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 ПРЕДЕЛОВ ПРИМЕНИМОСТИ STRAW TRACKER ЭКСПЕРИМЕНТА SPD В ИОН-ИОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ КОЛЛАЙДЕРА NICA**

Научный руководитель
к.ф.-м. н. _____ Е. Ю. Солдатов

Студент _____ А. В. Лазарева

Москва 2025

# Содержание

**Введение** **3**

**1 Описание установки эксперимента SPD** **4**

**2 Геометрия и устройство Straw Tracker** **5**

**3 Результаты работы в среде SPDROOT** **7**

**4 Заключение** **18**

**Список использованных источников** **19**

# 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 (SPD) будет установлен во вторых точках взаимодействия ионного коллайдера 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 1032 $см^{-2}с^{-1}$.

Так как эксперимент еще не был запущен и находится в стадии разработки, основаная работа заключается в предсказании результатов эксперимента, это поможет избежать неожиданных исходов.

Straw Tracker, - одна из систем детектирования, задает основное разрешение работы эксперимента SPD. Почему это так? В эксперименте SPD предполагаются не только протон-протонные столкновения, но и ядерные столкновения, в которых ожидается повышение числа рожденных частиц. При высокой множественности частиц, рожденных в результате ион-ионных столкновений, может происходить перекрытие сигналов. Электроника не успевает разделить события, следовательно, происходит потеря точности. Кроме того, любое устройство затрачивает на измерение и регистрацию события конечное время, в течение которого оно не способно «правильно» обработать следующее событие. Поэтому Straw Detector снова уязвим перед множественностью частиц.

Целью данной работы является исследование пределов применимости Straw Tracker эксперимента в ион-ионных столкновениях коллайдера NICA.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- Ознакомление с геометрией детектора с помощью модели Straw Tracker в среде SPDROOT и отчета о техническом проектировании SPD;
- Оценка точности реконструкции импульсов и поперечных импульсов частиц в Straw Tracker;
- Представление полученных данных после симуляции протон-протонных столкновений и реконструкции событий в виде гистограмм для визуальной интерпретации результатов.

# 1 Описание установки эксперимента SPD

Экспериментальная установка SPD[2] спроектирована как универсальный $4\pi$-детектор с расширенными возможностями слежения и идентификации частиц.

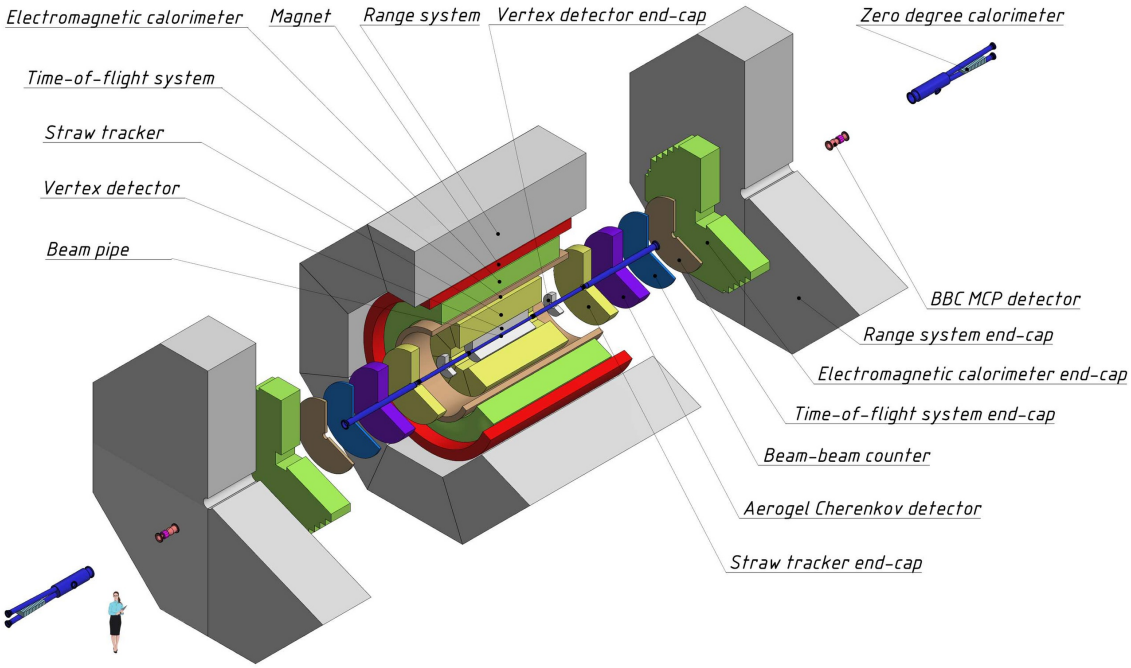


Рисунок 1 — Общая схема установки SPD

В основные системы детектрирования входят: мюонный детектор, электромагнитный калориметр, система времени пролета, трековый детектор, силиконовый вершинный детектор, счетчик столкновений, калориметр нулевых углов. Причем предполагается, что трековый детектор входит во все фазы эксперимента SPD.

# 2 Геометрия и устройство Straw Tracker

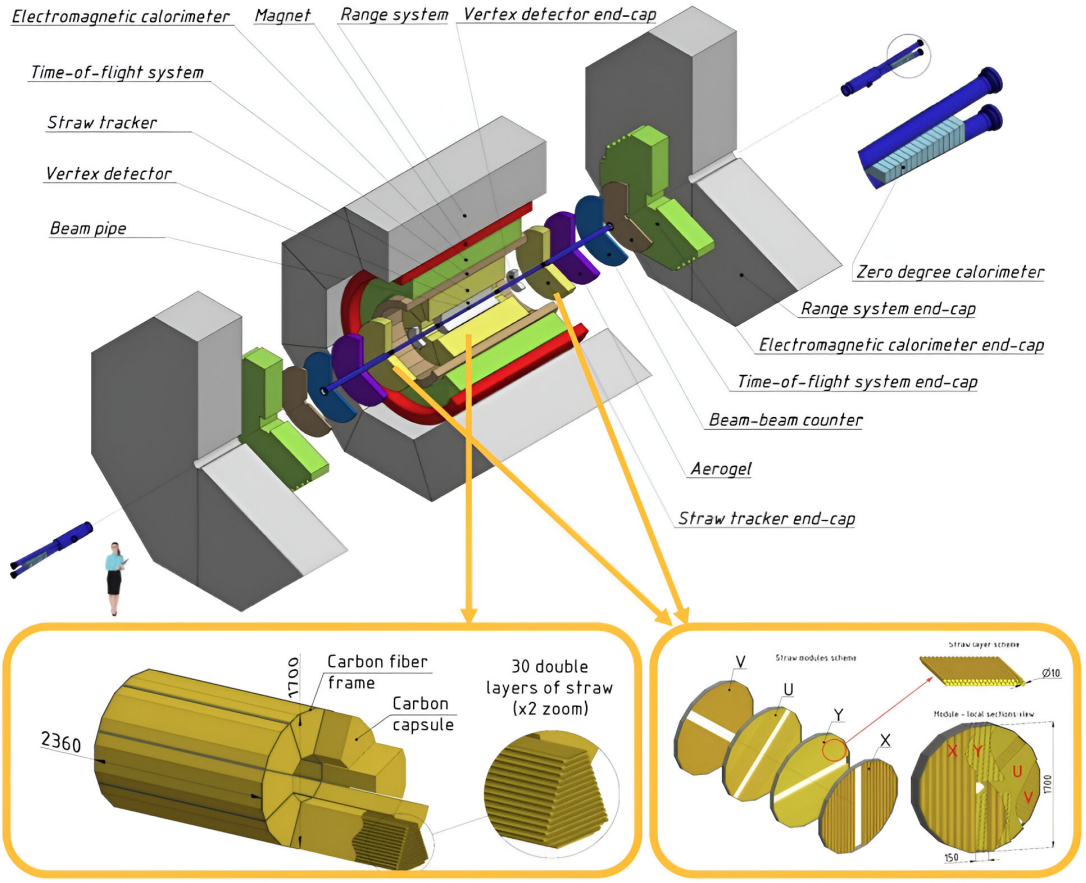


Рисунок 2 — Схема Straw Tracker в общей установке SPD

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). Планируется, что детектор будет построен из легких трубок.

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 пренебрегать 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.

Определение координат частицы происходит следующим образом:

1. Поперечные координаты (x, y): координаты частицы в плоскости, перпендикулярной направлению трубки, определяются номером трубки, в которой регистрируется сигнал.

2. Продольная координата (z): координата вдоль трубки определяется временем дрейфа электронов.

В итоге можно получить набор координат, то есть траекторию частицы. Следовательно, будет известна кривизна траектории, от которой зависит импульс (поперечный импульс). Предполагается, что вычисление импульса частиц происходит с высокой точностью.

# 3 Результаты работы в среде SPDROOT

Реконструкция событий происходит по результатам симуляции ион-ионных столкновений с заданной энергией в присутствии магнитного поля. Для исследования Straw Tracker рассматривались протон-протонные столкновения с энергией $\sqrt{s} = 10$ ГэВ. Для анализа набралась статистика в 5500 событий.

Прежде всего интересно посмотреть на двумерную гистограмму R(Z). Гистограмма заполняется откликами Straw Tracker согласно положению трубочек в пространстве. Легко видеть, на гистограмме явно очерчена геометрия детектора: barrel и end-caps части. Наиболее загруженный участок соответствует месту столкновения пучков протонов.

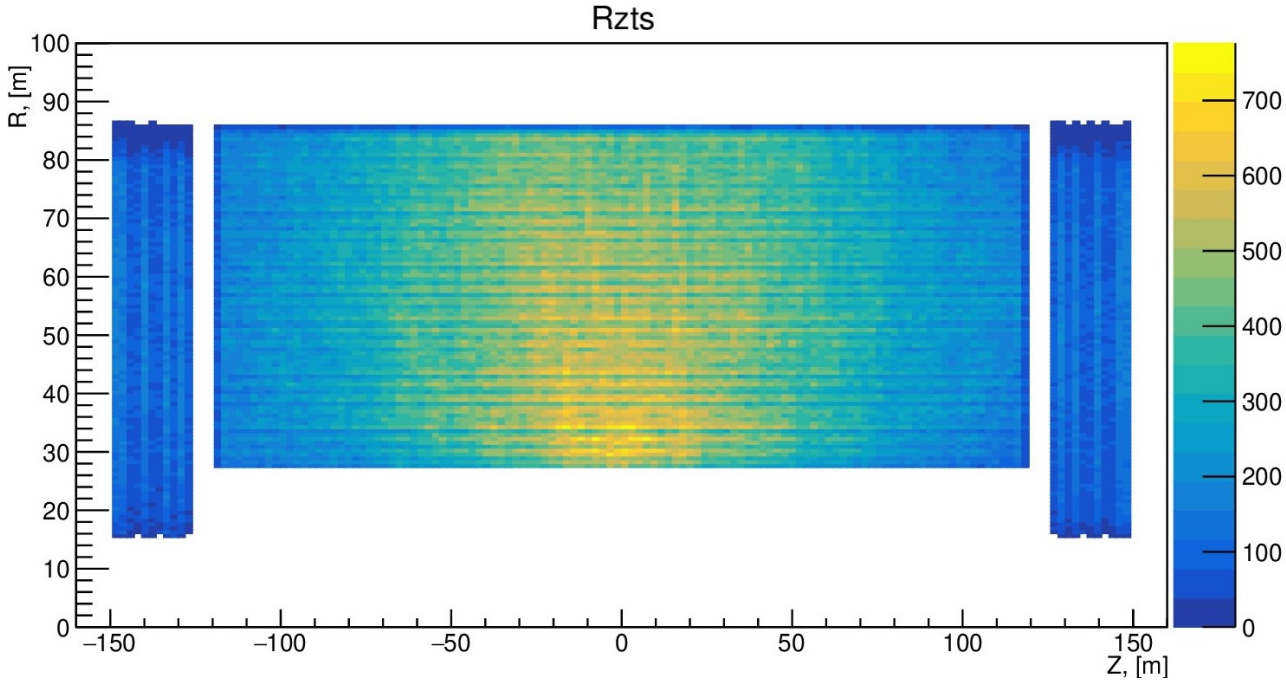


Рисунок 3 — R(Z)

Рассмотрим под какими углами располагаются трубочки в пространстве.

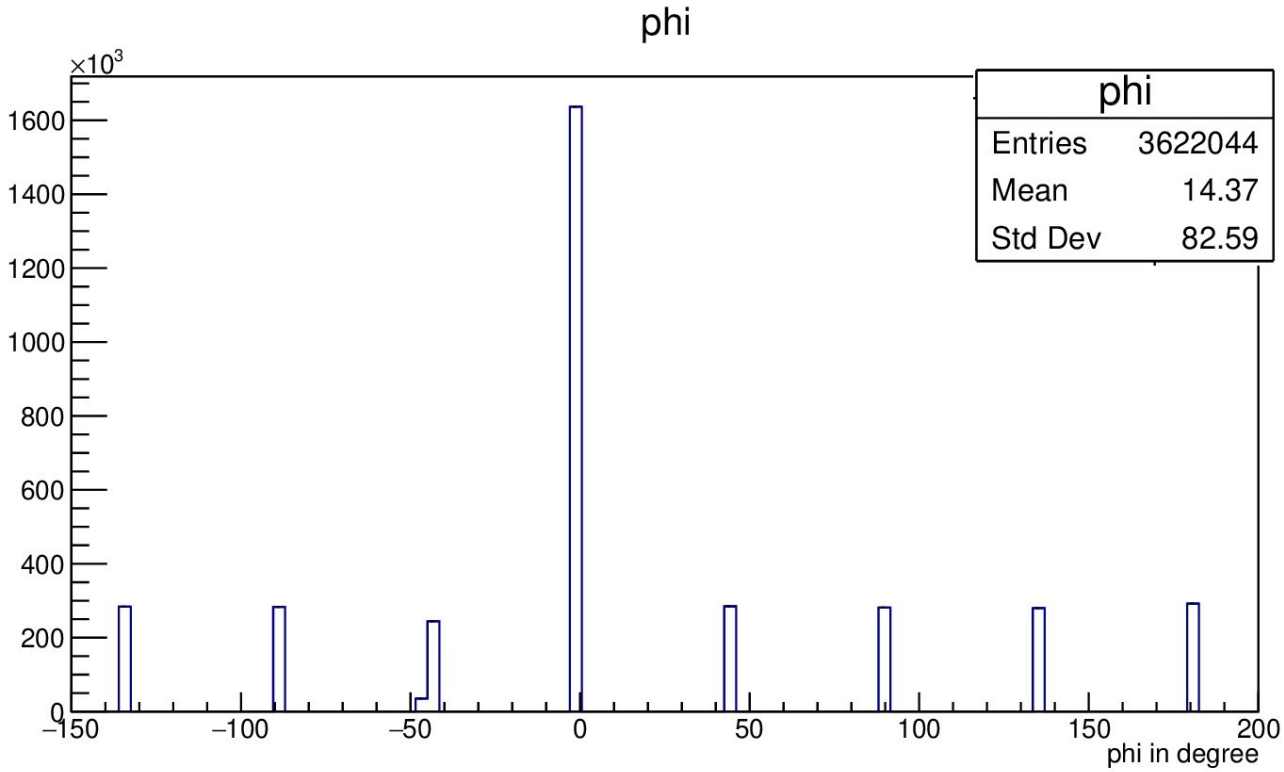


Рисунок 4 — Угол $\phi$ расположения трубки в пространстве

Заполнение уголов $\phi$ на рис.4 показывает о наличии 8 модулей в Straw Tracker.

Углы $\theta$, равные 0 и 3 градуса, соответствуют трубкам barrel части, $\theta$, равный 90 градусов, - end-caps. Так как end-caps расположены далеко от места ион-ионных столкновений, стоит ожидать, что число откликов в двух end-caps будет значительно меньше числа откликов barrel части. На рис.5 это видно явно.

Для целостности понимания геометрии Straw Tracker можно посмотреть на гистограмму R(Z) с отбором для разных $\theta$ и $\phi$.

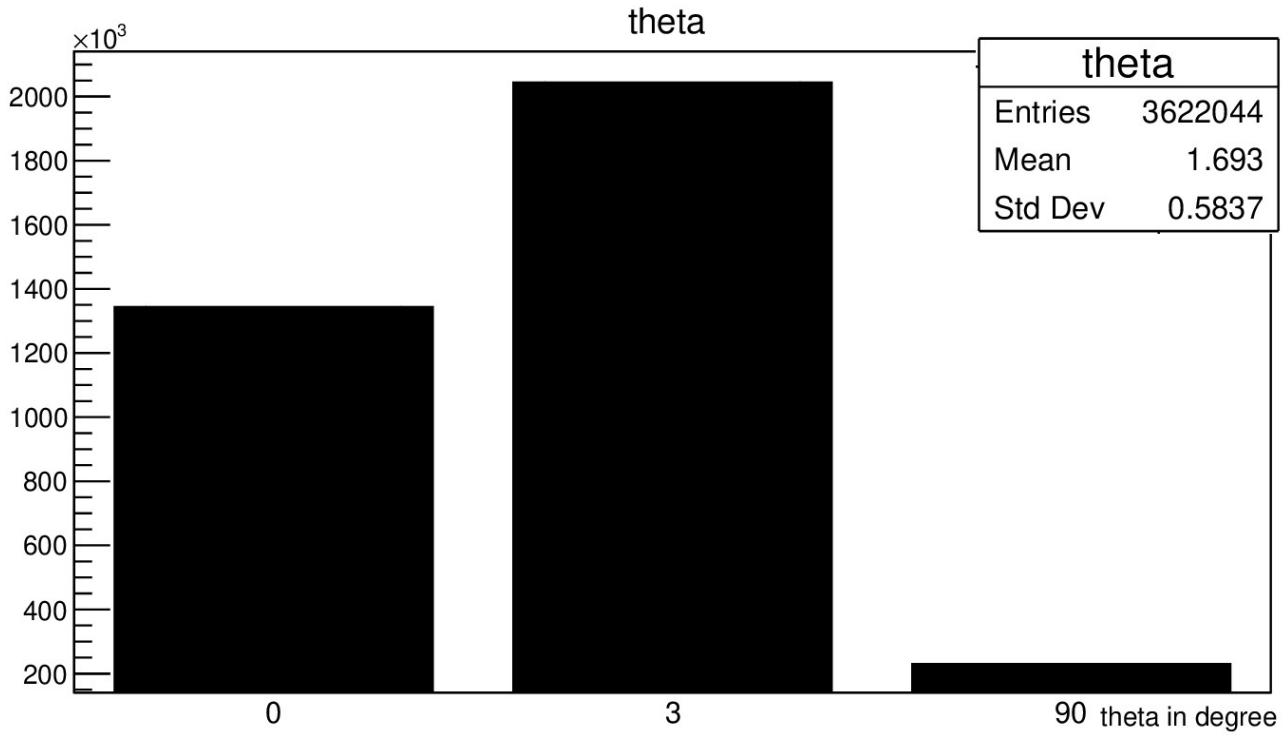


Рисунок 5 — Угол $\theta$ расположения трубки в пространстве

На рис.6-8 отбор осуществлялся по каждому из значений угла $\theta$. На рис.9,10 отбор по $\phi$, равному 0 и 45. Такие значения углов были выбраны вследствие явного отличия числа откликов для $\phi = 0^\circ$ в сравнении с остальными доступными значениями углов.

Представленные рисунки визуально описывают загруженность детектора при суммировании всех событий. Однако и для одного события, логично, стоит ожидать основную занятость в окрестности точки столкновения пучков.

Загруженность Straw Tracker в одном событии можно оценить в процентном соотношении числа занятых трубочек к их общему числу. Усреднив по всем доступным событиям получим, что в одном событии протон-протонного столкновения занято 1.7% от общего числа трубочек. Однако для ксенон-ксенонных столкновений процент растет: 36%. Этого и стоило ожидать. Ядро ксенона тяжелое, следовательно, частиц от столкновения будет рождаться больше.

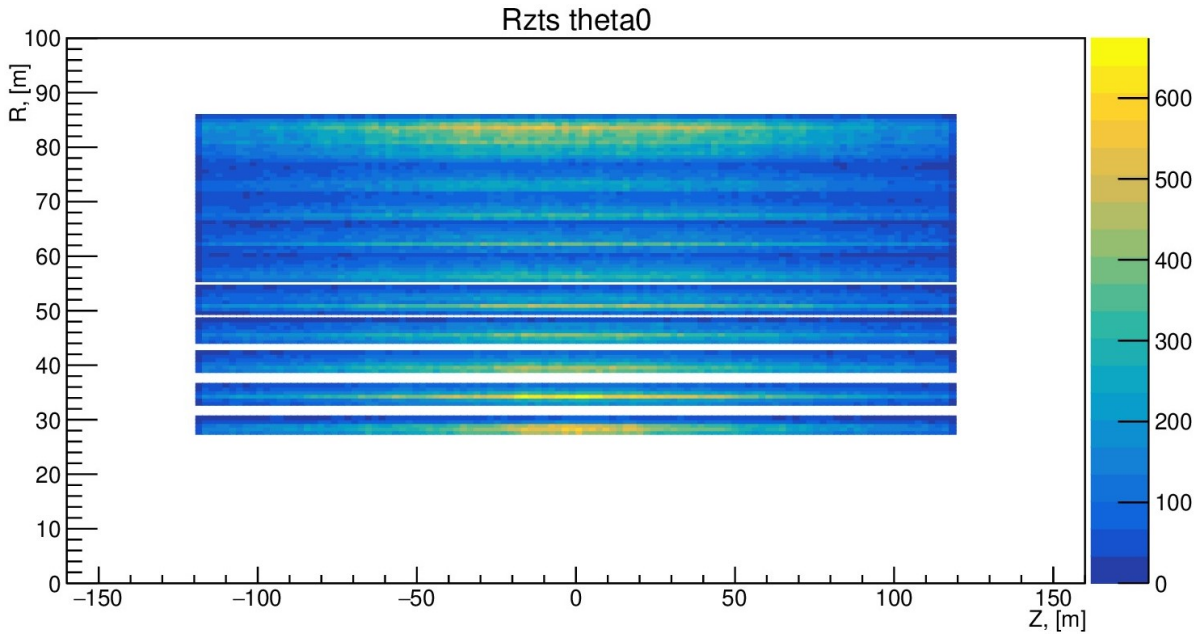


Рисунок 6 — R(Z), отбор по $\theta = 0°$

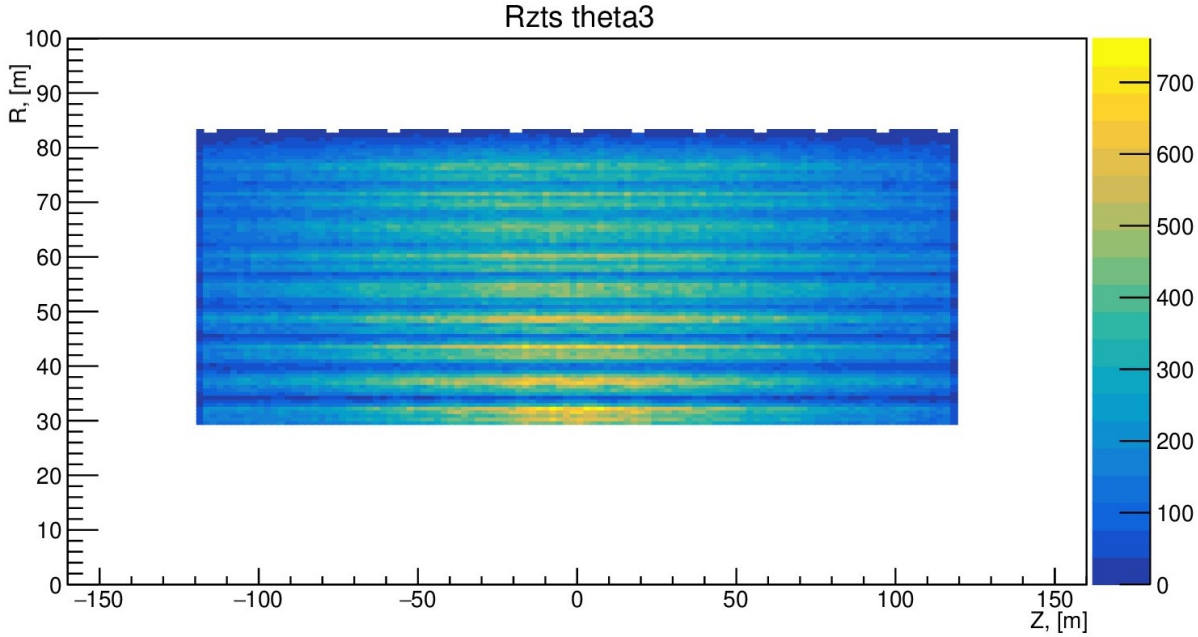


Рисунок 7 — R(Z), отбор по $\theta = 3°$

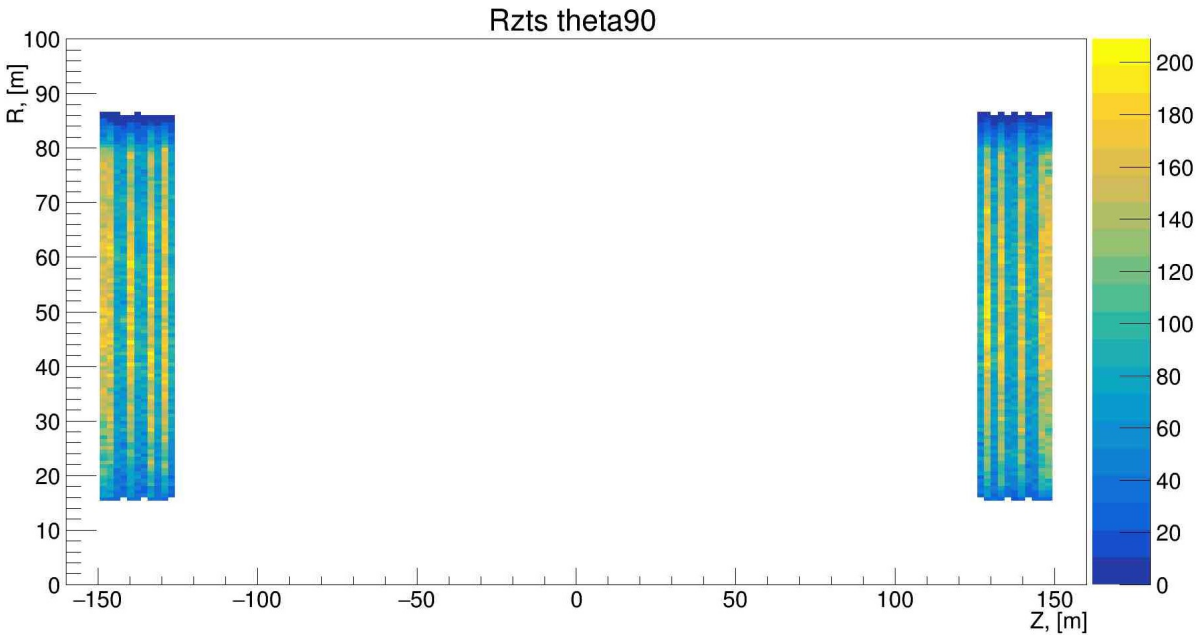


Рисунок 8 — R(Z), отбор по $\theta = 90°$

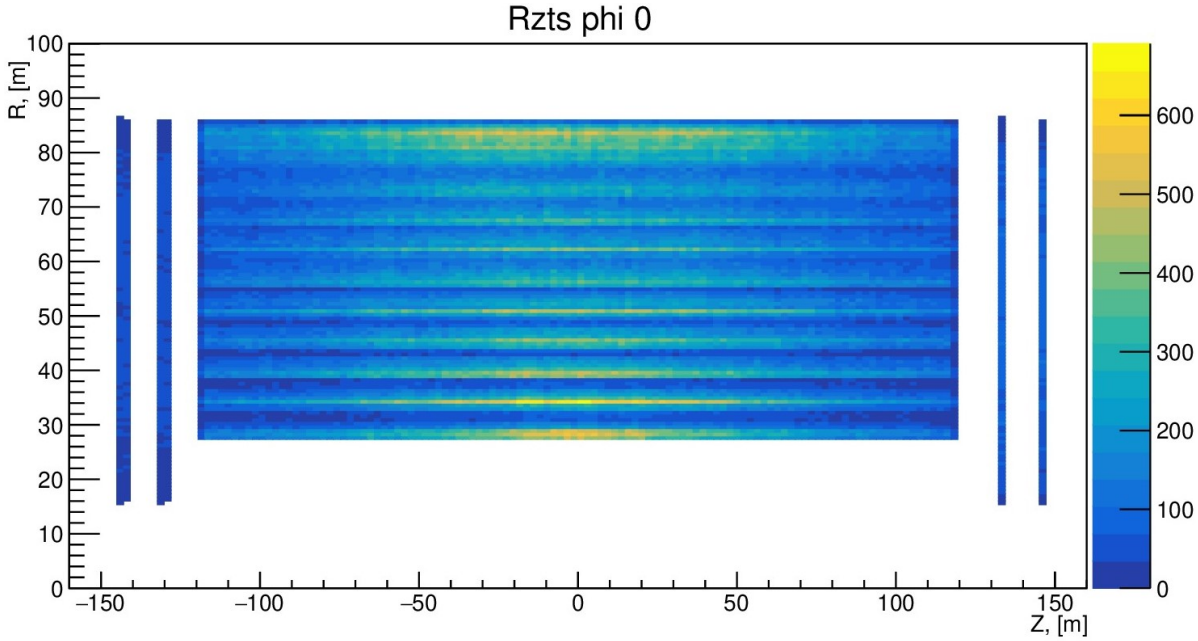


Рисунок 9 — R(Z), отбор по $\phi = 0°$

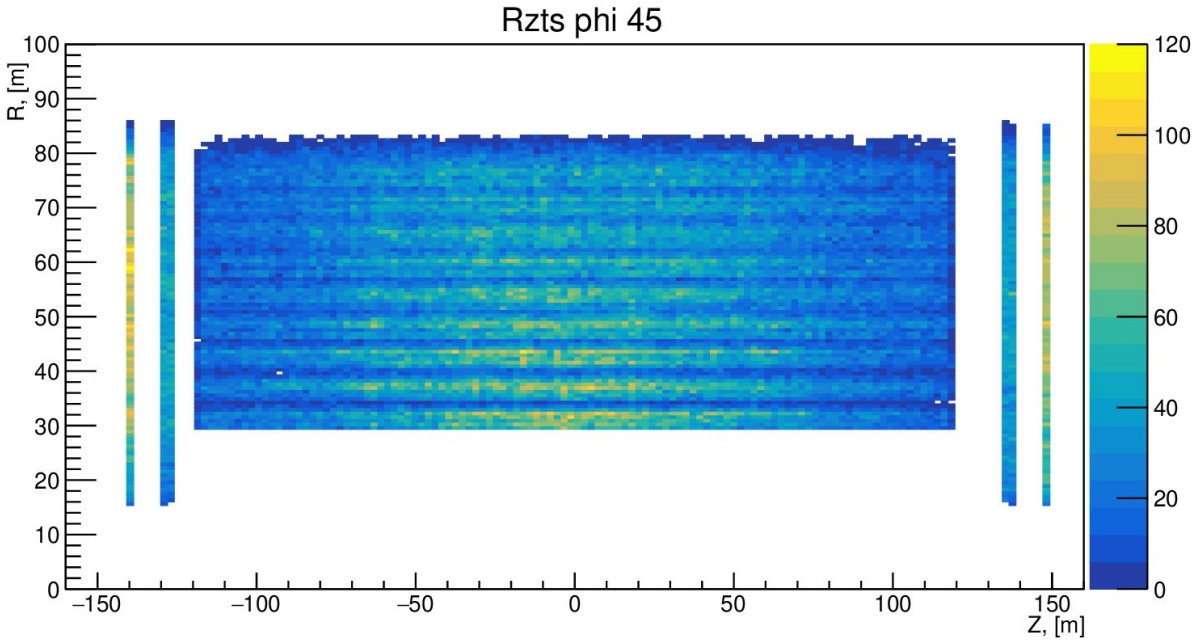


Рисунок 10 — R(Z), отбор по $\phi = 45°$

Так как Straw Tracker в первую очередь ориентирован на восстановление треков заряженных частиц, то логично проверять точность реконструкции по распределениям, связанных с импульсами.

По представленным распределениям (рис.11,12) отчетливо видно, для малых импульсов действительно возникает ошибка в реконструкции. Можно предположить, что так как для малых импульсов радиус кривизны мал, трек сильнее изгибается, требуется высокая точность измерения точек.

Введем обозначения: $p_{reco}$ - импульс частицы в реконструкции, $p_{truth}$ - импульс истинной частицы, $p_{t_{reco}}$ - поперечный импульс частицы в реконструкции, $p_{t_{truth}}$ - поперечный импульс истинной частицы.

Далее представлены зависимости отношения $(p_{reco} - p_{truth})/p_{truth}$ в зависимости от $p_{truth}$ и $(p_{t_{reco}} - p_{t_{truth}})/p_{t_{truth}}$ в зависимости от $pt_{truth}$. А также представлены распределения по $(p_{reco} - p_{truth})/p_{truth}$ и $(p_{t_{reco}} - p_{t_{truth}})/p_{t_{truth}}$. Можно заметить, что получившиеся распределения достаточно симметричны, поэтому, произведя фитирование Гауссом[4], получается некоторое значение $\sigma$ - среднее отклонение, которое указывает на систематическое смещение реконструированного импульса относительно истинного.

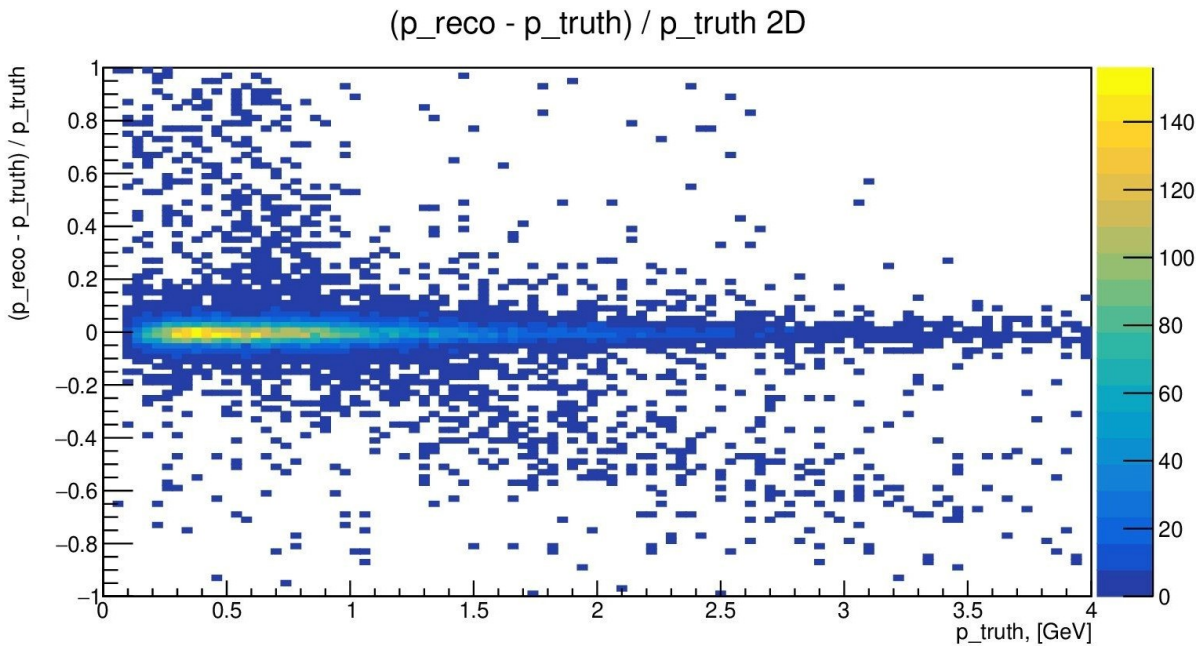


Рисунок 11 — 2D гистограмма зависимости отношения $(p_{reco} - p_{truth})/p_{truth}$ от $p_{truth}$

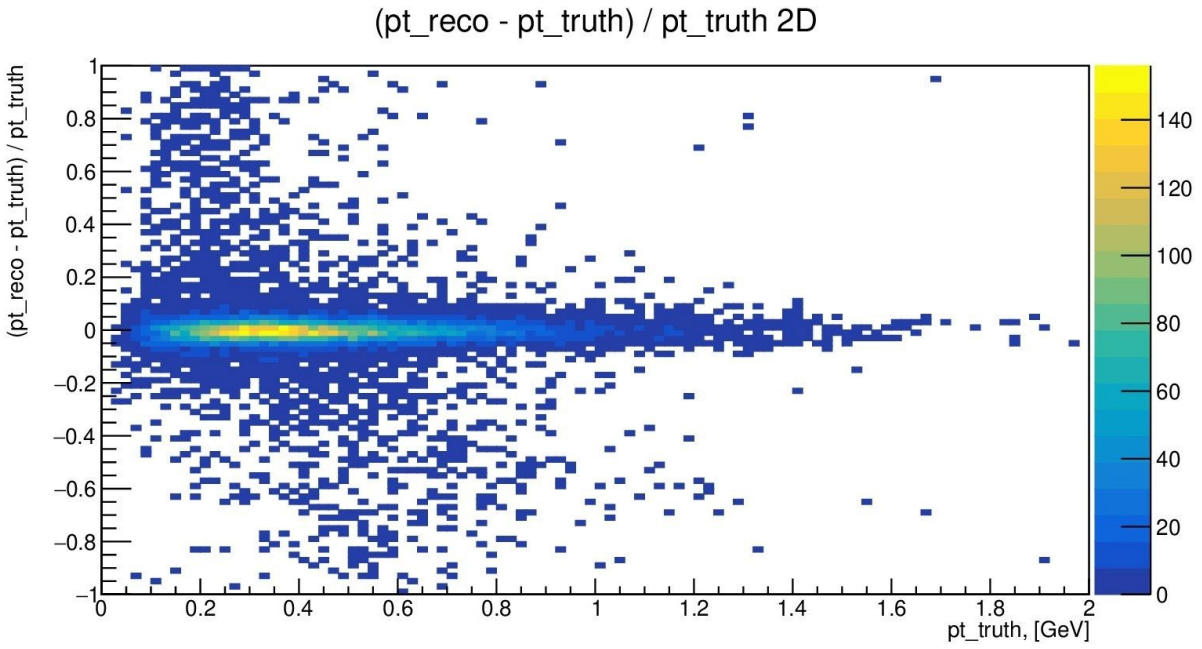


Рисунок 12 — 2D гистограмма зависимости отношения $(p_{t_{truth}} - p_{t_{truth}})/p_{t_{truth}}$ от $p_{truth}$

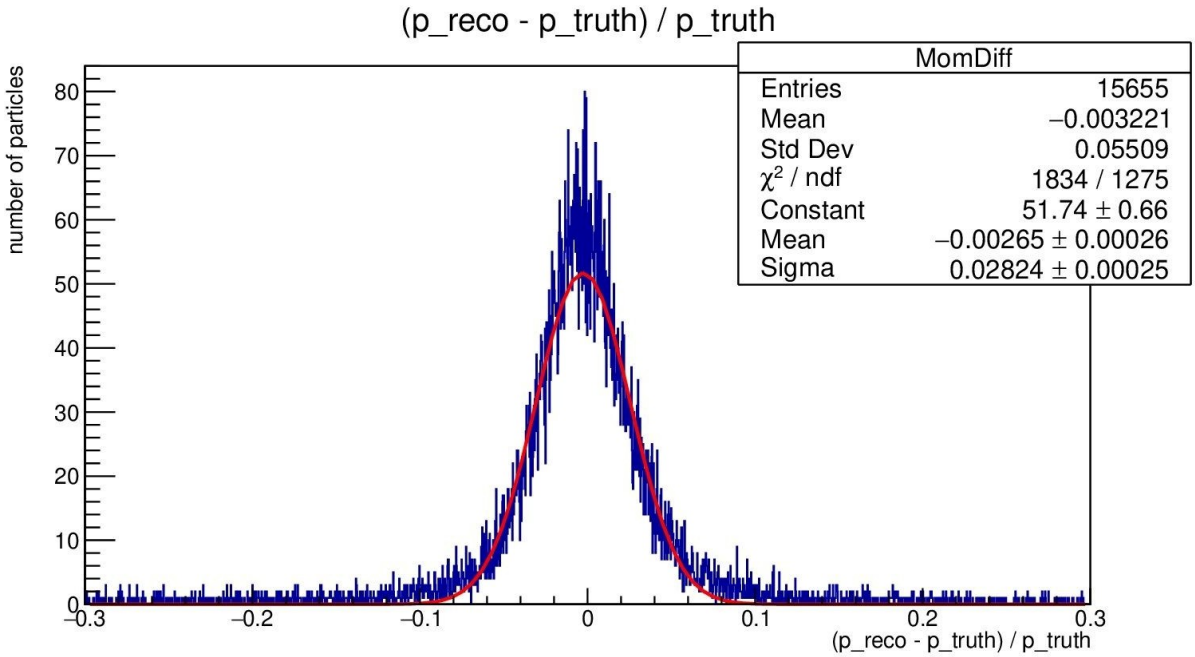


Рисунок 13 — Одномерное распределение $(p_{reco} - p_{truth})/p_{truth}$

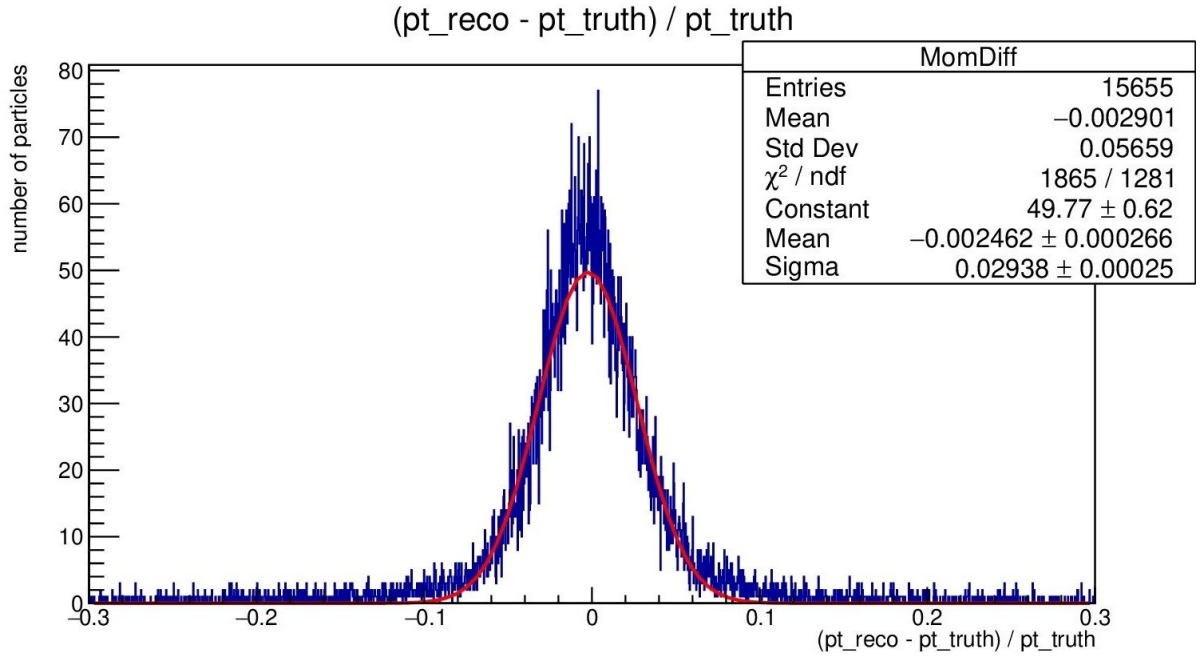


Рисунок 14 — Одномерное распределение $(pt_{reco} - pt_{truth})/pt_{truth}$

Для последующего изучения разрешения по импульсам была построена зависимость $\sigma$ от $pt_{truth}$ (рис.15). Полученная зависимость имеет такие особенности: в области достаточно маленьких и достаточно больших поперечных импульсов среднее отклонение имеет большее значение по сравнению со средним интервалом для поперечного импульса. В первом случае такое отклонение может быть связано с тем, что частицы с малым импульсом очень долго летят до трекера и теряют свою энергию, оставляя малую часть трека задетектированной, из-за чего точность определения импульса падает. Во втором случае трек уже представляет собой кривую с большим радиусом кривизны, что также ухудшает точность. В промежуточной области детектор работает в оптимальном режиме, где систематические эффекты скомпенсированы, а статистические погрешности малы.

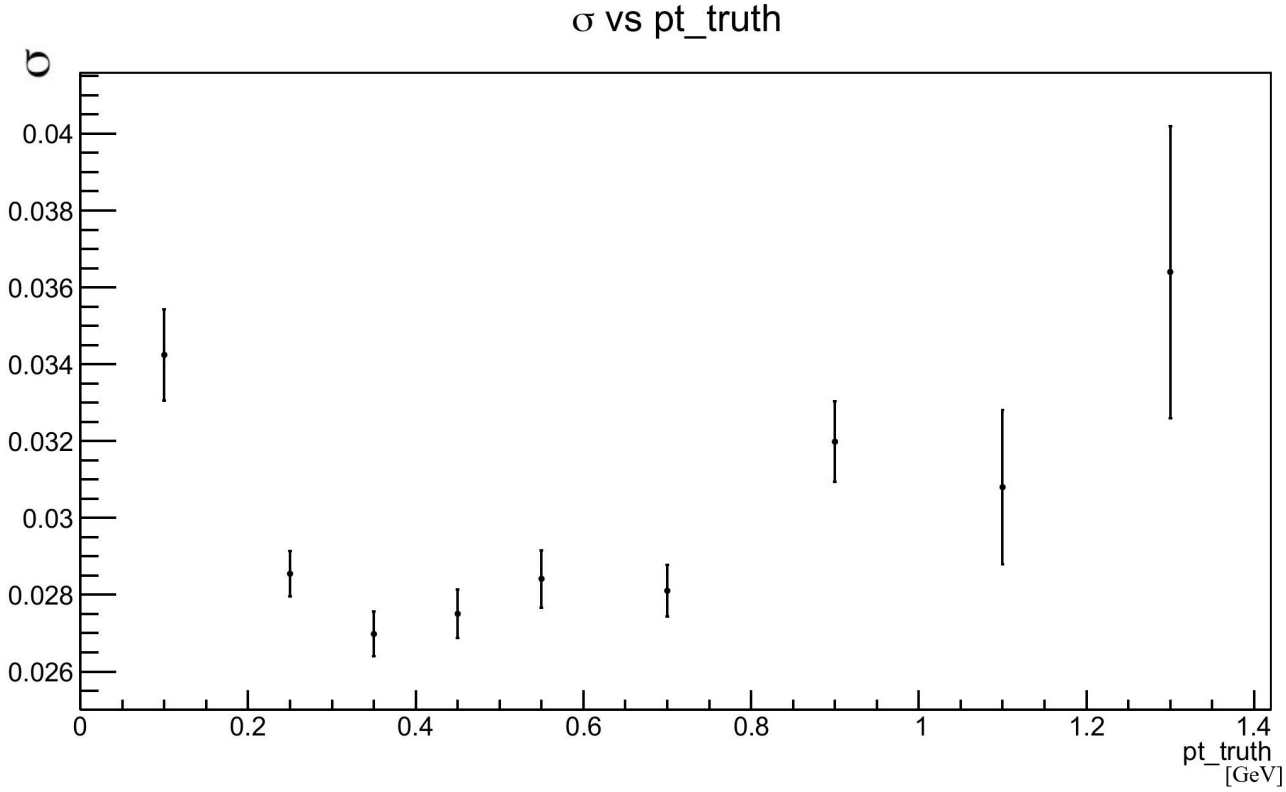


Рисунок 15 — Зависимость $\sigma$ от $pt_{truth}$

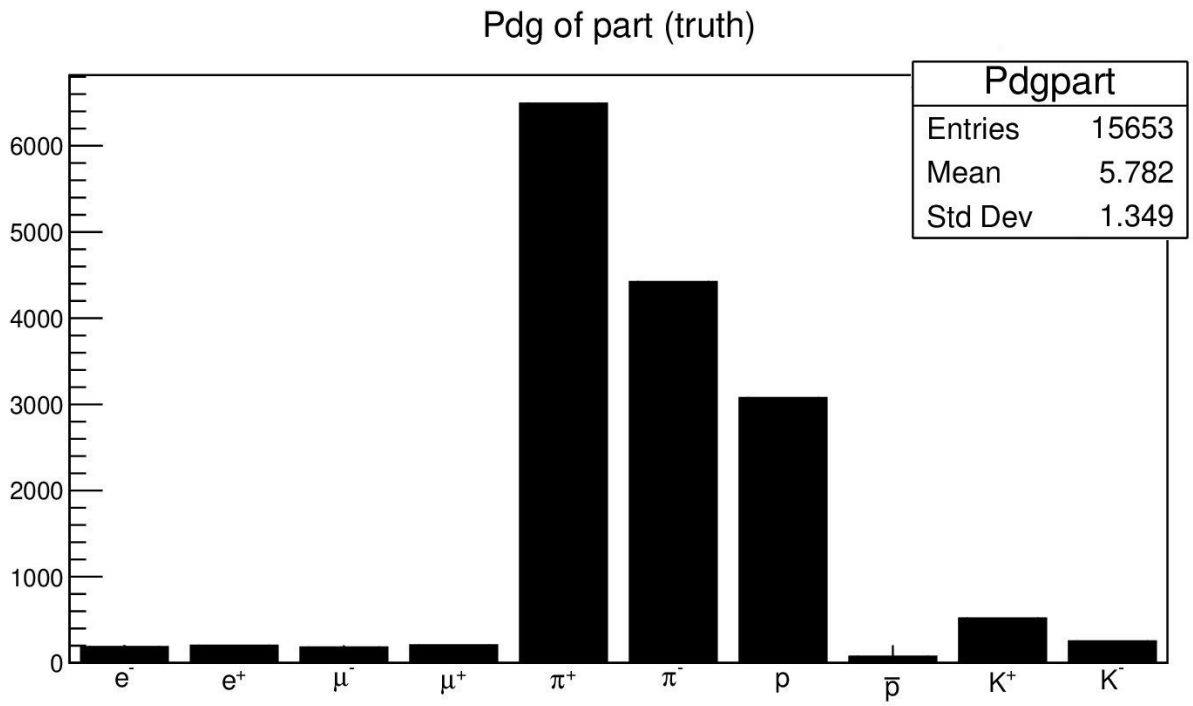


Рисунок 16 — PDG код для истинных частиц

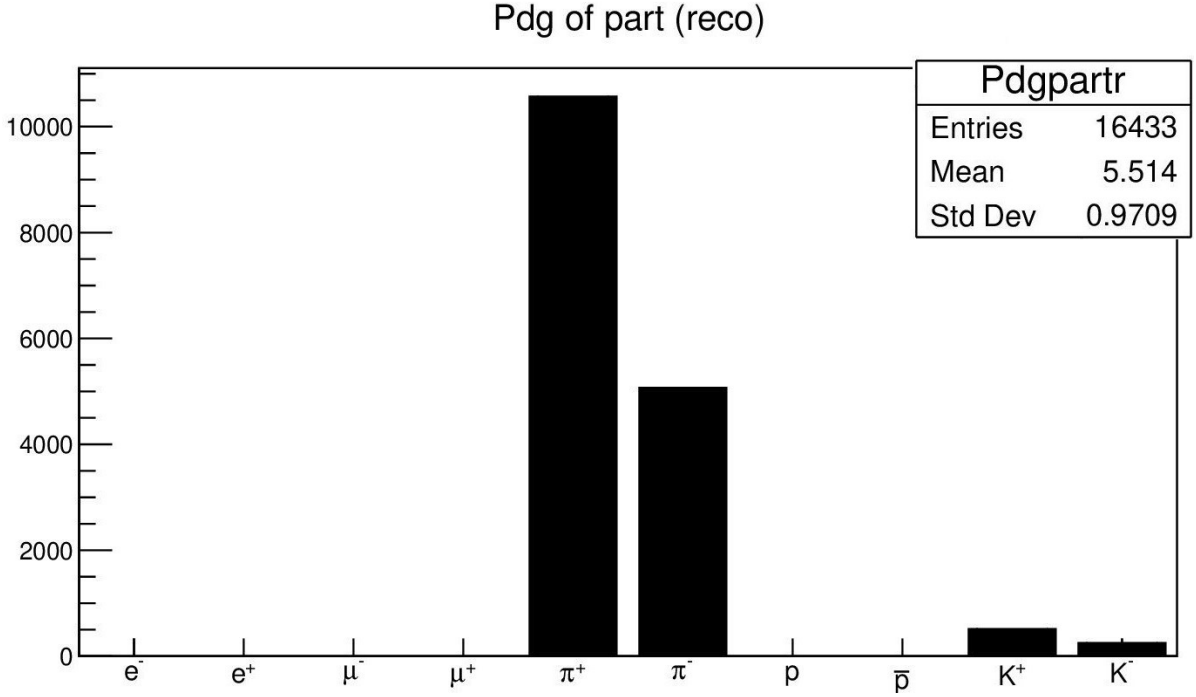


Рисунок 17 — PDG код для реконструированных частиц

При работе с треками были построены гистограммы PDG кодов частиц, траектории движения которых восстанавливаются в Straw Tracker. Как видно (рис.16,17), идентификация частиц в реконструкции не совсем точна, поскольку истинные частицы, которые являются, например, протонами идентифицируются как пионы.

Обратимся к распределению PDG кодов для истинных частиц в Straw Tracker. Довольно легко видеть, что оно вполне соответствует реальности: при столкновении пучков протон основными и самыми многочисленными продуктами являются пионы, электроны и позитроны появляются гораздо реже. Мюонов немного, но их больше, чем электронов.

Кроме того, стоит отметить, что число частиц в реконструкции больше, чем число истинных частиц. Это может быть связано с разбиением истинного трека на несколько частей в реконструкции.

# 4 Заключение

Трековая система - одна из важнейших составляющих эксперимента SPD, поскольку с помощью нее возможно восстанавливать треки частиц и идентифицировать их.

В ходе работы была изучена геометрия Straw Tracker эксперимента SPD, его устройство, особенности регистрации сигналов и вычисления импульса по кривизне траектории. С помощью среды SPDROOT исследована точность реконструкции треков заряженных частиц, рожденных в результате протон-протонных столкновений.

Хотя в работе представлены результаты протон-протонных столкновений, обработка реконструкции с более тяжелыми ионами уже началась. Данная работа является началом анализа пределов применимости Straw Tracker. В результате создана база обработки реконструкции событий, которую можно будет применять к столкновениям различных ядер. В будущем ожидается сравнение полученных данных, зависимостей и распределений от каждого вида ион-ионных столкновений между собой.

Дальнейшие шаги:

1. Набрать больше статистики столкновений пучков протонов, а также набрать статистику для разных ионов;

2. Применить созданную базу анализа применимости Straw Tracker для других ионов;

3. Сравнить полученные результаты для разных ионов и определить максимальный предел применимости трековой системы в эксперименте SPD.

# Список использованных источников


1. Мегапроект NICA. — URL: https://nica.jinr.ru/ru/. — (дата обр.: 15.05.2025).
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. *Cowan G.* Statistical Data Analysis. — Oxford : Oxford University Press, 1998. — ISBN 978-0198501558.