг столкновений.
- дополнение к системе TOF.
- определение момента столкновения.

Также использование данного детектора позволит ввести в эксперимент ионную программу измерений, реализовав решение следующих задач:

- оценка центральности столкновений
- восстановление плоскости реакции

Детектор SPD задуман как универсальный 4π -спектрометр, основанный на современных технологиях. Общее количество каналов регистрации в установке SPD составляет около 500000. С учетом ожидаемой максимальной частоты возникновения интересующих взаимодействий пучков частиц около 3 МГц, суммарный поток данных

с детектора можно оценить как 20 ГБ/с, что эквивалентно 200 ПБ/год (для эксперимента предполагается выделить 30% пучкового времени коллайдера). Сбор, обработка и хранение такого объема данных представляет собой серьезную проблему для вычислительной инфраструктуры эксперимента и требует разработки новых методов и подходов для реконструкции событий, моделирования и физического анализа данных с использованием высокопроизводительных и распределенных вычислений.

3 Состав SPD

Для детектора спиновой физики SPD в данный момент идет завершающая стадия разработки концептуального дизайн-проекта. Со времени знаменитого спинового кризиса, начавшегося в 1987 году, проблема спиновой структуры нуклона остается одной из самых интригующих загадок в современной физике высоких энергий. Центральным компонентом этой проблемы, привлекающей в течение многих лет огромные теоретические и экспериментальные усилия, является то, как вращение нуклона строится из спинов и орбитальных импульсов его составляющих. Именно всестороннее исследование спина протона, изучение поляризованных частиц, а также изучение рождения J/ψ мезонов при помощи механизма Дрелла-Яна для получения новых спиновых и поляризационно зависимых партонных функций распределения являются главными целями эксперимента SPD.

Текущий дизайн детектора SPD предусматривает три модуля: две торцевые части (Endcap) и цилиндрическую секцию (Barrel). Каждая система имеет индивидуальную магнитную систему: торцевые части - соленоидные магнитные катушки (Sol magnet), цилиндрическая часть - тороидальная магнитная система (Tor magnet). Основные детекторные подсистемы: мюонная система (RS), электромагнитный калориметр (ECal), время-проекционная подсистема (PID), основной трекер (TR) и вершинный детектор (IT). Предлагаемая трехмодульная конструкция позволяет модернизировать и модифицировать каждую из основных подсистем детектора и проводить измерения с различными конфигурациями детектора. Текущий дизайн детектора SPD предусматривает три модуля: две торцевые крышки (end-caps) и центральную часть (barell). Каждая секция имеет свою индивидуальную магнитную систему:

end-caps - соленоидальные катушки,

barell - тороидальную магнитную систему.

В основные системы детектирования входят:

- мюонный детектор (RS)
- электромагнитный калориметр (ECal)
- времяпролетный детектор (TOF)
- трековый детектор (TR)
- вершинный детектор (VD)
- счетчик столкновений (BBC)
- калориметр нулевых углов (ZDC)

Общий вид детектора представлен на рис.2 Экспериментальная установка SPD проектируется как универсальный 4π -детектор с расширенными возможностями отслеживания и идентификации частиц на основе

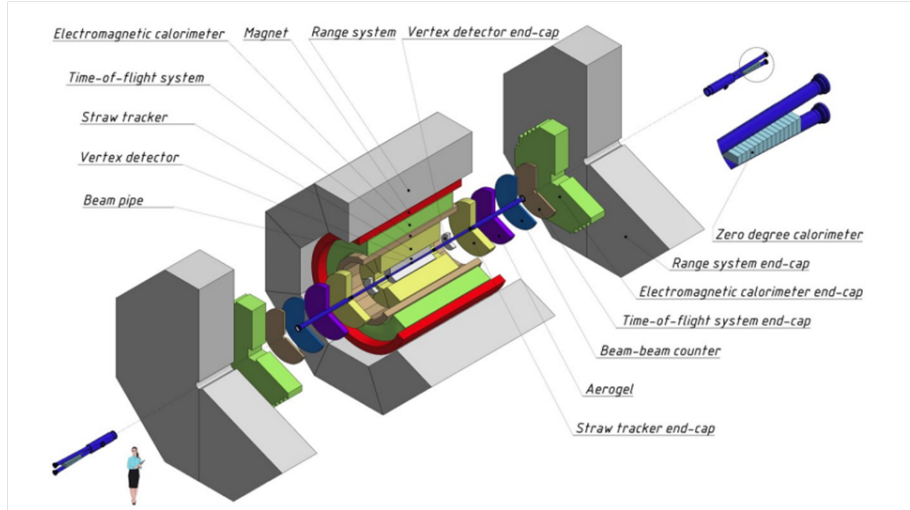


Рис. 2: Общий вид SPD

современных технологий. Кремниевый вершинный детектор (VD) обеспечит разрешение для положения вершины на уровне менее 100 мкм, необходимое для реконструкции вторичных вершин распадов D-мезонов. Straw трекинг система на основе трубок (ST), помещенная в соленоидальное магнитное поле до 1 Тл у оси детектора должна обеспечить разрешение по поперечному импульсу $\sigma p_T / p_T \approx 2\%$ для импульса частицы 1 ГэВ/с. Время-пролетная система (PID) с временным разрешением около 60 пс обеспечит π/K и K/p разделение на уровне 3σ для энергий 1.2 ГэВ/с и 2.2 ГэВ/с, соответственно. Возможное использование аэрогелевого Черенковского детектора может расширить этот диапазон. Обнаружение фотонов будет обеспечиваться электромагнитным калориметром (ECal) с энергетическим разрешением $\sim 5\%/\sqrt{E}$ (рис. 1.2). Для минимизации многократного рассеяния и конверсии фотонов, мате-

риал детектора будет сведен к минимуму во всей внутренней части детектора. Для идентификации мюонов планируется использовать мюонную систему (RS). Пара счетчиков пучков (Beam-Beam Counter, BBC) и калориметры нулевого угла будут отвечать за локальную поляриметрию и контроль светимости. Для минимизации возможных систематических эффектов, SPD будет оснащен безтриггерной системой DAQ. Высокая частота столкновений (до 4 МГц) и несколько сотен тысяч каналов детекторов представляют собой серьезную проблему для системы DAQ, онлайн мониторинга, автономной вычислительной системы и программного обеспечения для обработки данных.

4 Обзор BBC

Два счетчика пучков (BBC) планируется разместить перед время-пролетной системой PID в торцевых камерах установки SPD. Детектор должен состоять из двух частей: внутренней и внешней.

Внутренняя часть BBC будет использовать быстрые сегментированные детекторы Micro Channel Plate (MCP) и должна работать внутри пучковой трубы, а внешняя часть будет изготовлена из быстрых пластиковых сцинтилляторных плиток. Внутренняя часть охватывает прием $30 \div 60$ мрад и должна быть разделена на 4 слоя, состоящих из 32 азимутальных секторов.

Внешняя часть, охватывающая полярные углы между 60 и 500 мрад, будет разделена на 5 или 6 концентрических слоев с 16 азимутальными секторами в каждом

из них. Окончательная гранулярность является вопросом дальнейшей оптимизации для всего энергетического диапазона столкновений на SPD. Концепт BBC показан на рис. 3. Пурпурная часть представляет MCP детектор, а внутренний слой внешней части показан красным цветом.

Основными целями счетчика пучков являются:

- Локальная поляриметрия в SPD на основе измерений азимутальных асимметрий в инклюзивном производстве заряженных частиц в столкновениях поперечно поляризованных пучков протонов
- Мониторинг столкновений пучков
- Участие в точном определении времени столкновения t_0 для событий, в которых другие детекторы не могут быть использованы

Также при использовании данного детектора, обеспечив высокую степень гранулярности, становится возможным ввод ионной программы физических измерений на SPD. Сцинтилляционная часть BBC будет состоять из тайлов, сигнал с которых будет поступать на SiPM. Измерение амплитуды сигнала необходимо для улучшения временного разрешения. С одноканальным прототипом детектора можно измерить амплитуду с помощью разработанного FEE, основанного на технике Time-over9 Threshold (ToT). Эта техника является хорошо известным методом, который позволяет измерить энергию, потерянную в тайле, путем реконструкции заданного свойства выходного импульса тока - общий собранный заряд, амплитуда импульса и т.д. Метод ToT преобразует высоту импульса сигнала в цифровое зна-

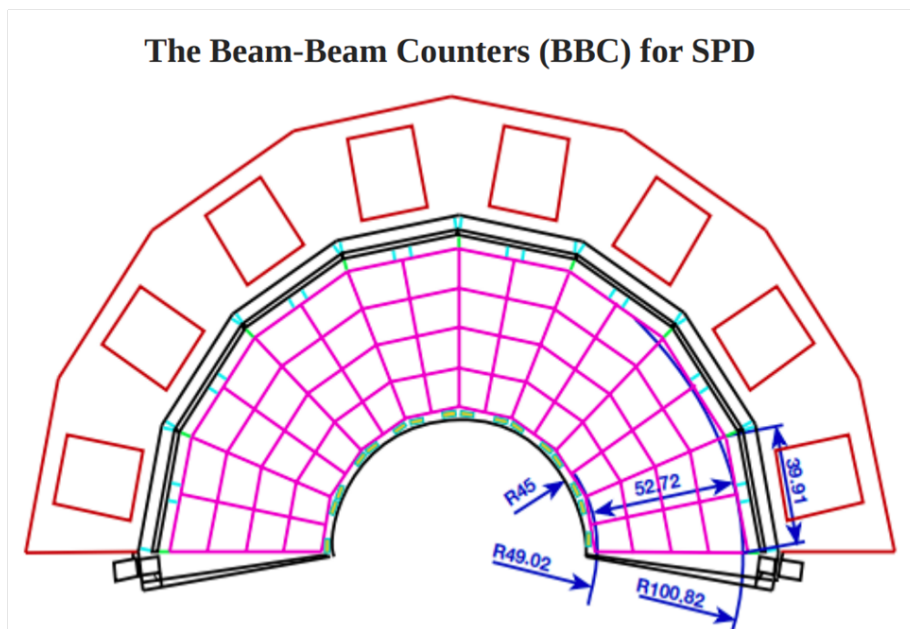


Рис. 3: BBC вид в разрезе

чение на ранней стадии, что значительно упрощает систему по сравнению с аналоговыми детекторами с последовательным считыванием через АЦП.

5 STAR EPD

Детектор плоскости событий (EPD) - это модернизированный детектор для эксперимента STAR в RHIC, предназначенный для измерения картины пролетающих вперед заряженных частиц, испускаемых при высокоэнергетических столкновениях между тяжелыми ядрами. Он состоит из двух высокосегментированных дисков сцинтиллятора толщиной 1,2 см, встроенных в оптоволокно со сдвигом длины волны, соединенных с крем-

ниевыми фотоумножителями и заказной электроникой. Мы описываем общий дизайн прибора, его конструкцию и работу на стенде и в эксперименте.

Столкновения между тяжелыми ядрами при высоких энергиях приводят к образованию кварк-глюонной плазмы (КГП) - нового состояния материи, состоящего из деконфинированных кварков и глюонов, которое в последний раз наблюдалось лишь через микросекунды после Большого взрыва. Определение начальной геометрии каждого столкновения является важнейшим шагом в расшифровке сложной физики этой новой системы. Экспериментально эта геометрия оценивается в терминах "плоскостей событий" (ПС), и существуют хорошо разработанные методы для извлечения этих плоскостей из паттернов в тысячах частиц, испускаемых при каждом событии.

Эксперимент STAR в Брукхейвенской национальной лаборатории на релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC) измеряет эти столкновения с помощью согласованного набора систем слежения, калориметрических, времяпролетных и других детекторов. Эти компоненты практически герметично охватывают столкновение, возникающее при столкновении двух противоположных пучков ядер в центре эксперимента. Детектор плоскости событий предназначен для наблюдения заряженных частиц, испущенных в прямом и обратном направлениях под углами $0,7^\circ < \theta < 13,5^\circ$ относительно начальных направлений пучков.

Система EPD состоит из двух колес, одно из которых схематично показано на рис. 4. Каждое колесо состоит из 12 "суперсекторов" с азимутальным углом 30 граду-

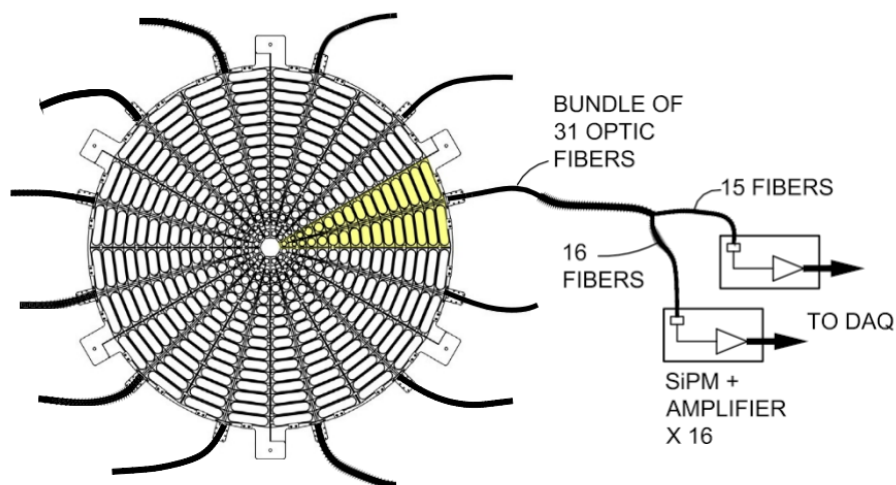


Рис. 4: Эскиз системы EPD. Показано одно из двух колес EPD. 31 плитка из каждого из 12 суперсекторов соединена пучками оптического волокна с кремниевыми фотоумножителями и усиливающей электроникой. Подробности см. в тексте.

сов, которые разделены на 31 плитку. Каждый суперсектор соединен с пучком из 31 оптического волокна, по которому свет от каждой плитки передается на кремниевый фотоумножитель (SiPM). Сигналы с SiPM усиливаются и поступают в систему оцифровки и сбора данных STAR.

5.1 Отличие BBC от EPD

Итак, выше было рассказано о счетчике BBC с эксперимента SPD. Далее была приведена общая информация о принципе работы EPD с эксперимента STAR, чтобы наглядно можно было наглядно сравнить их. Beam beam counter и event-plane detector - два различных типа детекторов, используемых в физике высоких энергий для изучения столкновений частиц.

Beam beam counter (счетчик пучков) служит для измерения интенсивности пучков частиц, которые сталкиваются в эксперименте. Он обычно представляет собой устройство, состоящее из двух или нескольких субдетекторов, размещенных вдоль пучков, которые регистрируют прохождение частиц. Beam beam counter помогает определить количество частиц в пучках и их энергию.

Event-plane detector (детектор плоскости события) используется для измерения ориентации и формы плоскости события, определяющей пространственную анизотропию в столкновениях частиц. Он часто применяется для изучения коллективных эффектов, таких как потоки частиц, в столкновениях ядерных частиц.

Таким образом, основное отличие между Beam beam counter и event-plane detector заключается в их функциях и целях. Beam beam counter измеряет интенсивность пучков частиц, в то время как event-plane detector изучает пространственную анизотропию в столкновениях и коллективные эффекты.

6 Заключение

В данной работе был проведен литературный обзор на эксперимент SPD. Была подробно изучена информация о составе эксперимента и о конкретной подсистеме BBC. Так же был рассмотрен детектор STAR EPD, и было проведено сравнение двух основных подсистем BBC и EPD.

7 Список источников

- The STAR event plane detector / J. Adams [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Т. 968. — С. 163970.
- Conceptual design of the Spin Physics Detector / V. M. Abazov [и др.]. — 2021.
- Light yield and radiation hardness studies of scintillator strips with a filler / A. Artikov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Т. 930. — С. 87—94.
- Optimization of light yield by injecting an optical filler into the co-extruded hole of the plastic scintillation bar / A. Artikov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2016. — Т. 11, № 05. — T05003—T05003.