

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 И
ЗАГРУЗОК 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

Введение	3
1 Геометрия и устройство Straw Tracker	5
2 Описание алгоритма реконструкции треков в Straw Tracker	7
3 Результаты работы в среде SPDROOT	8
3.1 Описание проведённого анализа	8
3.2 Полученные распределения	9
3.3 Сравнение результатов реконструкции для протон-протонных и кислород-кислородных столкновений	13
4 Заключение	14
Список использованных источников	15

Введение

NICA (Nuclotron based Ion Collider facility)[1] - это новый ускорительный комплекс, который был создан на базе Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств плотной барионной материи. Эксперимент Spin Physics Detector[2] (SPD) будет установлен на базе комплекса NICA. Установка SPD предназначена 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 светимость до $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Straw Tracker - это трековый газовый детектор, состоящий из большого числа тонких трубок (straws), каждая из которых работает как отдельная дрейфовая камера.

Straw Tracker является одной из основных систем детектирования и в значительной степени определяет разрешение эксперимента SPD. В рамках эксперимента SPD предполагается изучать не только протон-протонные столкновения, но и ион-ионные столкновения, в которых ожидается повышение числа рожденных частиц. При большой множественности сигналы треков начинают накладываться друг на друга, электроника не успевает их корректно разделять, и точность измерений падает. Кроме того, каждый детектор имеет конечное время отклика: пока он обрабатывает одно событие, следующее может быть зарегистрировано некорректно, что делает Straw Tracker особенно чувствительным к высоким потокам частиц. Дополнительно это усложняет работу алгоритмов реконструкции: 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.

Целью данной работы является исследование эффективности реконструкции и загрузок Straw Tracker эксперимента SPD в условиях ион-ионных столкновений.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- Ознакомление с геометрией модели Straw Tracker в среде SPDR00T и отчета о техническом проектировании SPD;
- Оценка эффективности реконструкции треков заряженных частиц в условиях ион-ионных столкновений;

- Оценка разрешения по импульсу путём сравнения распределений относительной разности $\frac{(p_{T \text{ reco}} - p_{T \text{ truth}})}{p_{T \text{ truth}}}$ для реконструированных треков с истинными импульсами, полученными в МС-генерации;
- Анализ полученных данных после симуляции ион-ионных столкновений и реконструкции событий.

1 Геометрия и устройство Straw Tracker

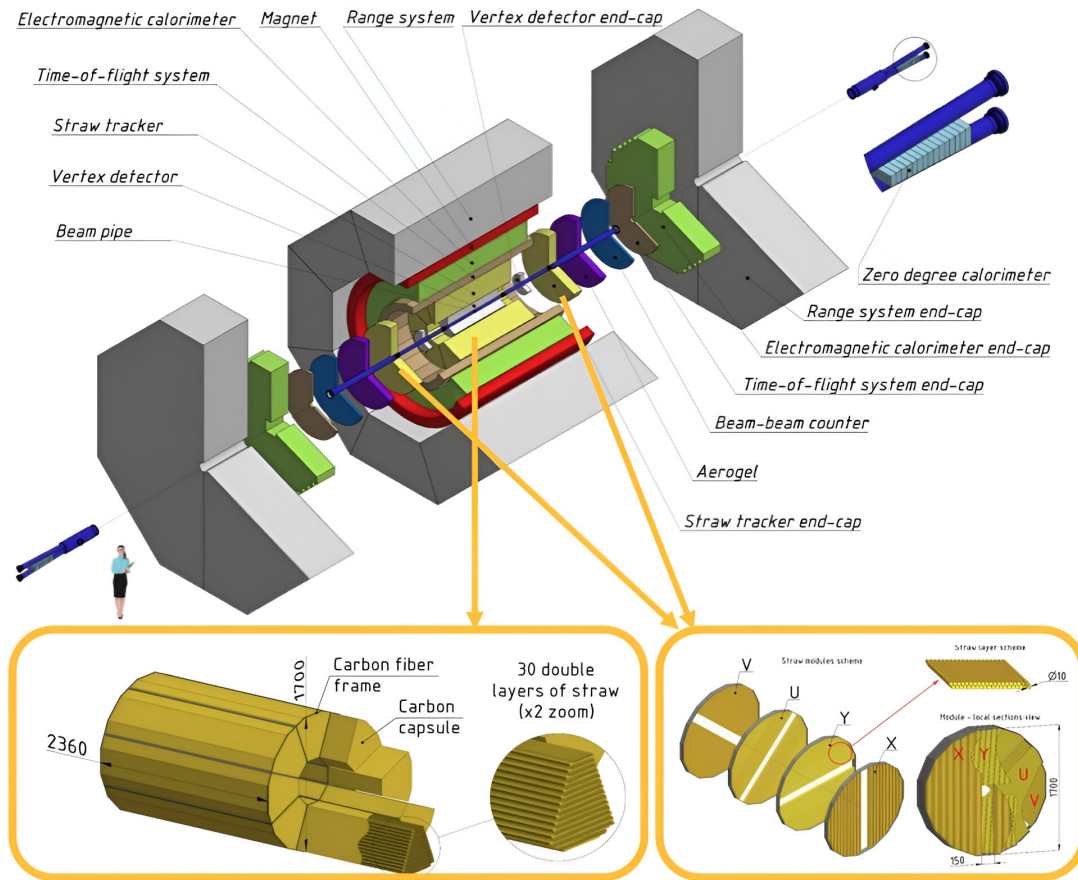


Рисунок 1 — Схема Straw Tracker в общей установке SPD

Назначение Straw Tracker - эффективное восстановление треков первичных и вторичных частиц, измерение их импульсов по кривизне траектории 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 8 модулей. Каждый модуль содержит 31 двойной слой трубочек, заключенных в капсулу из композитного полимера. Каждый модуль содержит около 1100 трубок, расположенных параллельно, и около 2200 трубок, расположенных под углом к направлению луча. Всего в barrel-части 25904 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. Всего в end-caps 4608 трубочек. Стоит отметить, что этих частей 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 ХУ. 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 3.4[5].

В рамках работы в среде SPDRROOT были построены несколько групп гистограмм, характеризующих качество реконструкции треков в Straw Tracker. Эти распределения формируют статистическую основу анализа и позволяют оценить, насколько равномерно алгоритм обрабатывает треки.

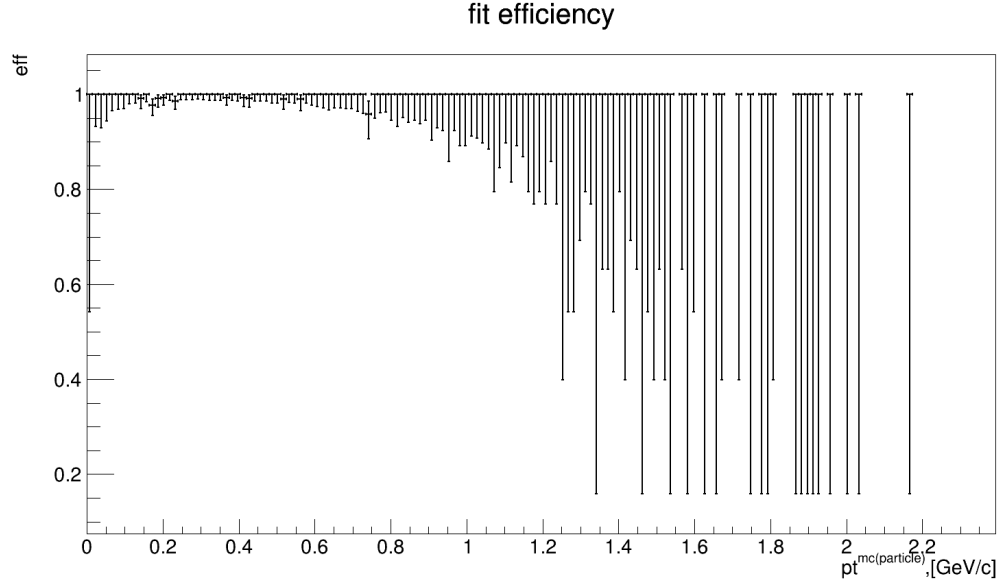
В дальнейшем под МС-треком понимается истинный трек, полученный по результатам моделирования и фитированный по заданным откликам Straw Tracker. Реконструированный трек (гесо-трек) - восстановленный трек частицы в детекторе с помощью специального алгоритма реконструкции. Каждый трек, будь то реконструированный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

В ходе анализа реализовано сопоставление реконструированных треков с МС-информацией и заполнение рабочих гистограмм. Для каждого реконструированного трека выполняется поиск соответствующего МС-трека: вычисляется число общих откликов. Трек считается корректно сопоставленным при превышении доли общих откликов заданного порога. При выполнении этого условия реконструированный трек помечается как «правильно найденный», а связанный с ним МС-трек учитывается при расчёте эффективности; треки, для которых соответствующий МС-объект не найден, рассматриваются как ложные.

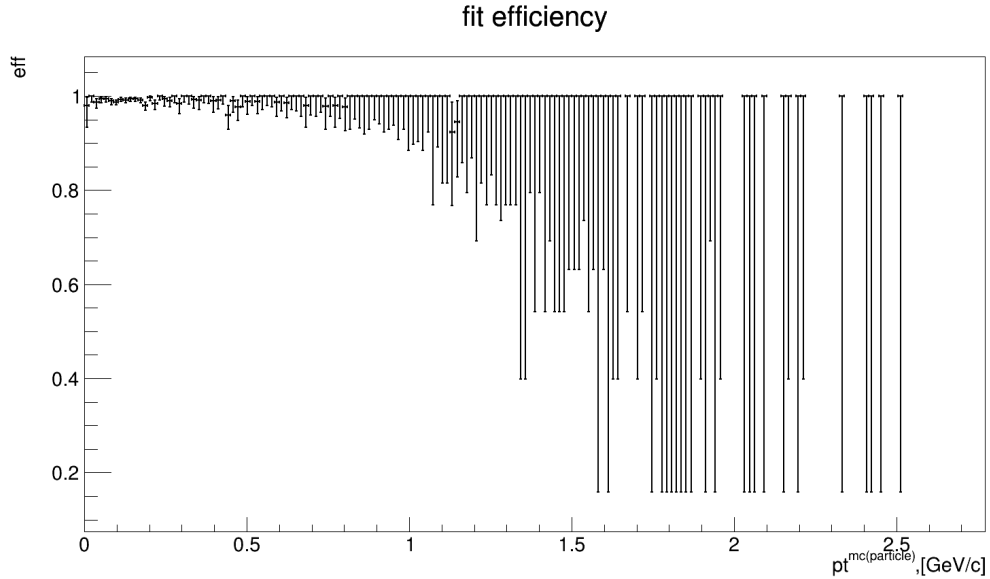
Физические ограничения: вводится отбор по псевдобыстроте $|\eta| < 2$, который позволяет ограничиться треками, проходящими через центральную часть установки. При анализе разрешения по импульсу дополнительно накладывается отбор по поперечному импульсу p_T , чтобы убрать область треков, где реконструкция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

3.2 Полученные распределения

МС-треки - доля действительных треков частиц, оставивших хиты в Straw Tracker. МС-треки частиц, имеющие малую величину поперечного импульса, иногда не фитируются. Это означает, что лишь часть МС-данных доступна для анализа. В связи с этим были построены эффективности фитирования МС-треков (рис. 2).



(a) протон-протонные столкновения ($\sim 99.8806\%$)

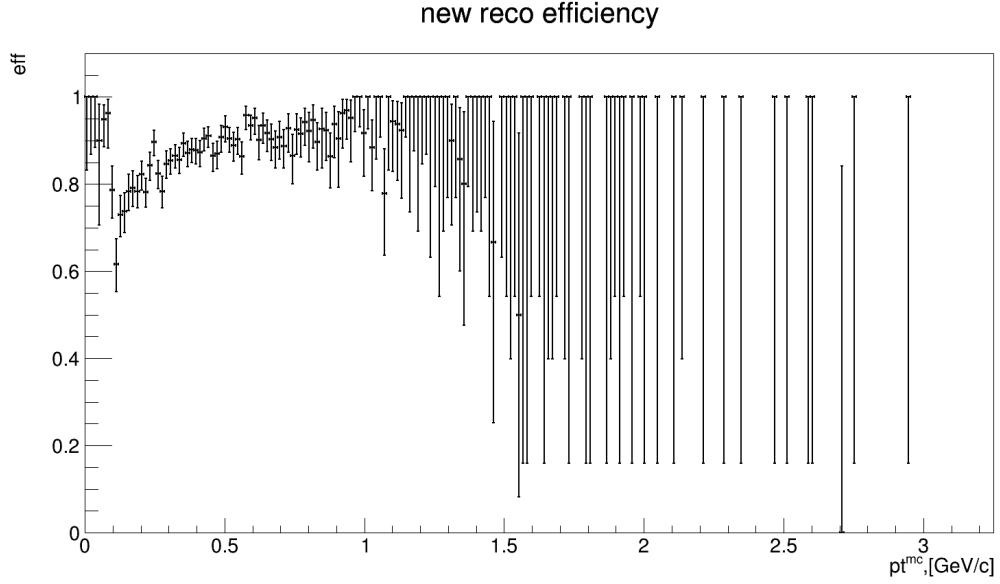


(b) кислород-кислородные столкновения ($\sim 99.6018\%$)

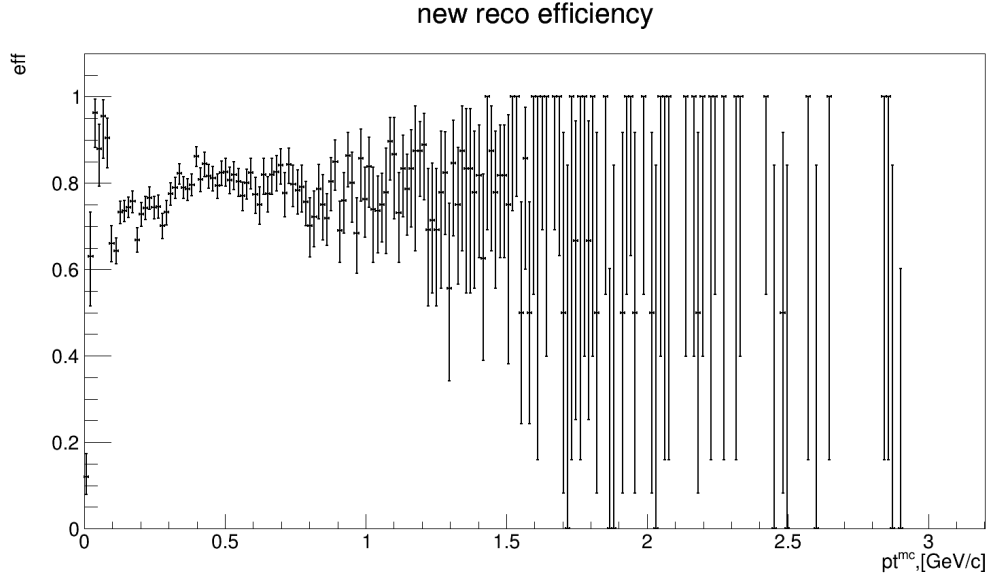
Рисунок 2 — Эффективность фитирования МС-треков ($|\eta| < 2$)

Кроме того, была построена эффективность реконструкции треков заряженных частиц.

На рис. 3 видно, что эффективность реконструкции для протон-протонных столкновений: 92%, для кислород-кислородных: 76%. Заметно, что с увеличением числа частиц в событии эффективность реконструкции значительно падает.



(a) протон-протонные столкновения ($\sim 92.5705\%$)



(b) кислород-кислородные столкновения ($\sim 76.3609\%$)

Рисунок 3 — Эффективность реконструкции ($|\eta| < 2$)

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. 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. 4.

По виду распределения разрешения на рис. 5 сразу видно, что треки с малым поперечным импульсом восстанавливаются значительно хуже. Это обусловлено большой кривизной трека при низких p_T , что приводит к неточностям в первичной реконструкции в плоскости XY.

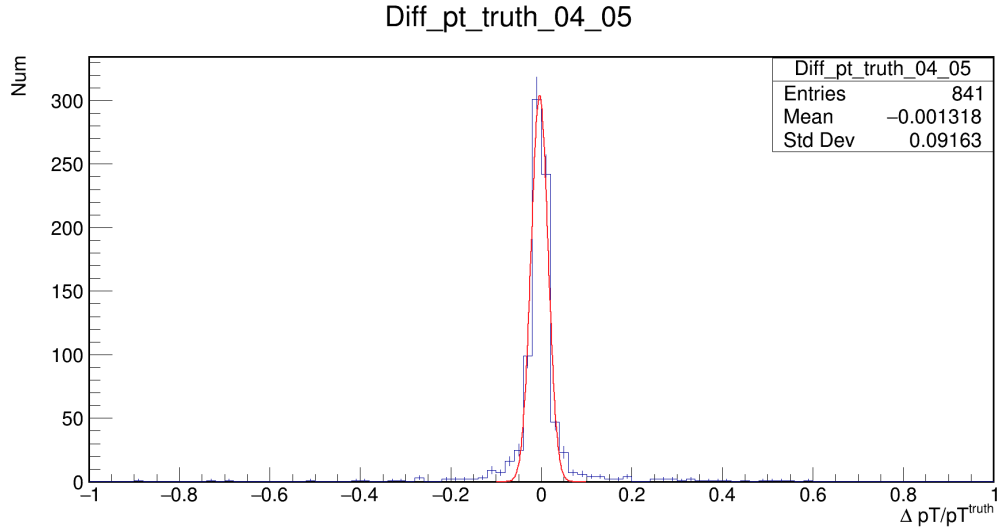
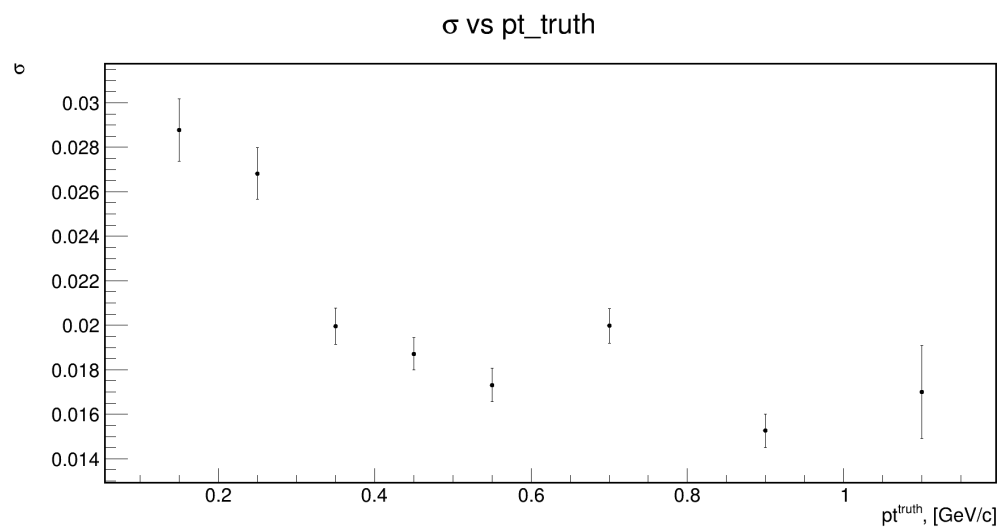
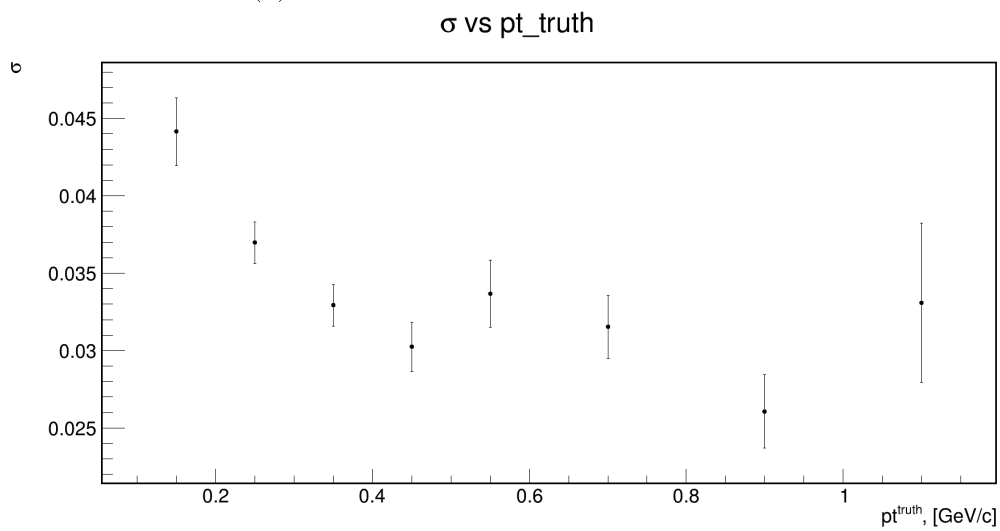


Рисунок 4 — Зависимость $\frac{(p_{T \text{ reco}} - p_{T \text{ truth}})}{p_{T \text{ truth}}}$ от $p_{T \text{ truth}}$ для протон-протонных столкновений в интервале $0.4 < p_{T \text{ truth}} < 0.5$ ГэВ/с



(a) протон-протонные столкновения



(b) кислород-кислородные столкновения

Рисунок 5 — Разрешение Straw Tracker

3.3 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 92%, а разрешение по поперечному импульсу составляет 2%. В O-O столкновениях эти характеристики ухудшаются: эффективность снижается до 76%, а разрешение изменяется до 3-4%.

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 8-10%, увеличивая вероятность перекрытий хитов и появления фейковых треков в алгоритме реконструкции.

Полученные результаты подтверждают устойчивость Straw Tracker к условиям кислород-кислородных столкновений NICA, однако указывают на необходимость оптимизации алгоритмов реконструкции для ионных режимов SPD.

4 Заключение

В рамках научно-исследовательской работы была разработана и реализована в среде SPDROOT методика сопоставления реконструированных треков Straw Tracker Spin Physics Detector (SPD) с МС-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 92% для р-р и 76% для О-О столкновений. Разрешение по импульсу равно $\sim 2\%$ в р-р режиме и ухудшается до 3% в О-О режиме в случае повышенной мультипликативности (~ 50 -80 треков против 5-10), занятости детектора (8-10%).

Сопоставление по критерию числа общих хитов в straws ($>$ заданного порога) позволило выделить правильно найденные треки и оценить вклад ложных.

Полученные результаты подтверждают достаточно высокую точность реконструкции Straw Tracker в условиях NICA и демонстрируют его устойчивость к кислород-кислородным столкновениям. 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 маленькой кривизной траектории.

Дальнейшие шаги:

- Увеличение статистики для точной оценки систематических эффектов на низких p_T .
- Расширение на другие ионные системы (Ar-Ar, Kr-Kr, Xe-Xe) для проверки универсальности алгоритмов в диапазоне от лёгких до тяжёлых ионов. Это позволит построить зависимость эффективности реконструкции и разрешения от массы ядра.

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. Мегaproект NICA. — URL: <https://nica.jinr.ru/ru/>. — (дата обр.: 20.12.2025).
2. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA / V. Abazov [и др.]. — 2024. — Апр. — arXiv: 2404.08317 [hep-ex].
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 / T. 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.