

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РЕКОНСТРУКЦИИ И ИМПУЛЬСНОГО
РАЗРЕШЕНИЯ STRAW TRACKER
ЭКСПЕРИМЕНТА SPD В УСЛОВИЯХ
ИОН-ИОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Научный руководитель
к.ф.-м. н.

_____ Е. Ю. Солдатов

Студент

_____ А. В. Лазарева

Москва 2026

Содержание

1	Геометрия и устройство Straw Tracker	4
2	Описание алгоритма реконструкции треков в Straw Tracker	6
3	Результаты работы в среде SPDROOT	7
3.1	Описание проведённого анализа	7
3.2	Цветовые карты Straw Tracker	8
3.3	Эффективность реконструкции	9
3.4	Импульсное разрешение	10
3.5	Сравнение результатов реконструкции для протон-протонных и кислород-кислородных столкновений	11
4	Заключение	12
	Список использованных источников	13

Введение

Эксперимент Spin Physics Detector[1] (SPD) будет установлен во второй точке взаимодействия коллайдера NICA[2], сверхпроводящего коллайдера протонов и тяжёлых ионов, строящегося с 2013 года на базе Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) в городе Дубна Московской области. SPD предназначен для изучения спиновой структуры протона и дейтрона и других явлений, связанных со спином, с помощью поляризованных пучков протонов и дейтронов при энергии столкновения до 27 ГэВ и светимостью до $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Экспериментальная установка SPD будет спроектирована как 4π -детектор с возможностью восстановления траекторий заряженных и идентификации частиц, основанными на современных технологиях, которые будут установлены в экспериментальном зале SPD коллайдера NICA.

Straw Tracker (TS) является одной из основных систем детектирования и в значительной степени определяет разрешение эксперимента SPD. TS - трековая система на основе большого числа straw tubes, заполненных газом и имеющих анодную проволоку внутри. Каждая straw реагирует на пролет заряженной частицы через газ - возникают электроны ионизации, которые достигая анодной проволоки формируют электрический сигнал (отклик TS).

В рамках эксперимента SPD предполагается изучать протон-протонные и дейтрон-дейтронные столкновения для достижения основной цели эксперимента. Однако, коллайдер NICA также ориентирован на столкновения тяжёлых ионов, что дает возможность попробовать исследовать ионную физику. Возникает вопрос: а сможет ли TS переварить высокую множественность частиц в ионных столкновениях? Проблемы могут возникнуть как с точки зрения электроники, так и с точки зрения алгоритмов реконструкции треков заряженных частиц: возрастает число близко расположенных и пересекающихся треков, хиты разных частиц смешиваются, и становится значительно труднее правильно сопоставить измеренные точки отдельным траекториям и устойчиво восстановить сами треки. В данной работе делался упор именно на загрузочные возможности TS по восстановлению треков заряженных частиц для разных ионных систем.

Таким образом, целью данной работы является исследование эффективности реконструкции и загрузок Straw Tracker эксперимента SPD в условиях ион-ионных столкновений.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Ознакомление с новой 6-модульной геометрией модели Straw Tracker в среде SPDR00T;
- Моделирование ион-ионных столкновений в среде SPDR00T;
- Оценка загрузок детектора и эффективности реконструкции треков заряженных частиц в условиях ион-ионных столкновений, смоделированных в среде SPDR00T;
- Оценка разрешения по поперечному импульсу реконструированных частиц;
- Анализ полученных результатов.

1 Геометрия и устройство Straw Tracker

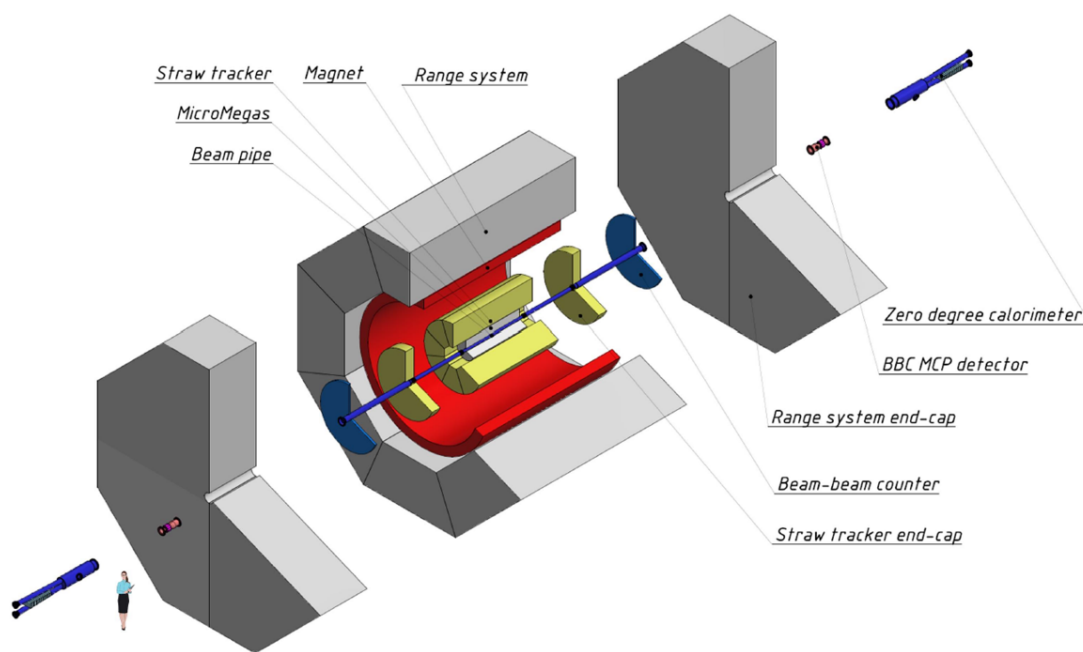


Рисунок 1 — Схема Straw Tracker первой фазы SPD

Назначение Straw Tracker - эффективное восстановление треков первичных и вторичных частиц, измерение их импульсов по кривизне траектории

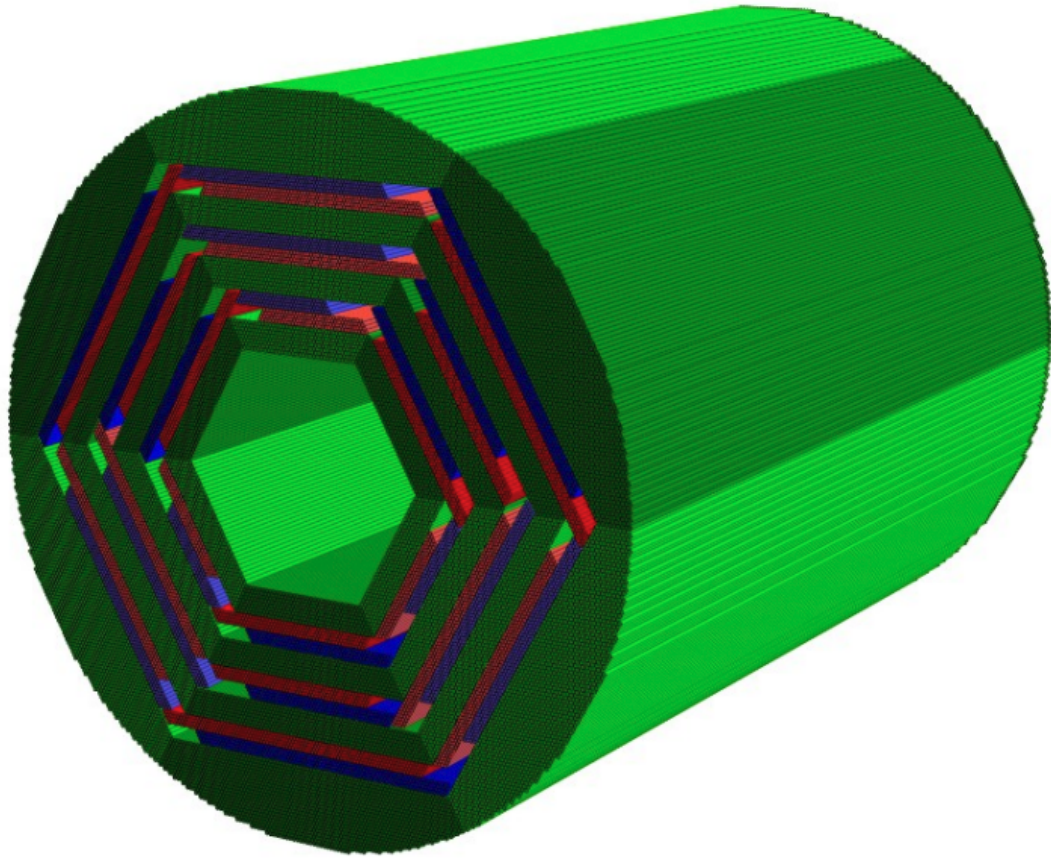


Рисунок 2 — Схема барреля Straw Tracker

в магнитном поле с высокой точностью, а также участие в идентификации частиц с помощью измерения энерговыделения (dE/dx). Трекер будет состоять из barrel-части и двух end-caps. Barrel-часть в основном предназначена для трекинга, а end-caps для идентификации частиц. Barrel-часть состоит из 6 модулей. Каждый модуль содержит слои трубочек. Части end-caps имеют форму диска с тонкими слоями, их количество должно быть достаточным для идентификации частиц с помощью измерений dE/dx . Всего в одном end-cap предполагается использовать 8 координатных плоскостей. Каждая координатная плоскость состоит из двух половинок диска с некоторым интервалом. Стоит отметить, что используются разные трубочки, отличающиеся длиной и ориентацией.

Трубочки представляют собой цилиндрический корпус из легкого металла, вдоль оси цилиндра проведена анодная проволока, сама трубочка заполнена газом (аргоном). Заряженная частица, пролетая сквозь трубку ионизирует газ, таким образом, образуется дорожка из ионизированных

атомов и свободных электронов[3]. Эти электроны начинают дрейфовать к аноду под воздействием электрического поля. В магнитном поле на электроны действует сила Лоренца, которая заставляет их двигаться по спиралевидным траекториям. Это приводит к тому, что электроны движутся не строго по прямой к аноду, а закручиваются вокруг силовых линий магнитного поля. Однако размеры трубочки невелики, поэтому можно пренебречь искривлением траектории под действием магнитного поля. Когда электроны достигают анода, происходит лавинообразное усиление сигнала (газовое усиление), и на аноде регистрируется электрический импульс. Время поступления сигнала и его форма используются для определения положения точки ионизации.

2 Описание алгоритма реконструкции треков в Straw Tracker

Процедура реконструкции включает два ключевых шага: поиск треков и последующий фит траекторий, выполняемый калмановским фильтром. На этапе поиска задача сводится к разбиению совокупности измерений в трековых детекторах на подмножества, каждое из которых интерпретируется как набор хитов, принадлежащих одной заряженной частице; далее по этим подмножествам проводится трек-фит.

Алгоритм реконструкции начинает работу с поиска треков в плоскости XY. Сначала используются только осевые straws: берутся координаты проволок тех трубок, которые сработали. Слои, в которых оси straws параллельны оси пучка, называются осевыми, а слои с наклонёнными straws — стерео-слоями.

К набору точек от осевых straws последовательно применяют конформное преобразование и преобразование Хафа, после чего в образовавшейся двумерной гистограмме ищут пики, соответствующие возможным трекам. Для каждого такого пика строят окружность, аппроксимируя ей точки, и таким образом получают двумерных кандидатов треков.

Затем к этим кандидатам подбирают хиты из стерео-straws, что позволяет восстановить трёхмерную форму траектории и оценить начальное положение и импульс частицы в первой точке измерения. На заключительном шаге по всем найденным хитам выполняют глобальный трёхмерный калмановский фит, который даёт окончательные параметры трека.

3 Результаты работы в среде SPDRROOT

3.1 Описание проведённого анализа

Реконструкция событий выполняется по результатам моделирования ион-ионных столкновений с заданной энергией в присутствии магнитного поля. Для исследования Straw Tracker рассматривались протон-протонные столкновения с энергией $\sqrt{s} = 10$ ГэВ, а также кислород-кислородные столкновения при той же энергии. Величина магнитного поля в обоих случаях - 1 Тл.

Симуляции для протон-протонных столкновений были сделаны с помощью генератора Pythia8[4], а для кислород-кислородных столкновений с помощью генератора UrQMD 4.0[5].

В рамках работы в среде SPDRROOT были построены гистограммы, характеризующие качество реконструкции треков в Straw Tracker. Эти распределения формируют статистическую основу анализа и позволяют оценить, насколько качественно алгоритм реконструирует треки заряженных частиц.

В дальнейшем под МС-треком понимается истинный трек, полученный в моделировании и фитированный по заданным откликам Straw Tracker, возникших на этапе реконструкции событий. Реконструированный трек (гесо-трек) - восстановленный трек частицы в детекторе с помощью специального алгоритма реконструкции. Каждый трек, будь то реконструированный или МС-трек, имеет набор уникальных для данного события откликов Straw Tracker (hit id).

Исследование реконструкции треков основано на сопоставлении МС- и гесо-треков по доле общих хитов в гесо-треке. МС-трек считается восстановленным, если отношение числа общих хитов к числу хитов в сопоставленном ему гесо-треке превышает 51%. При выполнении этого условия реконструированный трек помечается как «правильно найденный»; треки, для которых соответствующий МС-трек не найден, рассматриваются как ложные (фейковые).

Физические ограничения: вводится отбор по псевдобыстроте $|\eta| < 2$, который позволяет ограничиться треками, проходящими через центральную часть установки. При анализе разрешения по импульсу дополнительно накладываается отбор по поперечному импульсу p_T , чтобы убрать область треков, где реконструкция заведомо нестабильна.

3.2 Цветовые карты Straw Tracker

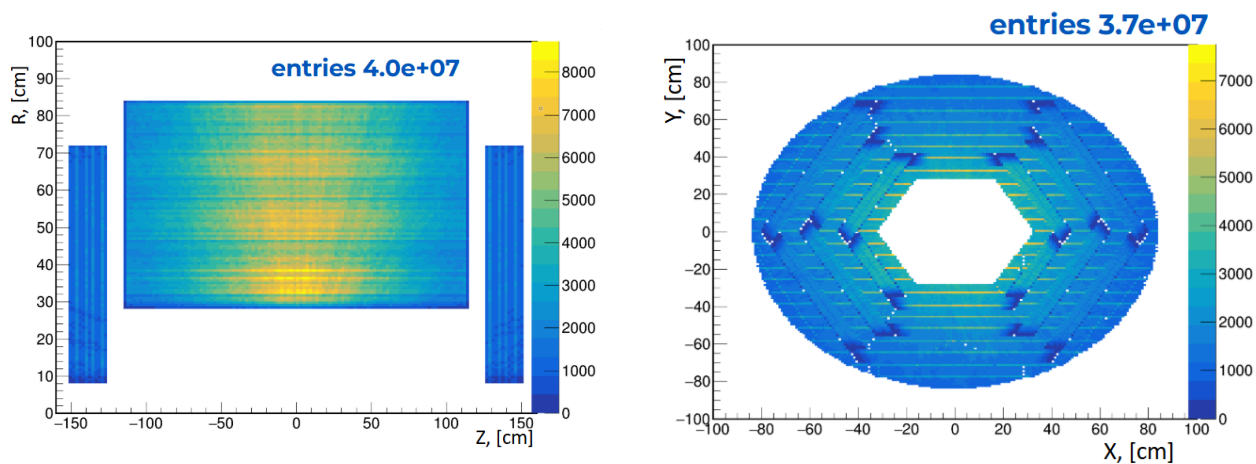


Рисунок 3 — Цветовые карты Straw Tracker для p-p столкновений

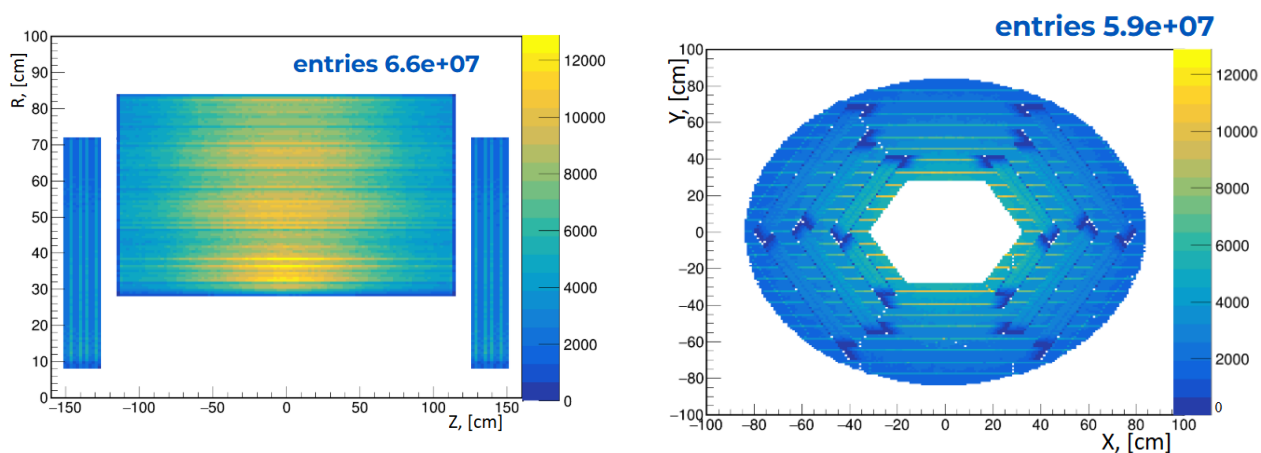


Рисунок 4 — Цветовые карты Straw Tracker для O-O столкновений

Цветовые карты наглядно показывают геометрию трекового детектора, а так же показывают загруженности детектора в разных проекциях и для разных систем столкновений. Использовалось моделирование 50 тысяч столкновений пучков протонов при энергии 10 ГэВ, 24 тысячи столкновений пучков ионов кислорода при энергии 10 ГэВ.

3.3 Эффективность реконструкции

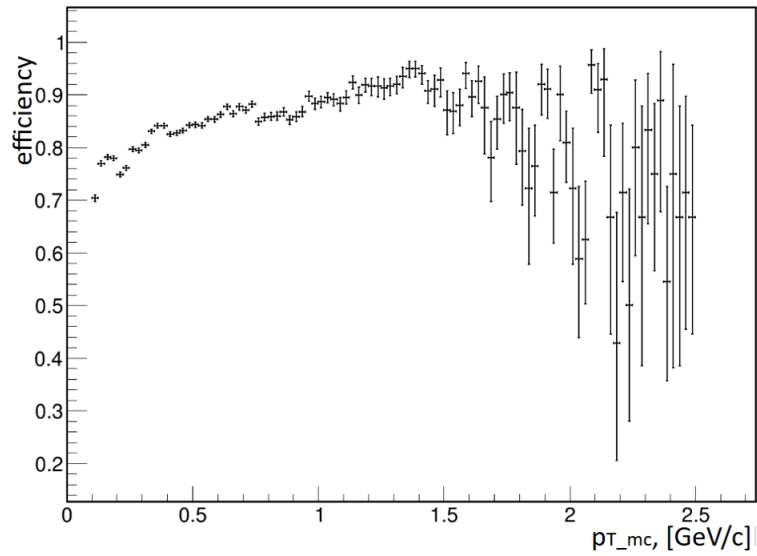


Рисунок 5 — Эффективность реконструкции треков в р-р столкновениях

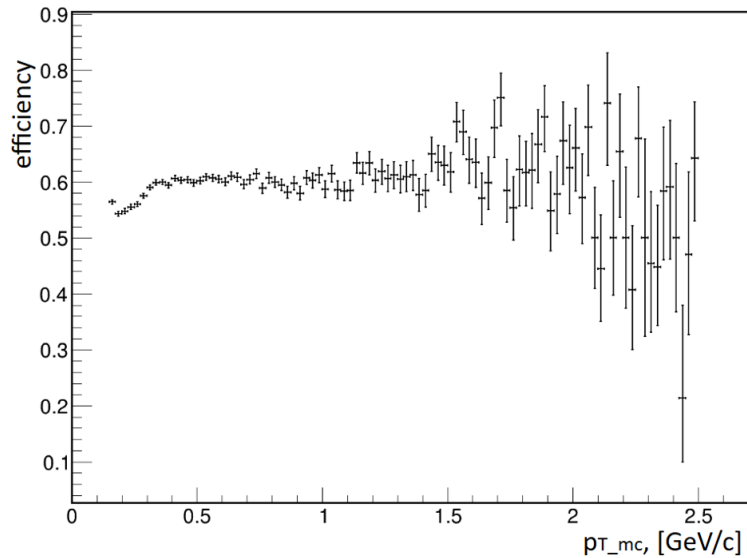


Рисунок 6 — Эффективность реконструкции треков в О-О столкновениях

Интегральная эффективность для протонов составляет 83%, для кислорода - 59%. Снижение эффективности уже может говорить об ограничениях, накладываемых алгоритмом реконструкции.

3.4 Импульсное разрешение

Для того, чтобы узнать импульсное разрешение детектора Straw Tracker, то есть насколько точно определяется, допустим, поперечный импульс p_T заряженных частиц с помощью имеющегося алгоритма реконструкции, была рассмотрена связь между импульсом гесо-трека и импульса соответствующего ему МС-трека.

Для этого интервал возможных значений поперечного импульса МС-треков был разбит на интервалы, для каждого интервала строилось распределение $\frac{(p_{T \text{ reco}} - p_{T \text{ truth}})}{p_{T \text{ truth}}}$, где $p_{T \text{ truth}}$ - значение поперечного импульса МС-трека сопоставленного гесо-треку.

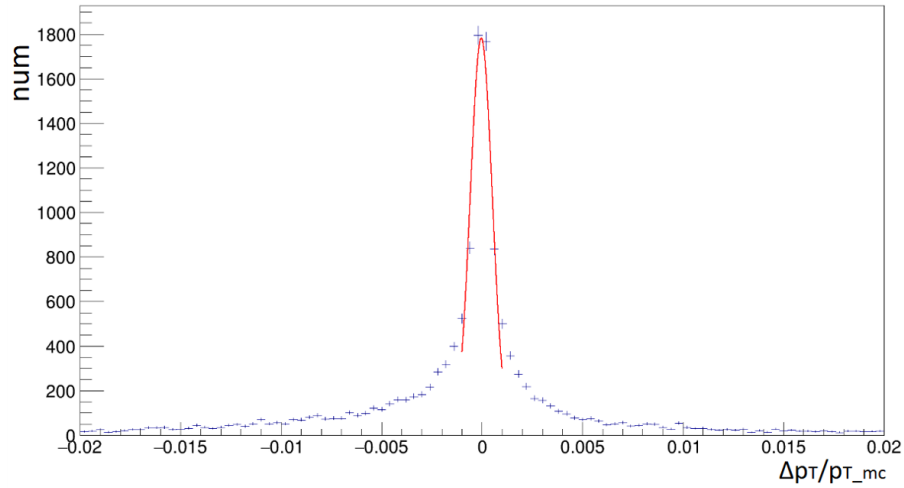


Рисунок 7 — Пример зависимости $\frac{(p_{T \text{ reco}} - p_{T \text{ truth}})}{p_{T \text{ truth}}}$ от $p_{T \text{ truth}}$

Такое распределение фитировалось Гауссом[6] и получалось некоторое значение σ для каждого интервала по поперечному импульсу. В результате построены зависимости σ от $p_{T \text{ truth}}$, которые показывают насколько точно определяется импульс для данного интервала значений поперечного импульса. Пример построенного распределения приведен на рис. 7.

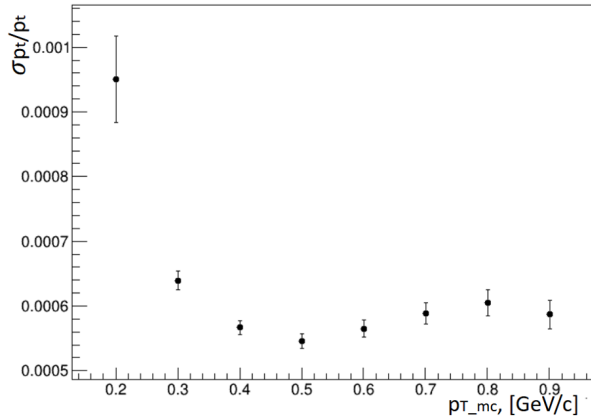


Рисунок 8 — протон-протонные столкновения

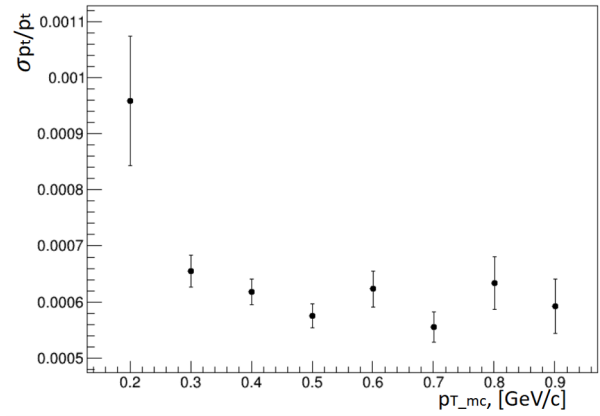


Рисунок 9 — кислород-кислородные столкновения

Рисунок 10 — Разрешения по поперечному импульсу

3.5 Сравнение результатов реконструкции для протон-протонных и кислород-кислородных столкновений

При сравнении результатов реконструкции треков в протон-протонных (p-p) и кислород-кислородных (O-O) столкновениях с энергией $\sqrt{s} = 10$ ГэВ наблюдаются существенные различия, обусловленные физикой взаимодействия и условиями работы детектора.

В p-p столкновениях эффективность реконструкции достигает 83%, а разрешение по поперечному импульсу составляет 0,06%. В O-O столкновениях эти характеристики ухудшаются: эффективность снижается до 59%, а разрешение составляет 0,07%.

Основные причины различий:

- Повышенная мультипликативность: в O-O столкновениях число рождающихся частиц в разы больше числа рождающихся частиц при протон-протонных столкновениях.
- Занятость детектора: occupancy straw-слоёв возрастает с 1-2% до 6-8%, увеличивая вероятность перекрытий хитов и появления фейковых треков в алгоритме реконструкции.

4 Заключение

В рамках научно-исследовательской работы была разработана и реализована в среде SPDR00T методика сопоставления реконструированных треков Straw Tracker Spin Physics Detector (SPD) с MC-информацией для оценки точности реконструкции и разрешения по поперечному импульсу p_T при протон-протонных и кислород-кислородных столкновениях с энергией $\sqrt{s} = 10$ ГэВ в присутствии магнитного поля.

Точность реконструкции в баррельной области $|\eta| < 2$ достигает 83% для р-р и 59% для О-О столкновений. Разрешение по импульсу равно $\sim 0.06\%$ в р-р режиме и 0.07% в О-О режиме в случае повышенной мультипликативности, т.е. загруженности детектора.

Сопоставление треков по доле общих хитов позволило выделить правильно найденные треки и оценить эффективность реконструкции справедливо.

Выявленные ограничения на низких p_T и при высокой загруженности указывают на перспективные направления оптимизации: улучшение алгоритма реконструкции для разделения многочастичных событий и учета появления треков с малой кривизной траектории.

Дальнейшие шаги:

- Исследование ион-ионных столкновений (Ar-Ar, Kr-Kr, Xe-Xe)
- Определение оптимальных параметров фитирования распределений по относительному разрешению p_T
- Оценка применимости трекового детектора для ион-ионных столкновений

Ожидается, что тенденция ухудшения эффективности реконструкции и разрешения по поперечному импульсу сохранится для более тяжелых ионов, однако, есть необходимость узнать предел по атомной массе сталкивающихся ионов, чтобы понимать какие частицы можно использовать для стабильной работы эксперимента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA / V. Abazov [и др.]. — 2024. — Апр. — arXiv: 2404.08317 [hep-ex].
2. Мегапроект NICA. — URL: <https://nica.jinr.ru/ru/>. — (дата обр.: 20.12.2025).
3. Francke T., Peskov V. Innovative applications and developments of micro-pattern gaseous detectors. — Hershey : Engin. Sci. Ref., 2014. — (Advances in chemical and materials engineering (ACME) book series). — ISBN 978-1-4666-6014-4, 978-1-4666-6015-1. — DOI: 10.4018/978-1-4666-6014-4.
4. An introduction to PYTHIA 8.2 / Т. Sjöstrand [и др.] // Comput. Phys. Commun. — 2015. — Т. 191. — С. 159—177. — DOI: 10.1016/j.cpc.2015.01.024. — arXiv: 1410.3012 [hep-ph].
5. Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions / S. A. Bass [и др.] // Prog. Part. Nucl. Phys. — 1998. — Т. 41. — С. 255—369. — DOI: 10.1016/S0146-6410(98)00058-1. — arXiv: nucl-th/9803035.
6. Cowan G. Statistical Data Analysis. — Oxford : Oxford University Press, 1998. — ISBN 978-0198501558.