

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий  
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

**ОТЧЁТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**  
**ИЗУЧЕНИЕ ДИМЮОННОГО СПЕКТРА В**  
**ЭКСПЕРИМЕНТЕ SPD**

Научный руководитель,  
(к.ф.-м.н.)

Е.Ю.Солдатов

Студент

И.Ю.Иваненко

Москва, 2026

## **СОДЕРЖАНИЕ**

|          |                                    |           |
|----------|------------------------------------|-----------|
|          | <b>Цель работы и задачи</b>        | <b>3</b>  |
| <b>1</b> | <b>Введение</b>                    | <b>4</b>  |
| 1.1      | Первая стадия эксперимента SPD     | 6         |
| 1.2      | Мюонная система( Range system, RS) | 7         |
| <b>2</b> | <b>Представление результатов</b>   | <b>9</b>  |
| 2.1      | Результаты для $N = 1000$ событий  | 9         |
| 2.2      | Результаты для $N = 10000$ событий | 14        |
|          | <b>Заключение</b>                  | <b>21</b> |
|          | <b>Список литературы</b>           | <b>22</b> |

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ**

**Цель работы** – изучить восстановление димюонного спектра в SPD как от  $J/\Psi$ , так и от других источников.

### **Задачи:**

1. Получить данные реконструкции для  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  распада.
2. Получить гистограммы для поперечного импульса, полярного и азимутального углов, псевдобыстроты и проанализировать их.
3. Построить эффективность реконструкции всех частиц.
4. Построить чистоту реконструкции мюонов.
5. Получить распределение хитов внутри мюонной системы.
6. Произвести экстраполяцию треков частиц из Straw tracker'а в мюонную систему.

## **ВВЕДЕНИЕ**

NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) – ускорительный комплекс, предназначенный для изучения свойств сильного взаимодействия.

На первом этапе работы исследование горячей и плотной барионной материи будет проводиться в столкновениях тяжёлых ионов с помощью Многоцелевого детектора (MPD), расположенного в первой точке взаимодействия коллайдера. Это исследование должно пролить свет на свойства адронов в среде и уравнение состояния ядерной материи. Коллайдер также предоставляет возможность работы с поляризованными протонными и дейтронными пучками высокой интенсивности, которые будут использоваться для изучения поляризованной структуры протона и дейтрона с помощью Детектора Спиновой Физики (SPD), установленного во второй точке взаимодействия.

Основной целью эксперимента на SPD является получение информации о зависящих от поперечного импульса партонных функциях распределения (TMD PDF) глюонов в протоне и дейтроне. Это будет осуществляться путём измерения определённых односпиновых и двухспиновых асимметрий с использованием таких комплементарных проб, как процессы рождения чармония и прямых фотонов. Эта научная задача предъявляет определенные требования к концепции экспериментальной установки.

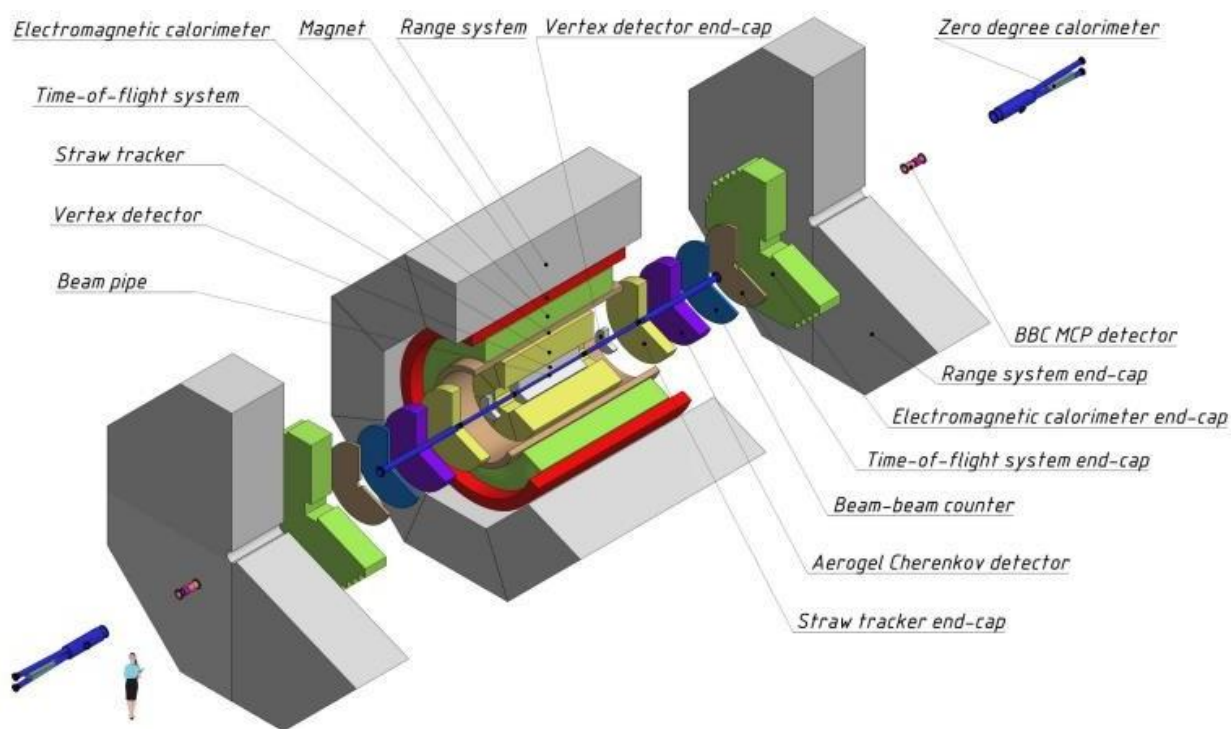


Рис.1 – Схема установки SPD

Первая фаза эксперимента SPD будет посвящена отладке систем, сбору первых данных и изучению упругого рассеяния, а также других доступных для измерения с данной конфигурацией детектора процессов. Вторая фаза будет направлена на комплексное исследование поляризованных глюонов в протонах и дейтронах.

## 1.1. ПЕРВАЯ СТАДИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD

Первый этап эксперимента SPD будет посвящён исследованию поляризованных и неполяризованных явлений при низких энергиях и пониженной светимости с использованием пучков тяжёлых ионов, а также поляризованных протонов и дейтронов. В круг изучаемых процессов войдут, в частности, поляризованные явления в упругом p-p и d-d рассеянии и других эксклюзивных реакциях, спиновые эффекты в рождении гиперонов, образование дибарионных резонансов и гиперъядер, рождение чармония вблизи порога и др. Данный этап подразумевает создание минимальной конфигурации установки, которая должна включать:

- Range System (RS) – несущую конструкцию всей установки и ярмо магнита, а также систему детектирования мюонов;
- Сверхпроводящий соленоид (SS) – для отклонения заряженных частиц в магнитном поле с целью дальнейшего измерения их импульса;
- Трековая система на основе дрейфовых трубок (ST) – для восстановления импульса заряженных частиц и идентификации частиц путём измерения энергетических потерь на ионизацию  $dE/dx$ ;
- Однослойный центральный трековый детектор на основе технологии Micromegas (MCT) – для повышения точности восстановления импульса заряженных частиц;
- Система из двух счетчиков пучков (BBC), внутреннего и внешнего – для локальной поляриметрии, контроля светимости;
- Система из двух калориметров нулевого угла (ZDC) – для локальной поляриметрии и контроля светимости.

## 1.2. МЮОННАЯ СИСТЕМА (Range System, RS)

Мюонная система (Range System, RS) детектора SPD состоит из Бочки (Barrel) и двух Торцевых крышек (End-Caps, ECs). Она выполняет следующие задачи: (i) реконструкция мюонов в условиях значительного адронного фона и (ii) оценка адронной энергии (грубая калориметрия адронов). Важно подчеркнуть, что мюонная система является единственной подсистемой в основной части установки SPD, способной идентифицировать нейтроны (за счет комбинирования их сигналов с данными электромагнитного калориметра и внутренних трекеров). Идентификация мюонов осуществляется посредством распознавания мюонных траекторий и последующего сопоставления сегментов треков с треками внутри соленоида. Точное определение импульса мюонов выполняется внутренними трековыми детекторами в магнитном поле. В мюонной системе в качестве трековых детекторов используются мини-дрейфовые трубки (Mini Drift Tubes, MDT), обеспечивающие двухкоординатное считывание (проволочные и стриповые электроды, расположенные перпендикулярно). Такое считывание в первую очередь необходимо для событий с высокой множественностью треков, а также для восстановления пространственного угла нейтронов.

Одной из ключевых физических задач мюонной системы является идентификация мюонов из распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  на фоне ложных сигналов от ошибочно идентифицированных пионов и их распадов.

Распад чармония является одним из процессов, позволяющих изучать спиновую структуру нуклонов. Кроме того, в экспериментах с энергиями столкновений порядка тех, что достигаются на NICA, достаточно редко бывают мюонные системы, и детальное изучение мюонного спектра может помочь обнаружить какие-то аномалии, отличия от теории.

## 1.2. МЮОННАЯ СИСТЕМА( Range System. RS)

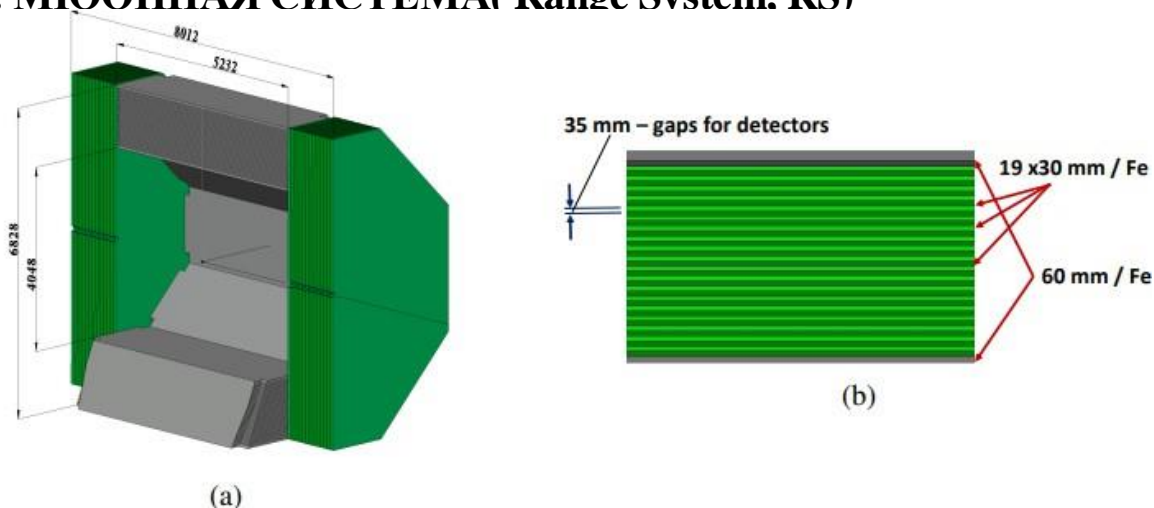


Рис.2 – а) Структура мюонной системы, включающая barrel и ECs, б) структура поглотителя

Два внешних 60-мм стальных слоя используются для соединения модулей между собой, а также для крепления внутренних детекторов (изнутри) и внешних сервисных устройств (снаружи). Толщина основных пластин поглотителя (всего девятнадцать), равная 30 мм, выбрана как величина, сравнимая с разбросом пробега мюонов в стали. Это обеспечивает наилучшее возможное разделение мюонов и пионов, а также дает достаточно хорошее сэмплирование для адронной калориметрии.

Межслойные зазоры в 35 мм предусмотрены для надежного монтажа детектирующих слоев (всего двадцать), состоящих из мини-дрейфовых трубок (MDT), печатных плат со стриповыми электродами, установленных поверх них плат электроники сопряжения, а также соответствующих кабелей.

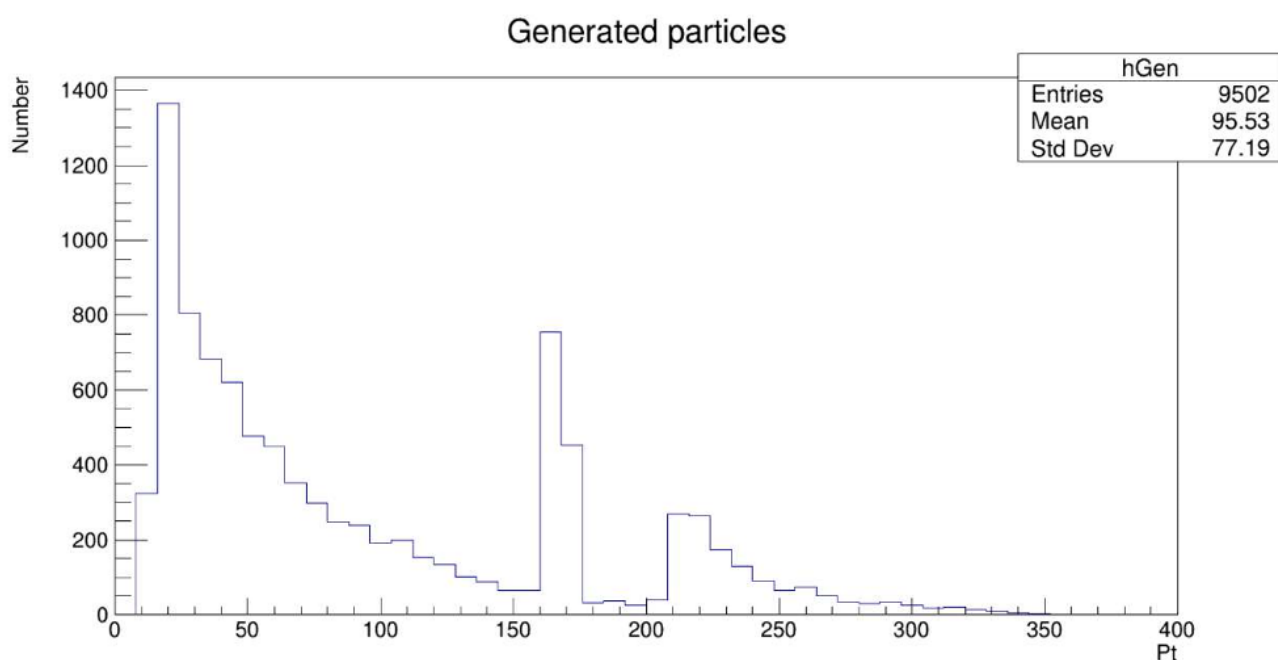
Баррель состоит из восьми модулей, а каждая эндкап — из двух половин (створок), разделенных по вертикали. Каждая створка, в свою очередь, также разделена в вертикальной плоскости, перпендикулярной направлению пучка, на две равные части.

## 2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=1000 СОБЫТИЙ

- **Гистограммы для основных характеристик.**

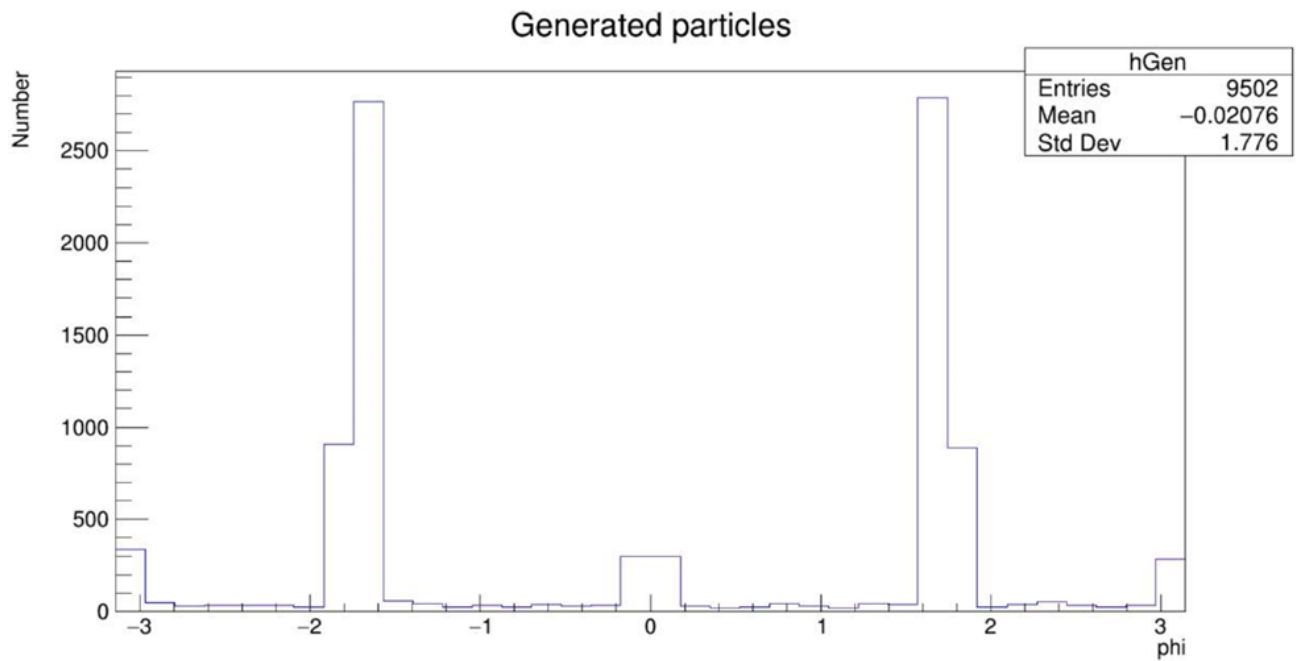
В начале работы были проделаны симуляция и реконструкция 1000 событий с подключением лишь нескольких систем детектора SPD(в частности Straw Tracker и Range system).

После окончания реконструкции были проанализированы полученные данные и построены гистограммы для поперечного импульса, полярного и азимутального углов, а также псевдобыстроты:

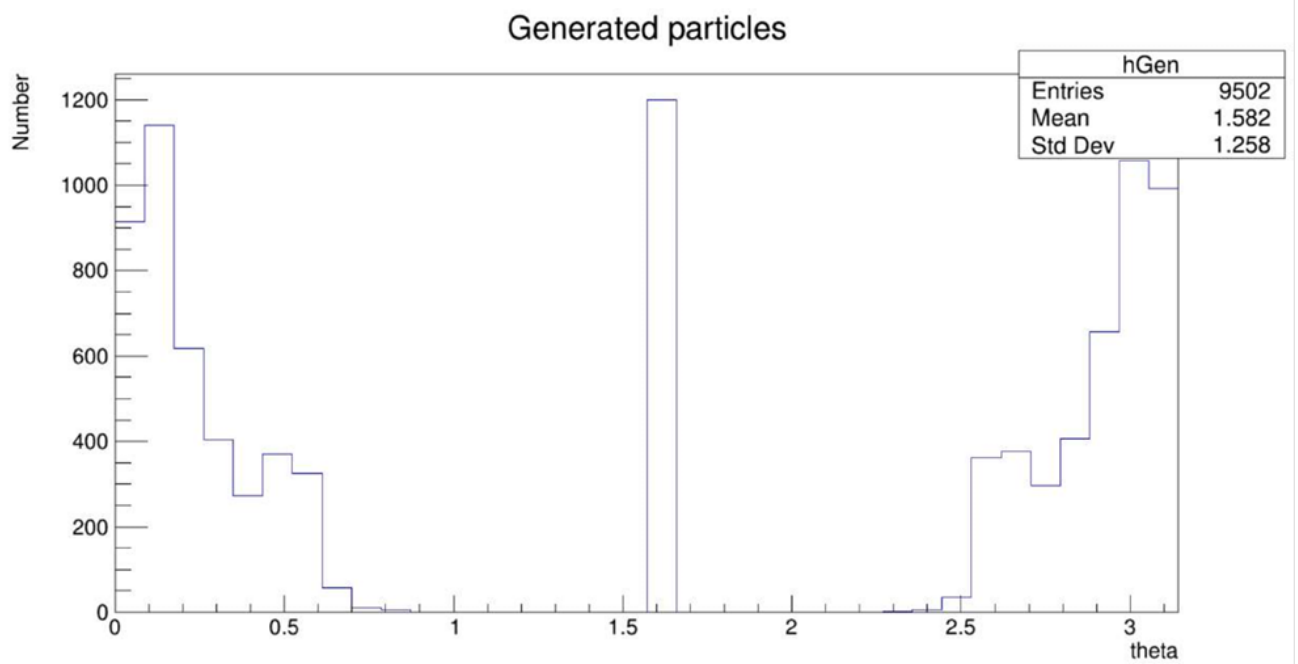


Гистограмма 1. Распределение по поперечному импульсу для N=1000.

## 2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=1000 СОБЫТИЙ

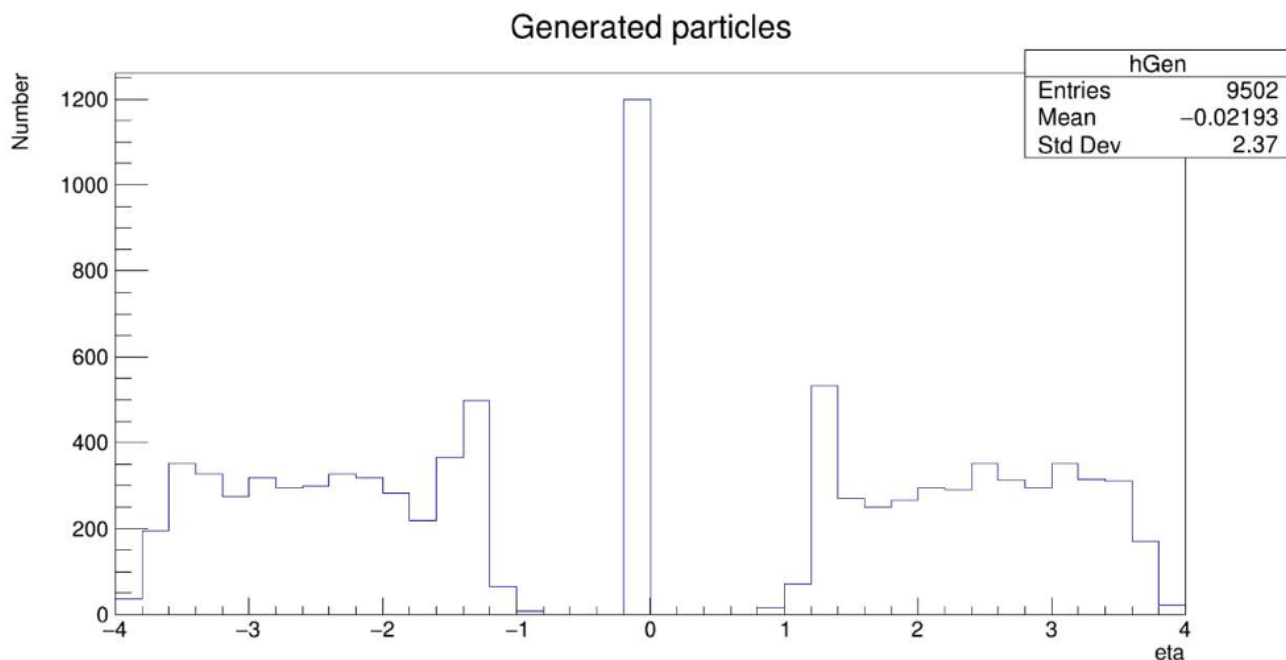


Гистограмма 2. Распределение по азимутальному углу для N=1000



Гистограмма 3. Распределение по полярному углу для N=1000

## 2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=1000 СОБЫТИЙ



Гистограмма 4. Распределение по псевдобыстроте для N=1000

### • Графики эффективности для N=1000.

По полученным из реконструкции данным были построены графики эффективности реконструкции всех частиц в зависимости от основных параметров:

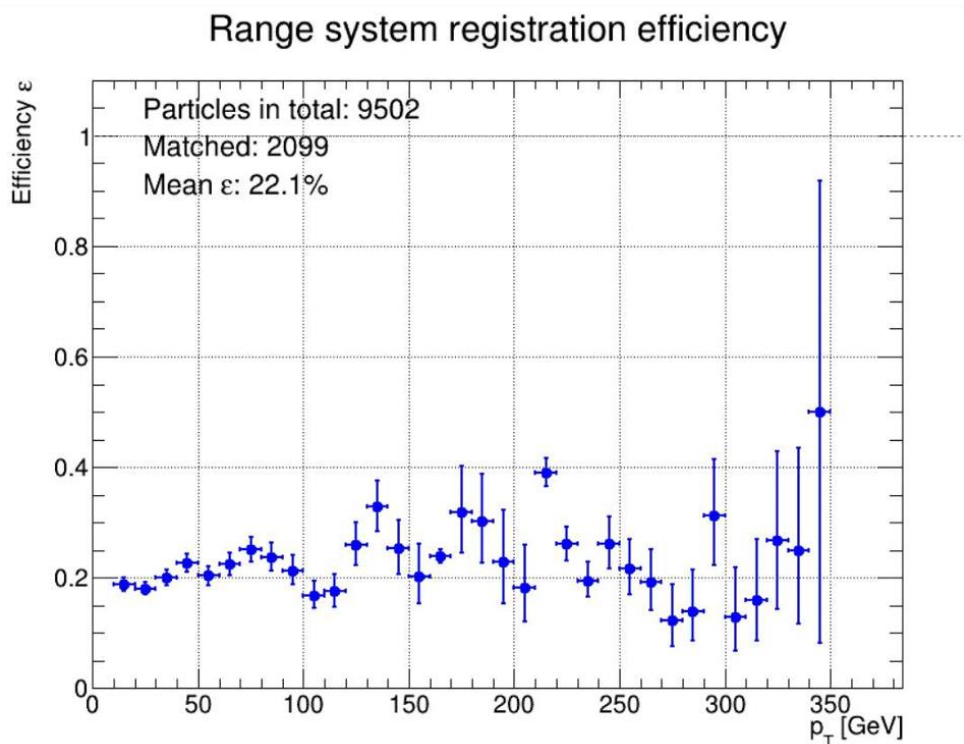


Рис 3. График эффективности реконструкции в зависимости от поперечного импульса

## 2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=1000 СОБЫТИЙ

### Range system registration efficiency

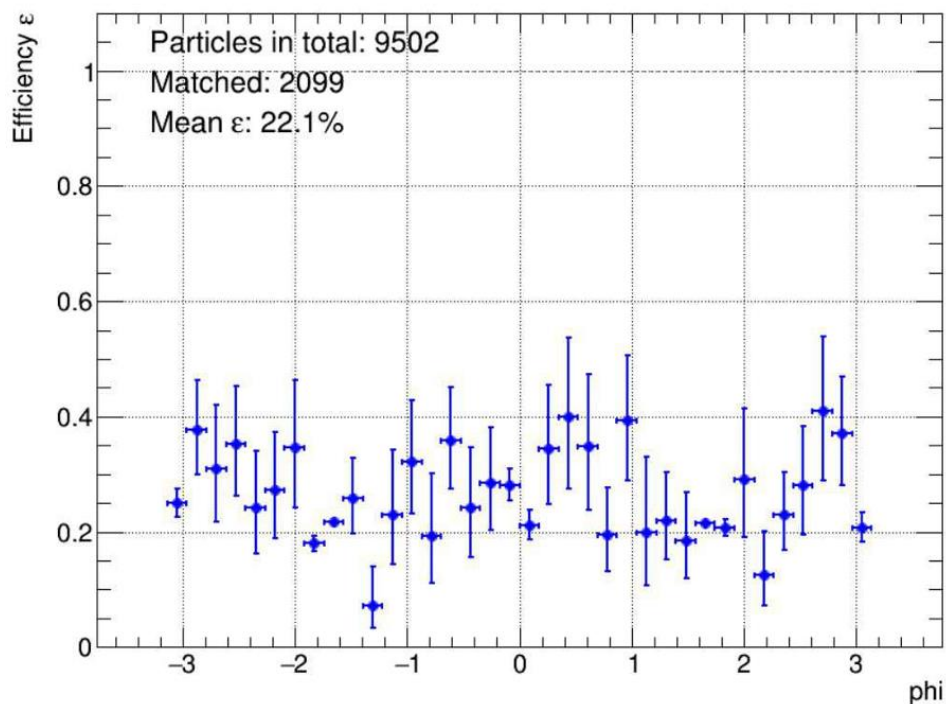


Рис 4. График эффективности реконструкции в зависимости от азимутального угла

### Range system registration efficiency

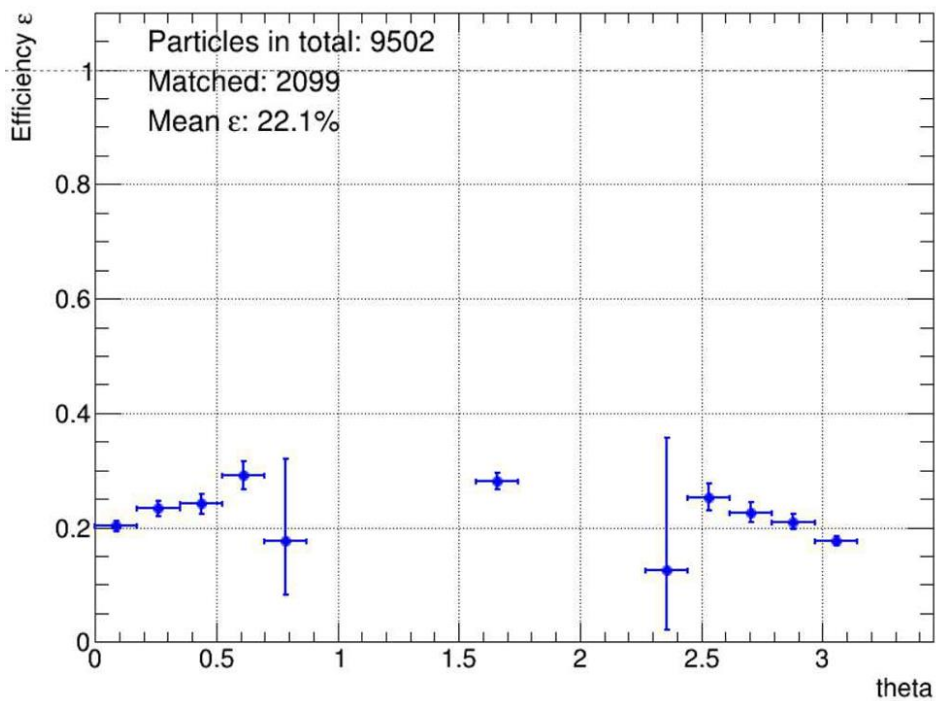


Рис 5. График эффективности реконструкции в зависимости от полярного угла

## 2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=1000 СОБЫТИЙ

### Range system registration efficiency

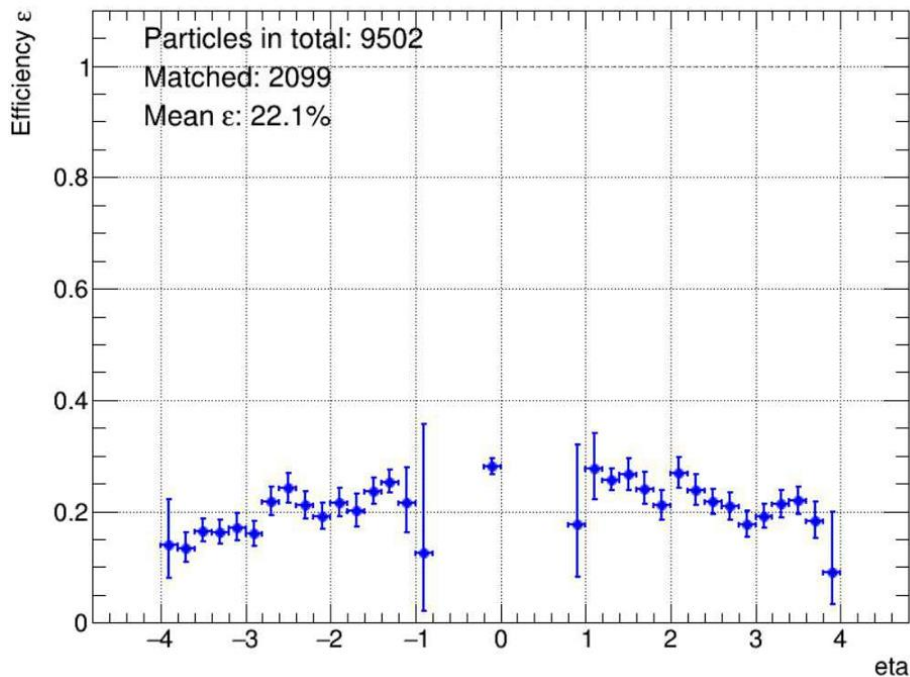


Рис 6. График эффективности реконструкции в зависимости от псевдобыстроты

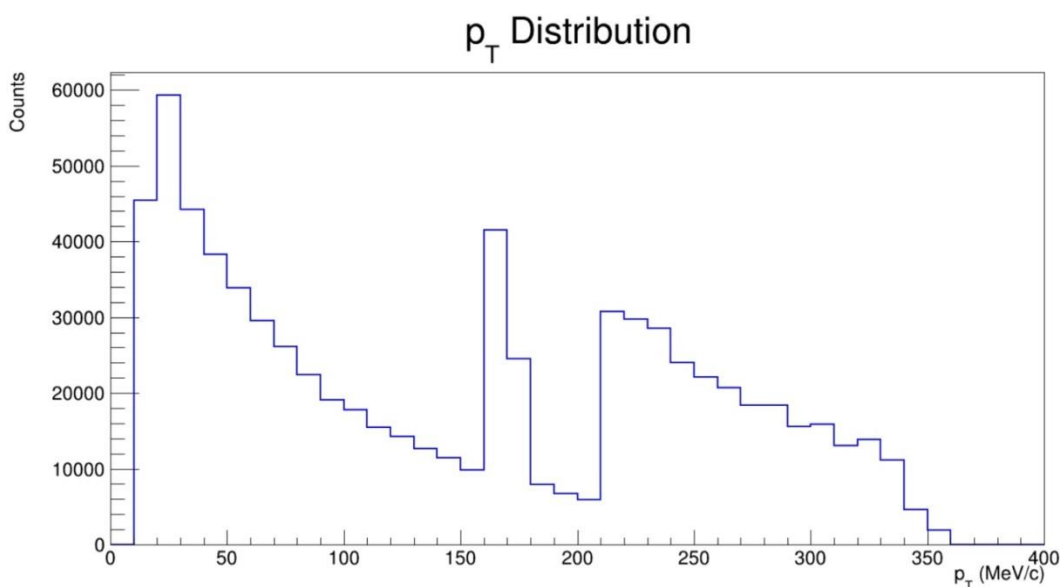
В полученных гистограммах и эффективностях можно выделить, что при малых (но не нулевых) псевдобыстротах мы не имеем никаких данных, что противоречит ожидаемому результату, ведь мы работаем с 4 $\pi$ -детектором.

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=10000

- **Гистограммы основных характеристик для N=10000.**

После работы с N=1000 событий с использованием docker-контейнера было решено перейти на контейнеры singularity и обработать уже N=10000 событий. Кроме того, были подключены все доступные системы SPD, за исключением FARICH.

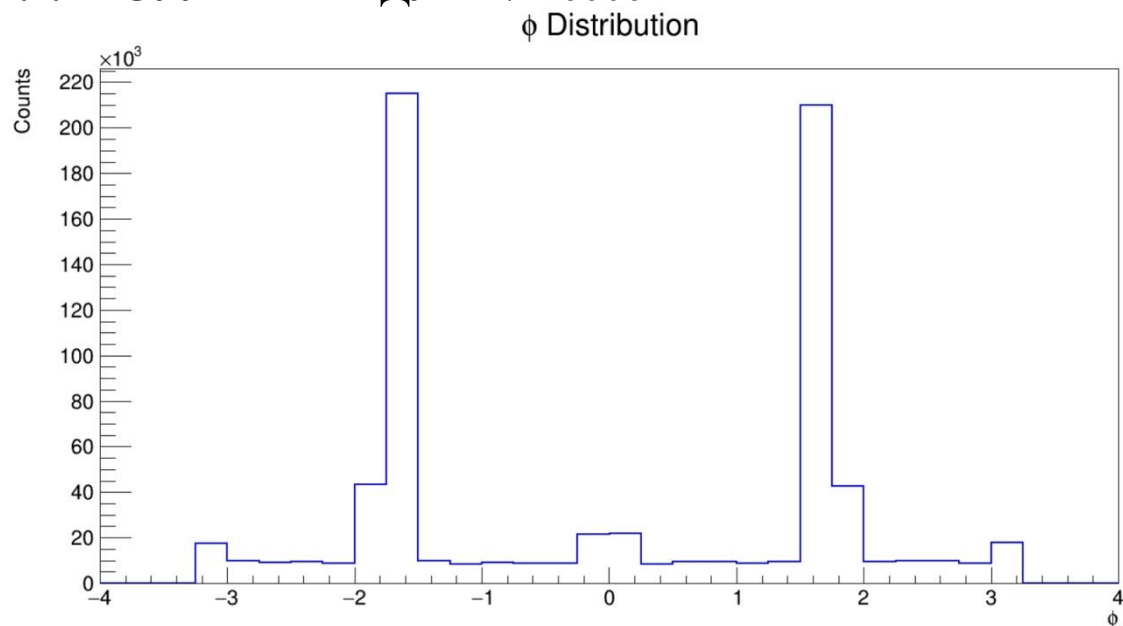
По результатам реконструкции были построены гистограммы для основных характеристик:



Гистограмма 5. Распределение по поперечному импульсу для N=10000.

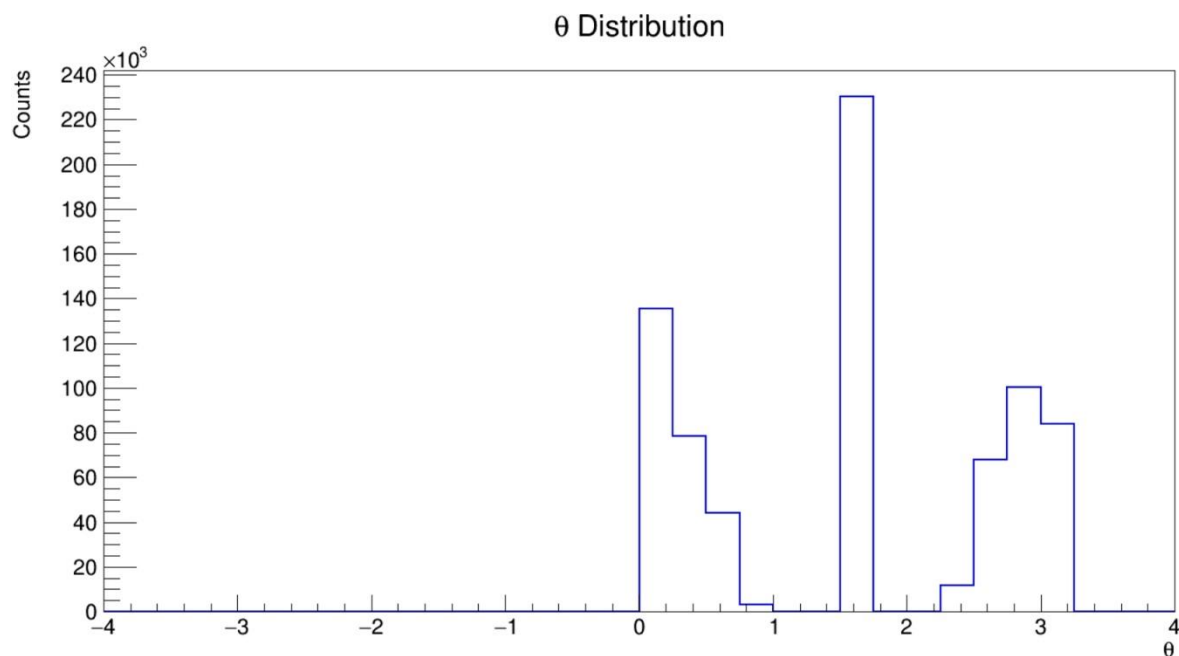
Распределение по поперечному импульсу все так же имеет четко выраженный пик в 160 МэВ. Кроме того, значения поперечного импульса меньше ожидаемых (единиц ГэВ).

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=10000



Гистограмма 6. Распределение по азимутальному углу для N=10000.

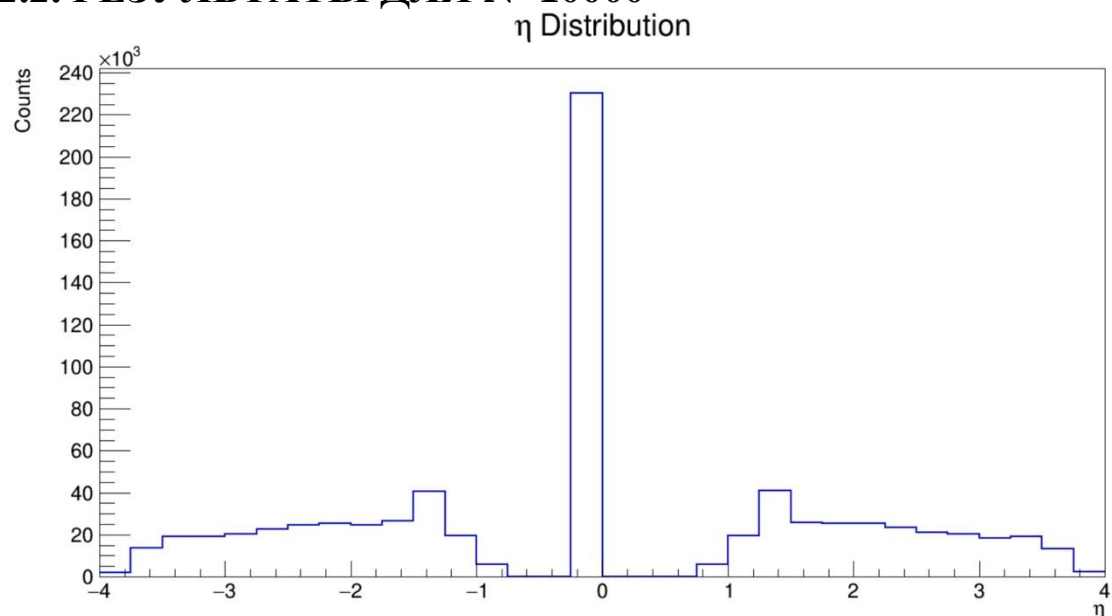
Распределение по азимутальному углу имеет симметричные относительно нуля пики при углах в 90 градусов.



Гистограмма 7. Распределение по полярному углу для N=10000.

Распределение по полярному углу также имеет пик в 90 градусах.

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=10000



Гистограмма 8. Распределение по псевдобыстроте для  $N=10000$ .

Как можно заметить, вид гистограмм аналогичен прежним, несмотря на то, что мы подключили дополнительные модули детектора. Отсутствие данных при малых псевдобыстротах остается, малые значения поперечного импульса также не являются ожидаемым результатом.

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=10000

### • Графики чистоты для N=10000.

Также по полученным данным были построены графики чистоты реконструкции мюонов:

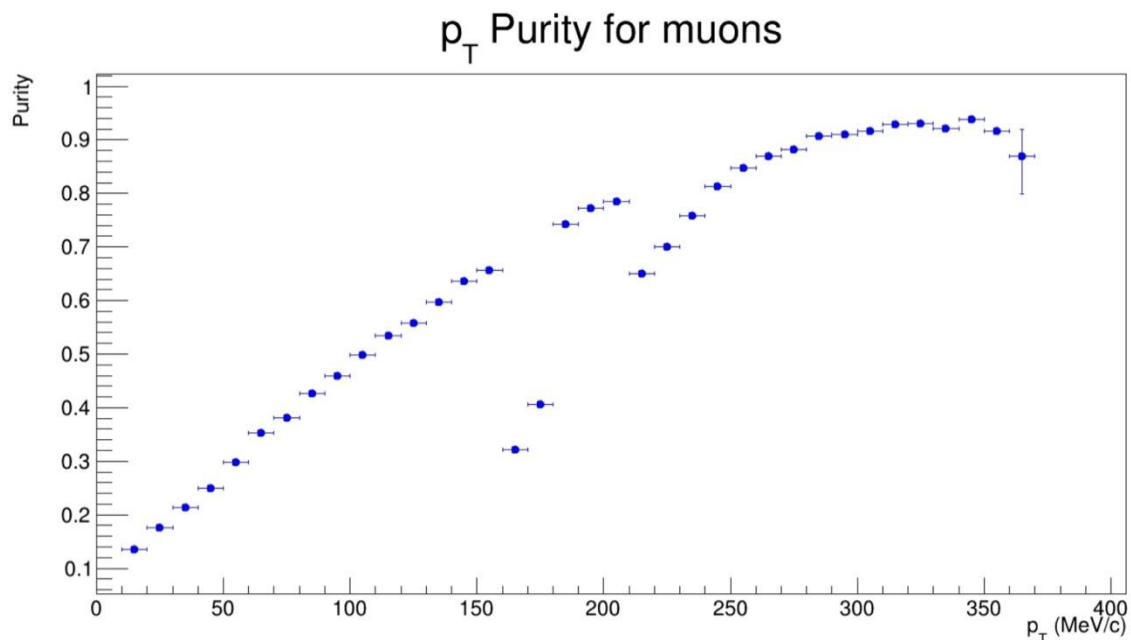


Рис 7. График чистоты реконструкции мюонов в зависимости от поперечного импульса.

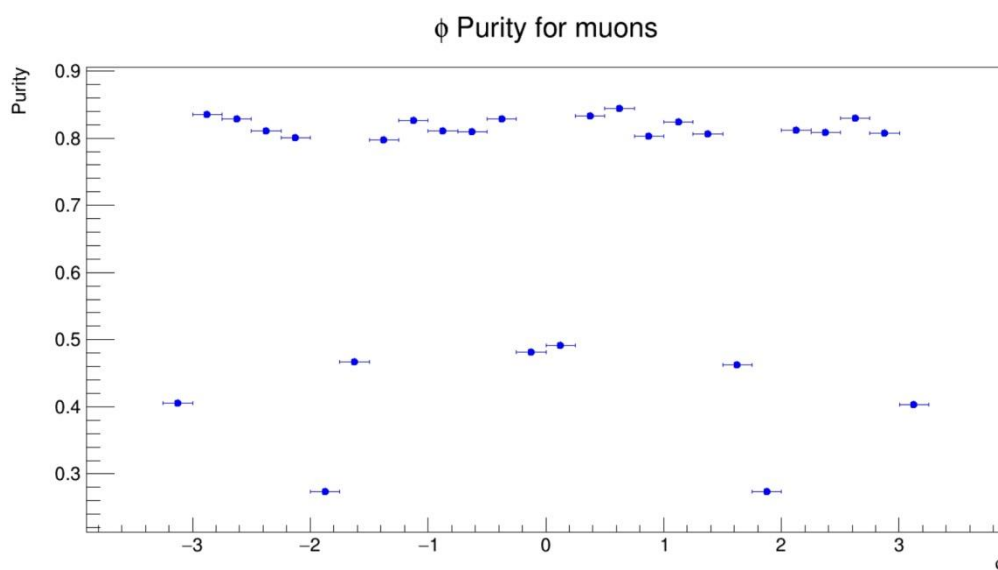


Рис 8. График чистоты реконструкции мюонов в зависимости от азимутального угла.

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=10000

$\theta$  Purity for muons

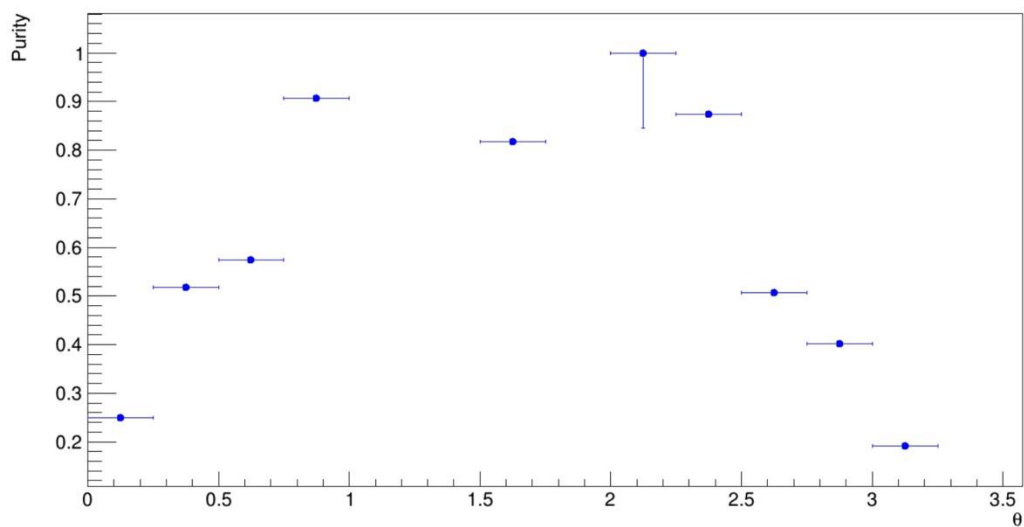


Рис 9. График чистоты реконструкции мюонов в зависимости от полярного угла.

$\eta$  Purity for muons

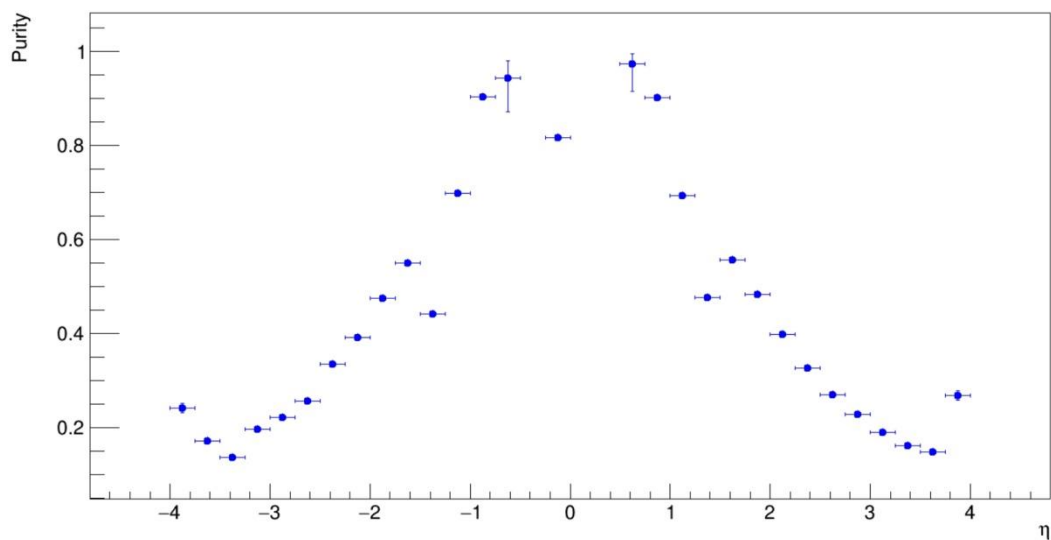


Рис 10. График чистоты реконструкции мюонов в зависимости от псевдобыстроты.

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=10000

- **Распределение хитов в мюонной системе.**

Для большей уверенности в корректной работе реконструкции также была проведена отрисовка хитов внутри мюонной системы:

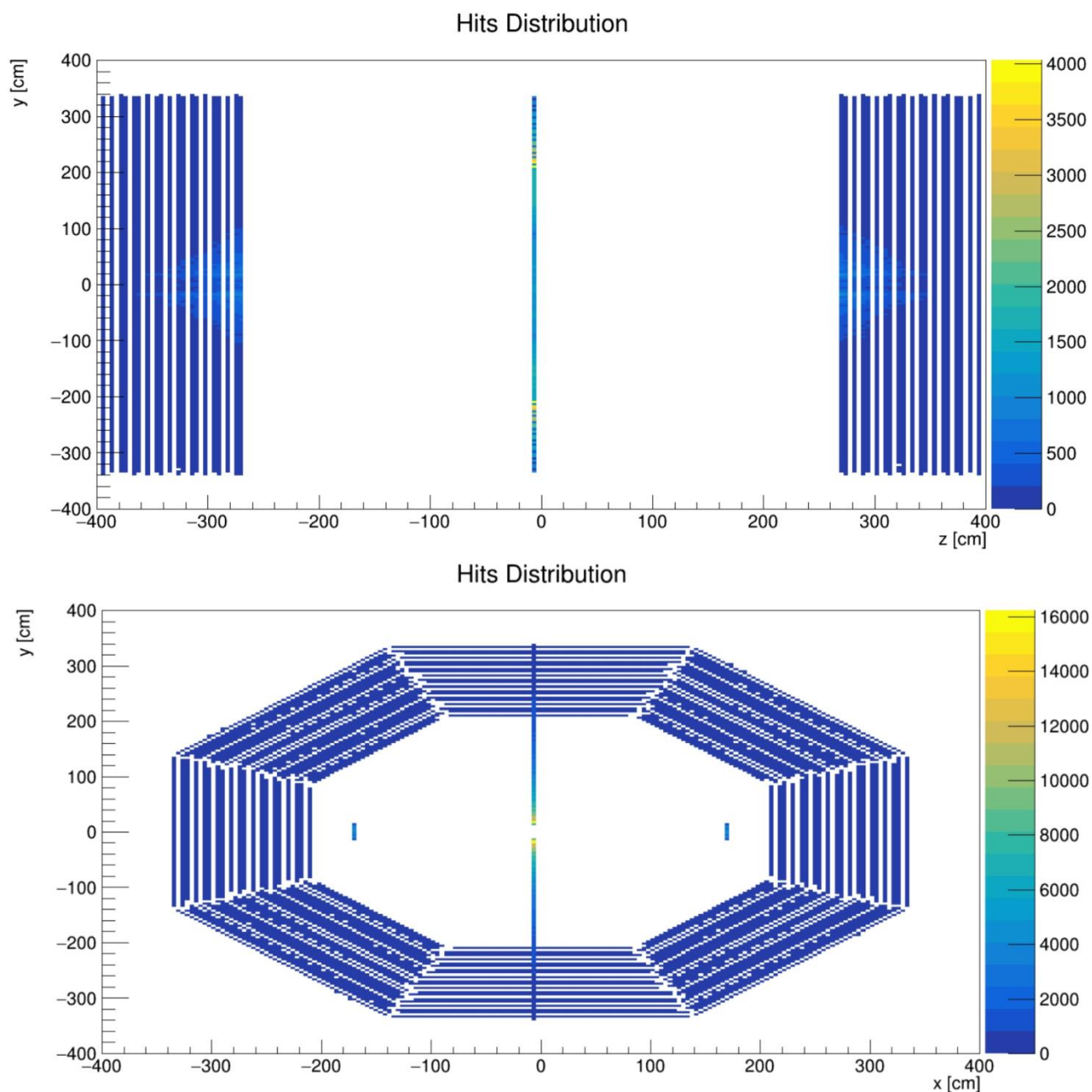


Рис 11. Распределение хитов в мюонной системе.

Вид хитов внутри системы совпадает с ожидаемым.

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ N=10000

- **Результаты экстраполяции треков частиц из Straw Tracker в Range system.**

В ходе работы также с помощью отдельного макроса была выполнена экстраполяция треков из Straw Tracker'а в мюонную систему. Из полученных данных была создана коллекция гистограмм, приведенная ниже.

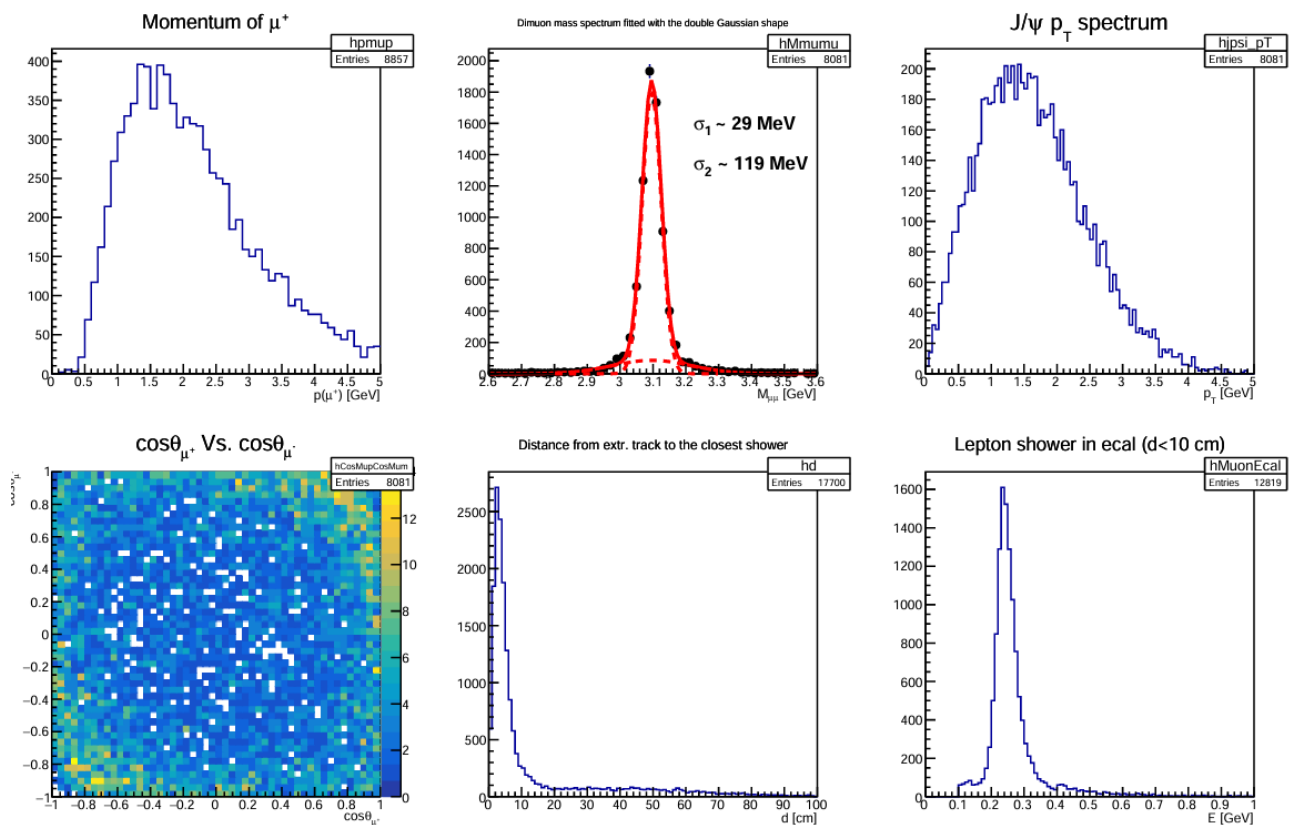


Рис 12. Данные экстраполяции треков.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В процессе работы были проведены реконструкция распада чармония на пару мюон-антимюон и ее дальнейший анализ. В ходе анализа были получены значения поперечных импульсов порядка десятых долей ГэВ, в то время как экстраполяция дала мюоны с поперечными импульсами порядка единиц ГэВ. Кроме того, было замечено отсутствие данных в области малых псевдобыстрот.

Планируется разрешить расхождение в значениях поперечного импульса и понять причину отсутствия данных в области малых псевдобыстрот, более аккуратно проанализировать результаты, полученные из экстраполяции треков из Straw Tracker'а в мюонную систему.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешко, А. Исследования на первом этапе работы коллайдера NICA с поляризованными и неполяризованными протонными и дейтронными пучками [Электронный ресурс] / А. Алешко, В.В. Абрамов.
2. Spin Physics Detector collaboration. О проекте детектора Spin Physics Detector (SPD) [Электронный ресурс] // SPD — Spin Physics Detector at the NICA collider. — Режим доступа: <https://spd.jinr.ru/>.
3. Абазов, В.М. Концептуальный проект детектора Spin Physics Detector / В.М. Абазов и [др.]. — 2021.
4. Электронный ресурс: статья на arXiv.org — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2404.08317>.
5. Bierlich C. A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3 [Электронный ресурс] / C. Bierlich, S. Chakraborty, N. Desai, L. Gellersen, I. Helenius, P. Ilten, L. Lönnblad, S. Mrenna, S. Prestel, C. T. Preuss, T. Sjöstrand, P. Skands, M. Uthm, R. Verheyen // arXiv.org. — 2022. — 22 марта. — URL: <https://arxiv.org/abs/2203.11601>
6. Brun R. ROOT — An Object Oriented Data Analysis Framework [Электронный ресурс] / R. Brun, F. Rademakers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. — 1997. — Vol. 389, Iss. 1-2. — P. 81-86. — URL: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X)