

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

УДК 539.165.2

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДА $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ В
ДЕТЕКТОРЕ SPD С ПОМОЩЬЮ SPDROOT

Научный руководитель
к.ф.-м.н., в.н.с.

_____ Е. Ю. Солдатов

Студент

_____ Г. Е. Петров

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Введение | 3 |
| 1 Теоретическая часть | 3 |
| 1.1 Цель эксперимента SPD | 3 |
| 1.2 Первая стадия эксперимента | 4 |
| 1.3 Вторая стадия эксперимента | 5 |
| 2 Моделирование распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ в среде spdroot | 6 |
| 2.1 Запуск симуляции | 6 |
| 2.2 Запуск реконструкции | 6 |
| 2.3 Анализ данных | 7 |
| 2.4 Результаты анализа данных | 7 |
| 3 Заключение | 16 |
| Заключение | 16 |
| 4 Библиография | 17 |

ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования в области физики высоких энергий направлены на изучение фундаментальных свойств материи и взаимодействий на субатомном уровне. Одной из наиболее актуальных задач является исследование структуры нуклона, включая вклад глюонов и кварков в его спин и массу. Для выполнения этой задачи разрабатываются новые экспериментальные установки, такие как Spin Physics Detector (SPD), предназначенный для работы на коллайдере NICA в Объединённом институте ядерных исследований (Дубна).

SPD представляет собой универсальный детектор, созданный для изучения структуры протонов и дейтронов, а также связанных с ними спиновых явлений. Уникальные возможности этой установки позволяют исследовать поляризованные столкновения протонов и дейтронов в ранее недоступных энергетических диапазонах [4], что делает SPD важным дополнением к текущим и будущим экспериментам в таких лабораториях, как RHIC (BNL), LHC (CERN) и EIC (BNL). Исследования в рамках SPD нацелены на решение ключевых вопросов, связанных с содержанием глюонов в нуклонах и динамикой их взаимодействий.

Одной из важнейших составляющих программы SPD является моделирование и анализ процессов, происходящих в экспериментальных установках. Среда `spdroot` была разработана для выполнения этих задач и позволяет эффективно симулировать взаимодействия частиц, реконструировать траектории и анализировать данные. Для демонстрации возможностей `spdroot` в данной работе рассматривается процесс распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, который служит примером для тестирования методов анализа и валидации работы модели детектора.

Для выполнения основной цели данной работы - моделирования распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ - были поставлены следующие задачи:

- Запуск и отладка симуляции столкновений пучков протонов с заданными параметрами
- Запуск и отладка реконструкции с заданными параметрами
- Извлечение данных о частицах из симуляции и о реконструированных частицах
- Анализ полученных данных

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Цель эксперимента SPD

Основная цель эксперимента SPD - получение доступа к глюонным функциям распределения зависимым от поперечного импульса (далее будет использоваться аббревиатура TMD PDFs - Transverse Momentum Dependent Parton Distribution Functions) в протоне и дейтроне

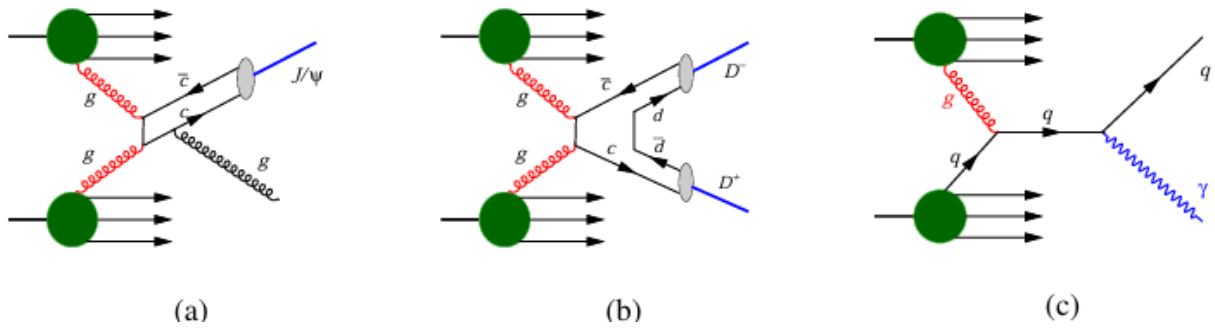


Рисунок 1 — Диаграммы иллюстрирующие реакции: production of (a) charmonium, (b) open charm, and (c) prompt photons

[2]. Для получения же доступа к TMD PDFs в самом эксперименте будут анализироваться такие реакции, как production of charmonium, open charm, and prompt photons [3].

1.2 Первая стадия эксперимента

Цели:

- Начальные измерения по изучению спиновой структуры протонов и глюонных TMD PDFs в процессах с фотонами, заряженными частицами и J/ψ .
- Выполнение первых измерений для верификации теоретических моделей.
- Сбор данных для последующей модернизации системы детекторов.

Детекторы, необходимые на первой стадии [1]:

- **Straw-Based Tracking System (ST):** Реконструкция треков заряженных частиц.
- **Micromegas-Based Central Tracker (MCT):** Центральный трекер для улучшения точности треков.
- **Electromagnetic Calorimeter (ECal):** Детектирование фотонов.
- **Muon Range System (RS):** Идентификация мюонов.
- **Beam-Beam Counters (BBC):** Контроль светимости и поляриметрия.
- **Zero Degree Calorimeters (ZDC):** Контроль светимости и измерение параметров нейтральных частиц.

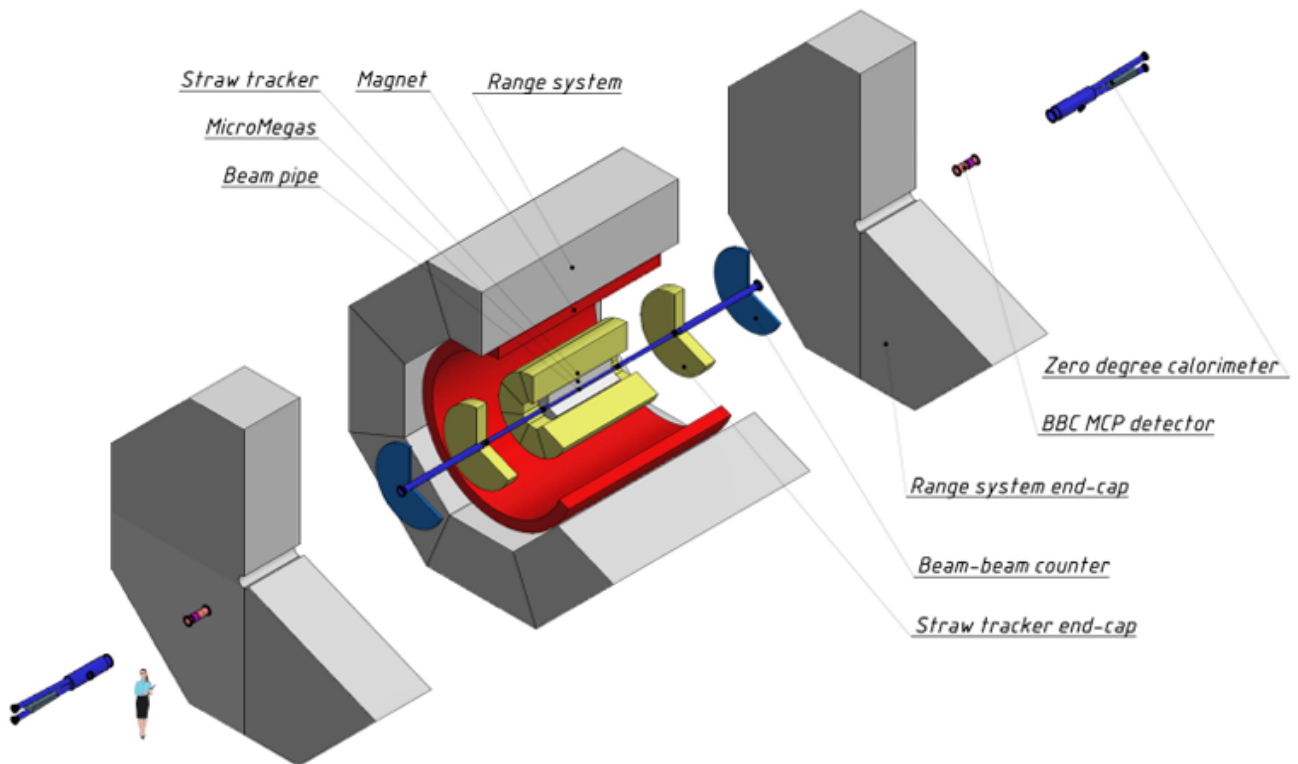


Рисунок 2 — Детекторы первой стадии эксперимента

1.3 Вторая стадия эксперимента

Цель:

- Более точное и полное изучение TMD PDFs глюонов и кварков.

Улучшение детекторов:

- **Silicon Vertex Detector (SVD):** Система, заменяющая MCT, для реконструкции вершин распада короткоживущих частиц, что важно для точного анализа D -мезонов.
- **Time-of-Flight (TOF) System:** Введение системы для идентификации частиц по времени пролета (в частности для разрешения π/K K/p)
- **FARICH (Aerogel-Based Detector или AEG):** Улучшение идентификации частиц (в частности протонов и каонов).

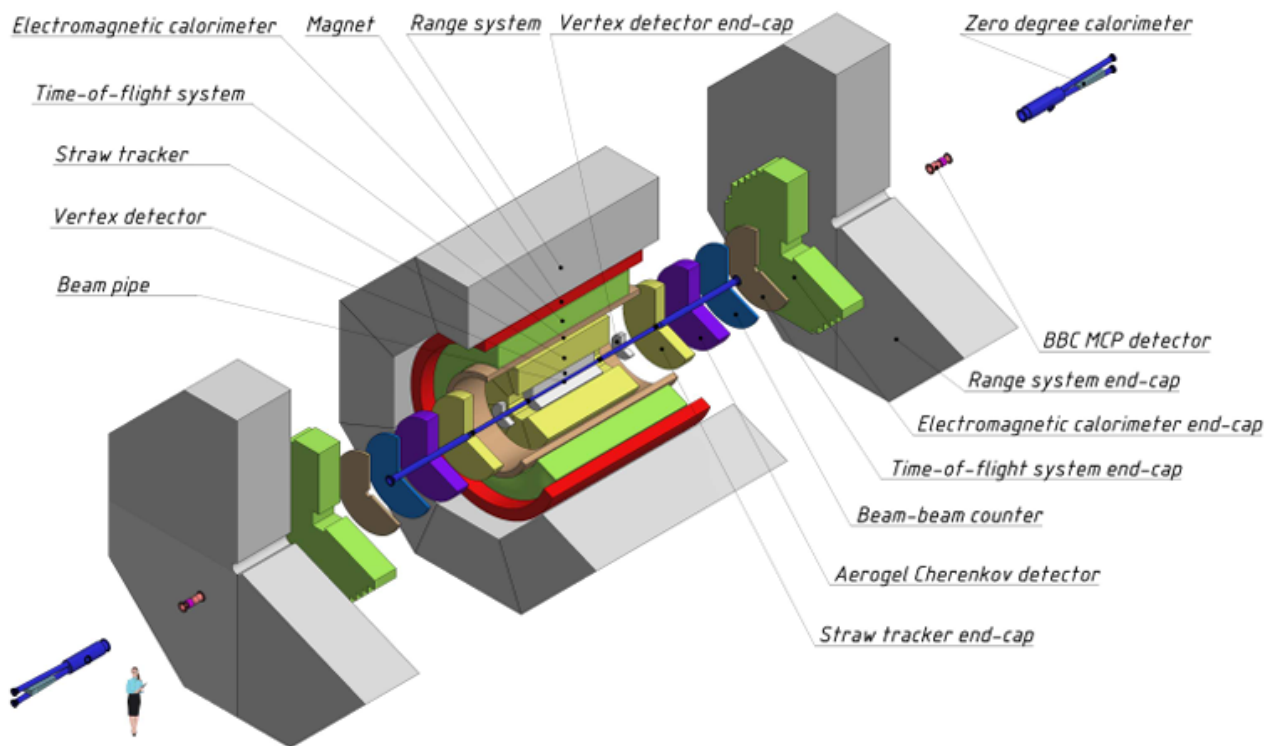


Рисунок 3 — Детекторы второй стадии эксперимента

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДА $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ В СРЕДЕ SPDROOT

2.1 Запуск симуляции

Симуляция событий происходит в отдельном скрипте. События в данной работе генерируются при помощи Pythia 8 Generator. При помощи редактирования кода задаются параметры симуляции, а именно: состав пучков, число событий, энергия частиц и используемые детекторы. На выходе данного скрипта – файлы с данными, необходимыми для дальнейшей реконструкции и анализа. В данной работе параметры симуляции были постоянными:

- Число событий: 10000
- Оба пучка из протонов
- Энергия в системе центра масс: 10 ГэВ
- Включены все детекторы кроме SVD

2.2 Запуск реконструкции

Реконструкция событий происходит в отдельном скрипте. В данном скрипте запускаются методы, ответственные за генерацию столкновений частиц со всеми включенными детекторами. На выходе скрипта - файл с данными, необходимыми для дальнейшего анализа.

```
-I- <SpdMCEventMaker::Finish>
-I- <SpdBbcMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 113561, failed: 0
-I- <SpdEcalMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 0, failed: 0
-I- <SpdRsMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 449990 failed: 0
-I- <SpdZdcMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 29, failed: 0
-I- <SpdTsmCHitProducer::Finish> [Hits] total: 5692055 failed: 0
-I- <SpdAegMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 186768, failed: 0
-I- <SpdTofMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 76256, failed: 0
-I- <SpdEcalRCMaker::Finish> hits [acc/total]: 0/0, clusters/particles: 0/0
-I- <SpdEcalClusterMCInfoMaker::Finish> clusters (accepted): 0, infos: 0, particles: 0
```

Рисунок 4 — Результаты реконструкции событий

Как можно заметить, реконструкция событий успешно выполнена по всем детекторам, за исключением ECal, где события отсутствуют по пока не установленной причине. Это может быть связано с возможной ошибкой в коде, отвечающем за генерацию событий в этом детекторе.

2.3 Анализ данных

Анализ данных происходит в отдельном скрипте. В данном скрипте происходит извлечение данных из симуляции и реконструкции, а также создаются гистограммы по полученным данным. В итоге были проанализированы данные с моделей детекторов: TOF, AEG, BBC, ZDC, RS.

2.4 Результаты анализа данных

В первую очередь были построены карты попаданий для всех детекторов с целью проверки корректности работы их моделей. Все карты попаданий совпадают с ожидаемыми, кроме карты попаданий RS (см рис. 5-9). Стоит также отметить, что малое число попаданий в ZDC объясняется устройством детектора (туда попадают лишь частицы, летящие под нулевым углом) и относительно небольшим числом событий в симуляции.

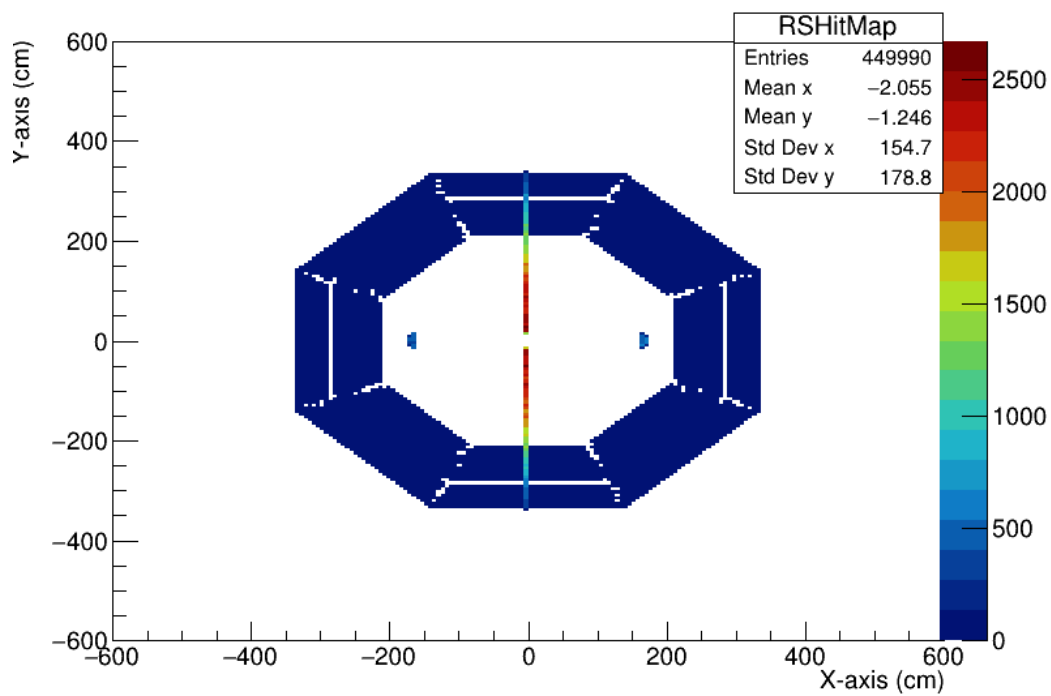


Рисунок 5 — Карта попаданий RS

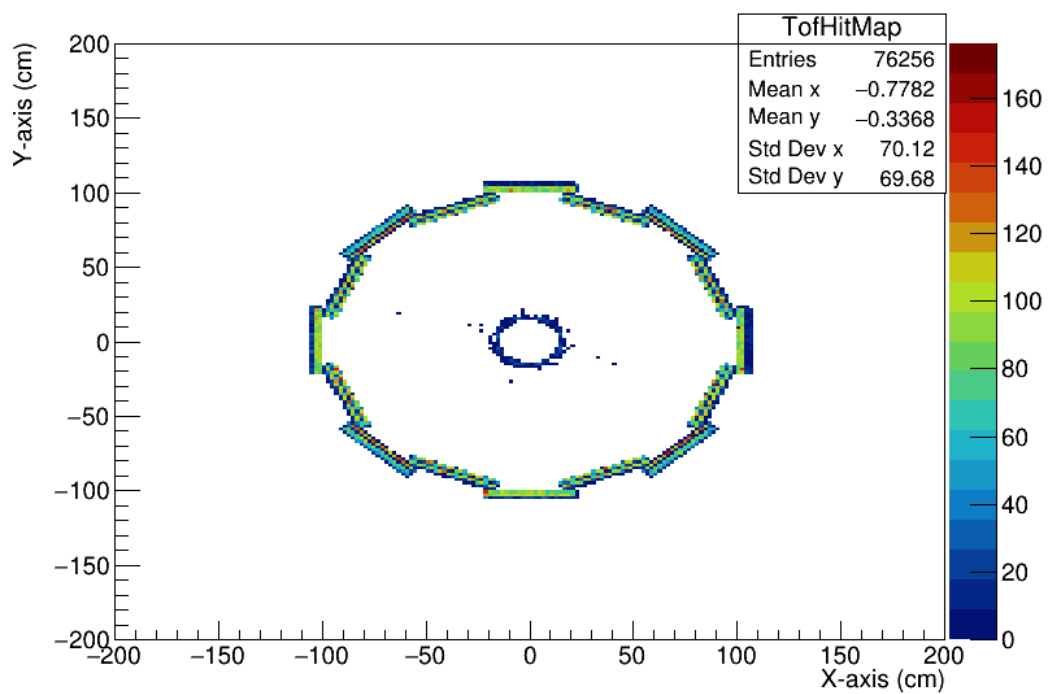


Рисунок 6 — Карта попаданий TOF

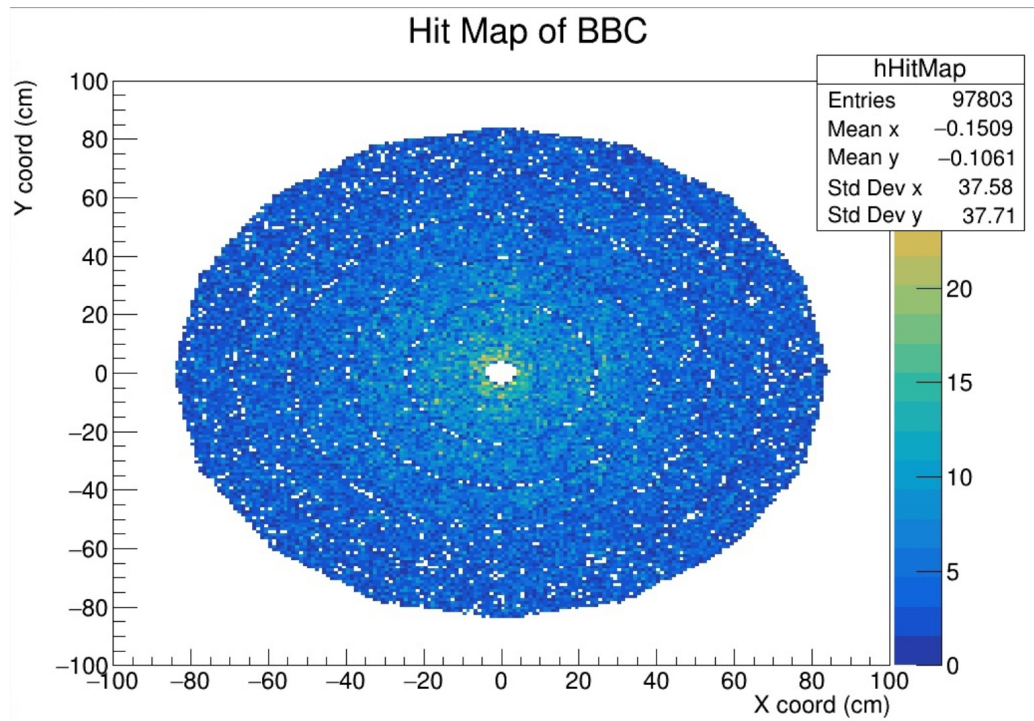


Рисунок 7 — Карта попаданий BBC

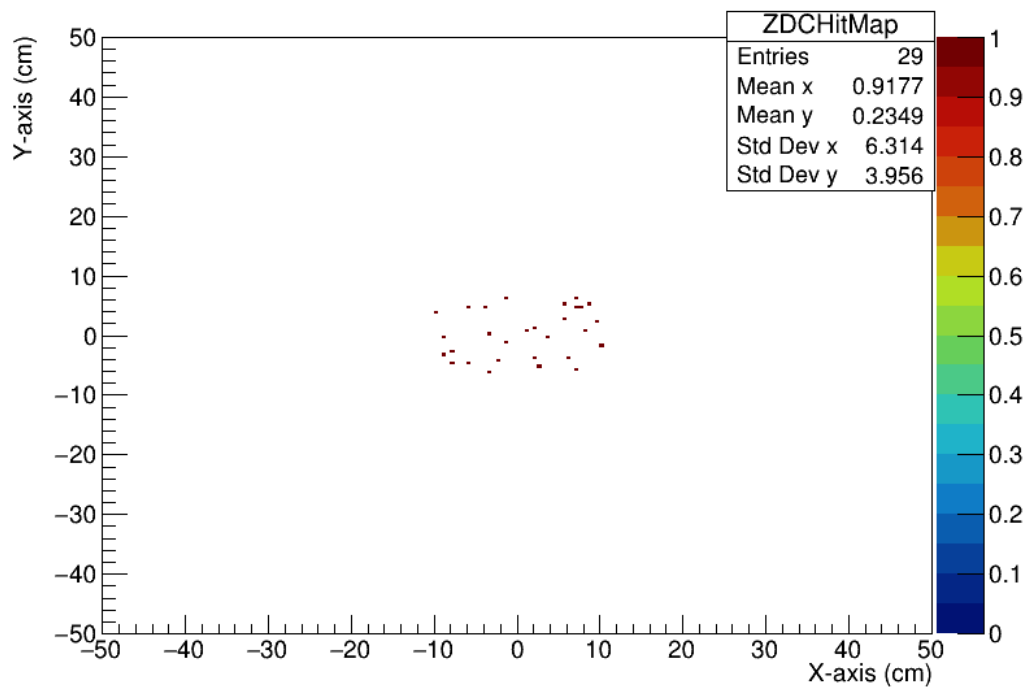


Рисунок 8 — Карта попаданий ZDC

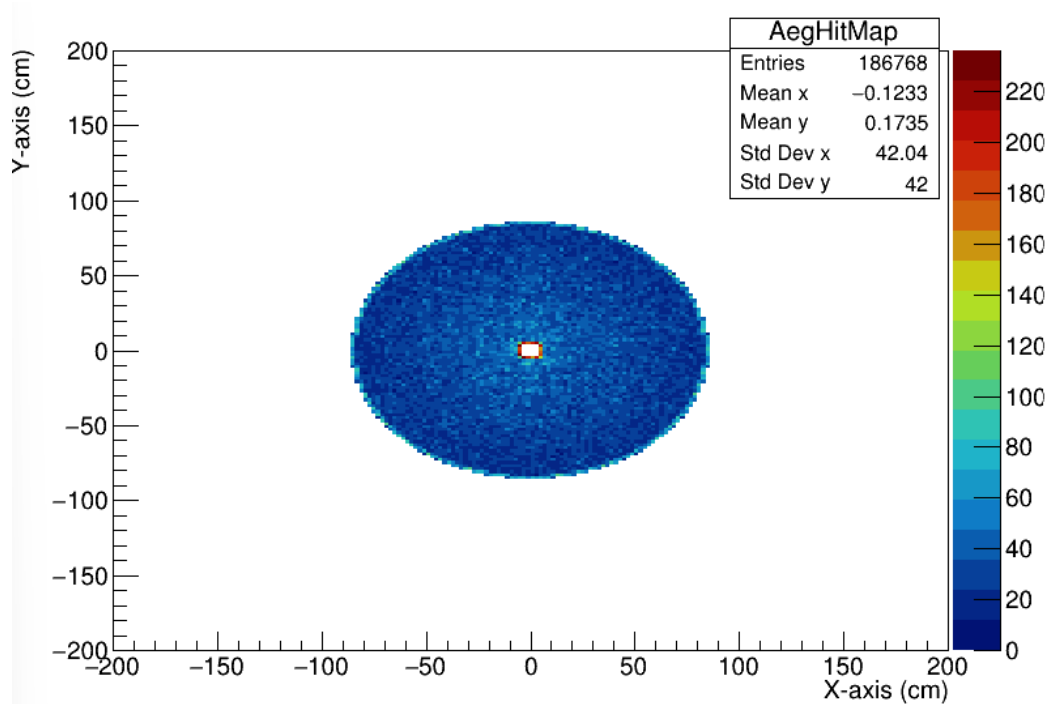


Рисунок 9 — Карта попаданий AEG

Ввиду довольно странной карты попаданий RS для него была построена 3D карта попаданий (рис. 10). Кроме того, была построена 3D карта попаданий для TOF (рис. 11) с целью валидации корректности отображения 3D карт попаданий. В случае TOF карта попаданий совпадает с ожиданиями. В случае же RS непонятно, почему карта попаданий представляет собой тонкий диск с параллелепипедами, хотя должна представлять собой цилиндр. На данный момент предполагаемая причина данной проблемы — некоторый баг в коде, ответственном за реконструкцию, либо в самой модели детектора.

3D RS Hit Map

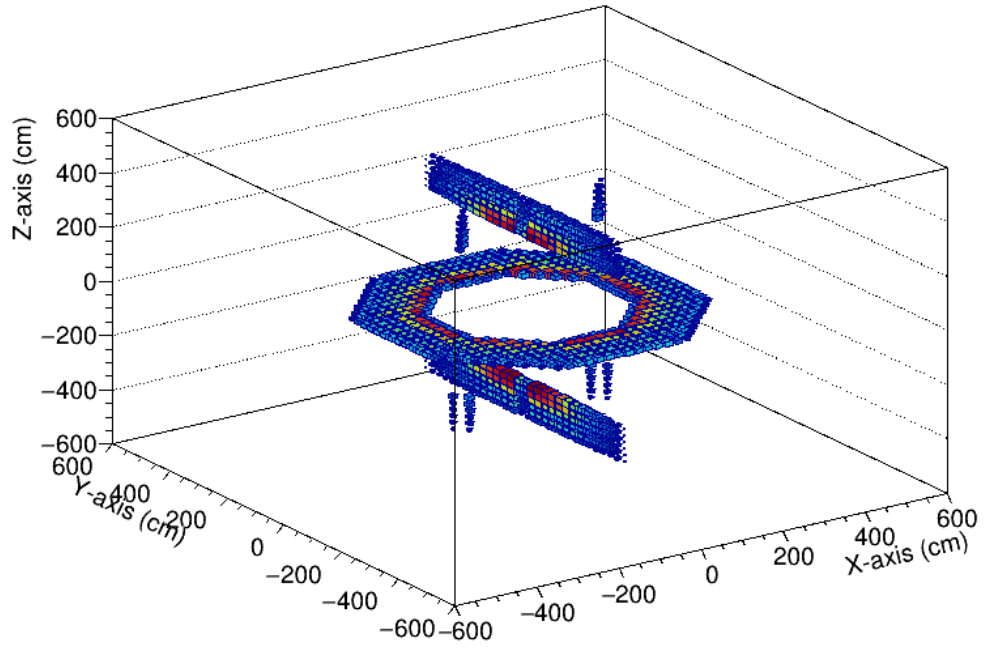


Рисунок 10 — 3D карта попаданий RS

3D ToF Hit Map

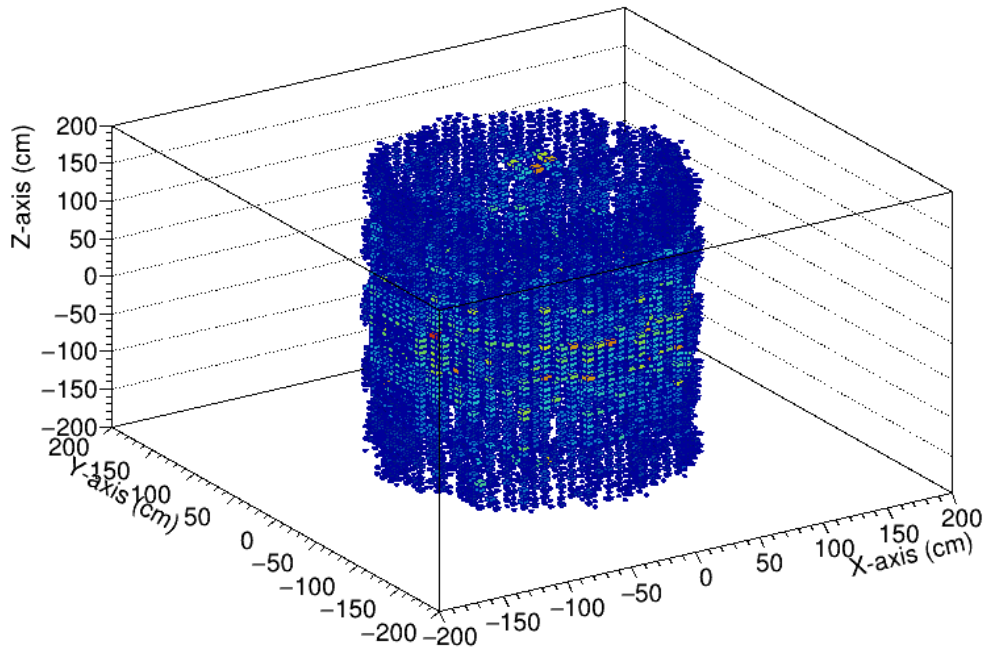


Рисунок 11 — 3D карта попаданий TOF

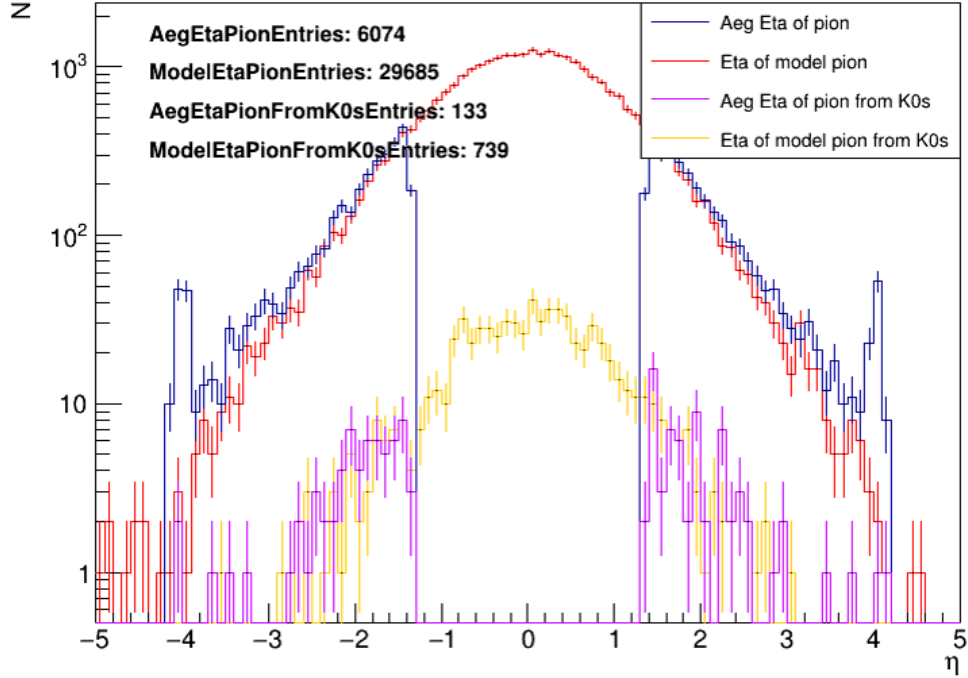


Рисунок 12 — Распределение η в АЕГ

Несмотря на возникшие технические трудности, нам удалось достичь определенных успехов в моделировании распада: были построены графики распределения частиц по псевдобыстроте для различных детекторов (рис. 12-16). Для каждого из детекторов, кроме zdc, были построены гистограммы распределения по Eta попаданий π^+ (синим), всех π^+ из симуляции (красным), попаданий π^+ , имеющих при этом материнскую частицу K_S^0 (фиолетовым), всех π^+ из симуляции, имеющих при этом материнскую частицу K_S^0 (желтым). В целом можно заключить, что графики по η построенные по симуляции и реконструкции совпадают в областях пропускания детекторов в пределах статистической погрешности для детекторов BBC и AEG. Для детектора RS расхождения с ожиданиями уже обсуждались ранее, тем не менее стоит отметить, что пик в Eta=0 как раз таки вызван кольцом, наблюдаемым на карте попаданий. Причина же расхождения для TOF пока не до конца ясна. Можно предположить, что наблюдаемые 8 центральных пиков (рис. 14) связаны с наложением пластин детектора друг на друга - всего по оси z 9 колец пластин, что соответствует 8 областям наложения (рис. 17).

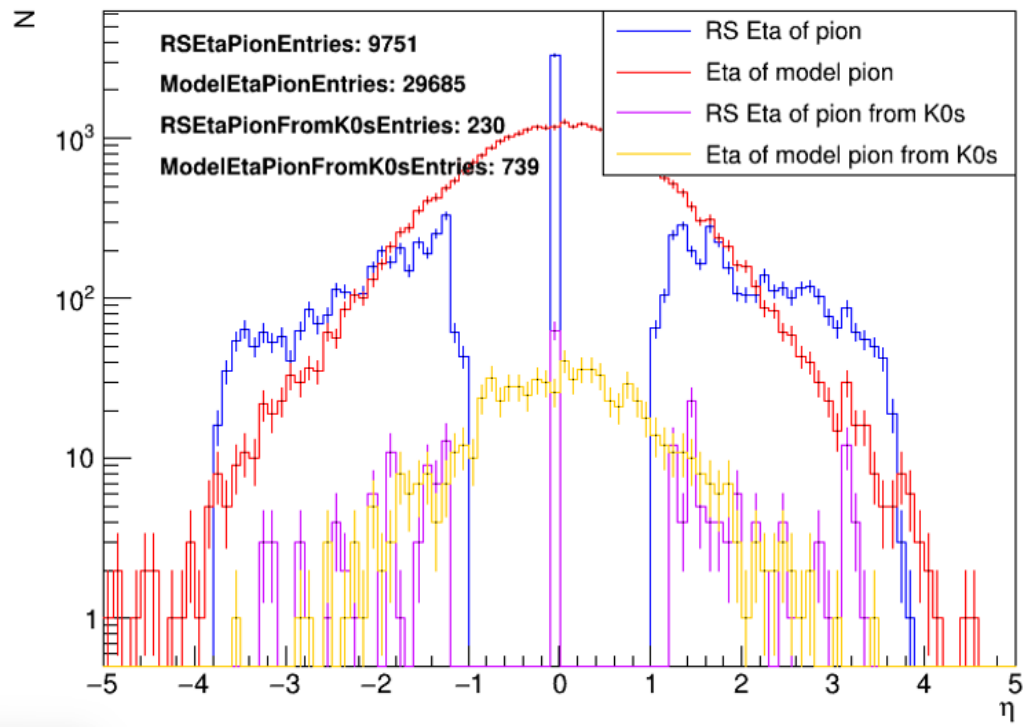


Рисунок 13 — Распределение η в RS

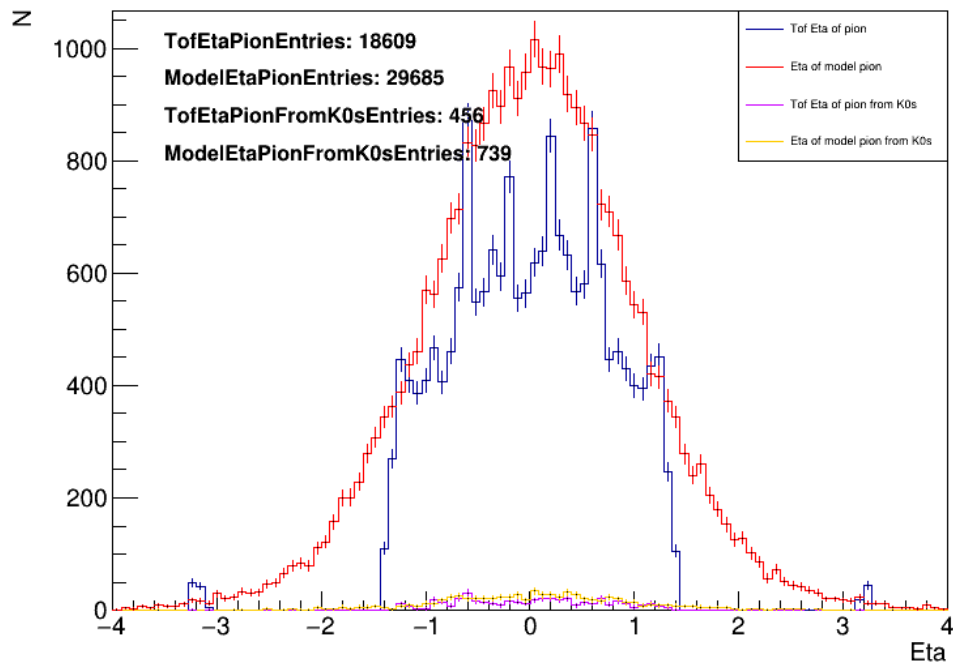


Рисунок 14 — Распределение η в TOF (8 центральных пиков)

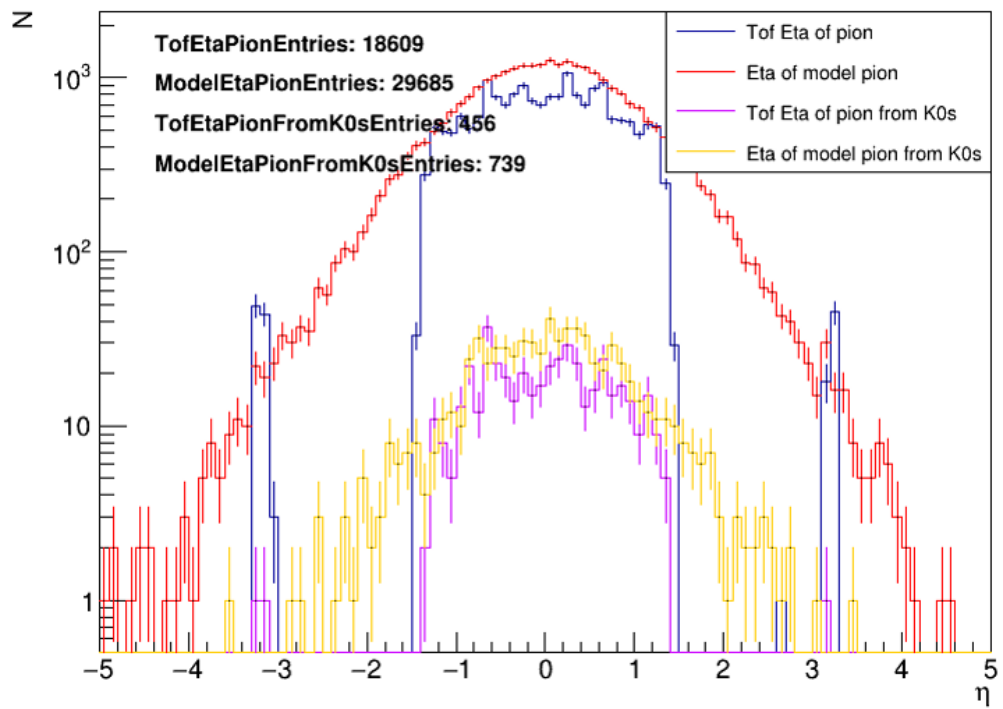


Рисунок 15 — Распределение η в TOF

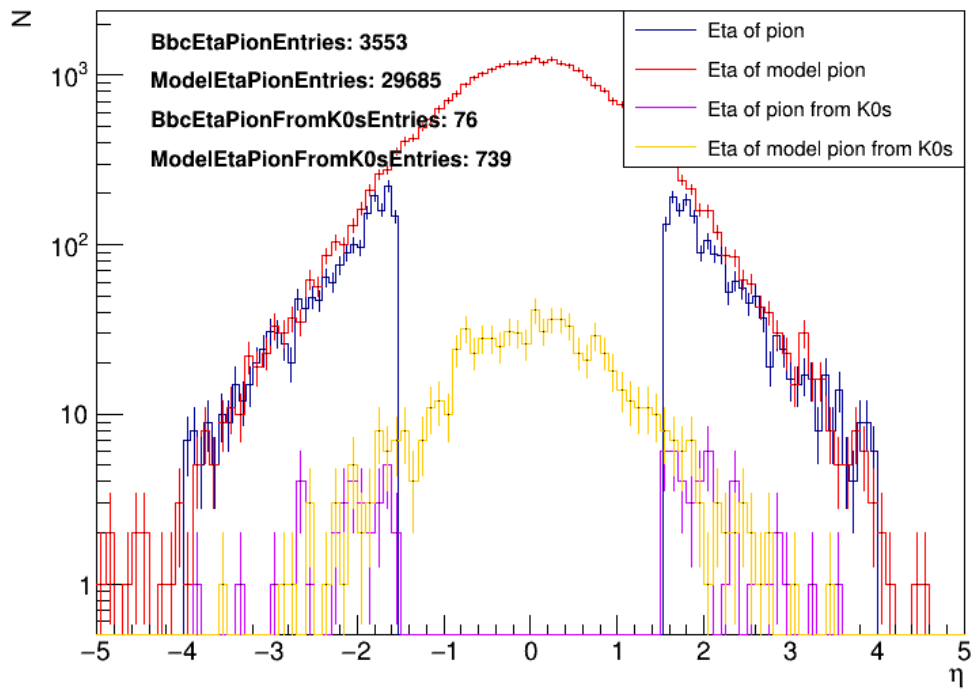


Рисунок 16 — Распределение η в BBC

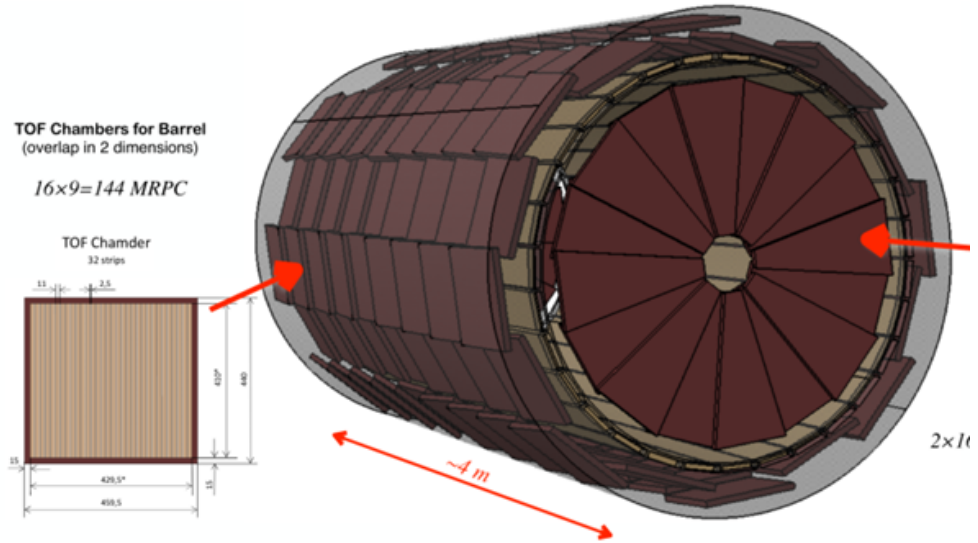


Рисунок 17 — Наслоение пластин детектора - возможная причина пиков на рис. 14

```

Частые материнские частицы для пионов (>100):
Particle name: pi_diffr-, Entries: 485
Particle name: d, Entries: 1556
Particle name: u, Entries: 5961
Particle name: g, Entries: 265
Particle name: rho0, Entries: 2140
Particle name: K_L0, Entries: 172
Particle name: pi+, Entries: 7069
Particle name: rho+, Entries: 2468
Particle name: eta, Entries: 554
Particle name: omega, Entries: 1980
Particle name: K_S0, Entries: 739
Particle name: K+, Entries: 485
Particle name: K*+, Entries: 289
Particle name: neutron, Entries: 364
Particle name: proton, Entries: 863
Particle name: Delta+, Entries: 783
Particle name: Delta++, Entries: 2447

```

Рисунок 18 — Статистика по материнским частицам для π^+

Кроме того, можно заметить, что крайне малая часть попаданий пионов являются дочерними от распада K_S^0 . Так, например, для детектора AEG лишь порядка 2% пионов являются дочерними K_S^0 . Поэтому была собрана статистика по частицам, которые реконструируются, как родительские для пионов (рис. 18). Наиболее частые материнские частицы для π^+ : u -кварк (5961 событий), ρ^+ (2468 событий), Δ^{++} (2447 событий), ρ^0 (2140 событий) и π^+ (7069 событий).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была выполнена симуляция и анализ процесса распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ с использованием программной среды `spdroot`, что позволило протестировать и валидировать основные методы моделирования и реконструкции, используемые для работы с детектором SPD. Основные результаты можно обобщить следующим образом:

1. Симуляция:

- Успешно проведена генерация 10,000 событий с использованием Pythia 8, что подтверждает корректность работы симуляционного модуля.
- Все модели детекторов, из тех, что были протестированы в этой работе, кроме ECal, корректно обработали входные данные, однако выявлена проблема с отсутствием событий в ECal, требующая дальнейшего исследования и отладки.

2. Реконструкция:

- Реконструкция событий произведена для всех задействованных детекторов. Карта попаданий для RS оказалась аномальной (вместо ожидаемого цилиндра наблюдался тонкий диск), что указывает на возможные ошибки в коде реконструкции или модели детектора.

3. Анализ данных:

- Проведены гистограммы распределения частиц по псевдобыстроте (η), которые подтвердили соответствие данных симуляции и реконструкции в рамках областей пропускания детекторов (BBC и AEG).
- Установлено, что лишь около 2% реконструированных π^+ связаны с K_S^0 в качестве материнской частицы. Основная масса реконструированных частиц связана с другими процессами.

4. Технические проблемы:

- Аномалии в RS и отсутствие данных в ECal указывают на необходимость дальнейшей работы по оптимизации моделей детекторов и кода реконструкции.
- Расхождения в TOF требуют дополнительных исследований для выявления их причин. Возможной причиной является наложение пластин детектора.

Выводы: Полученные результаты подтверждают, что среда `spdroot` является эффективным инструментом для моделирования и анализа процессов, связанных с экспериментом SPD. Несмотря на наличие некоторых технических проблем, удалось провести частичный анализ распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. В дальнейшем планируется углубленный анализ этого процесса с использованием моделей детекторов ST и VD, устранение выявленных ошибок и комбинация результатов со всех детекторов.

4. БИБЛИОГРАФИЯ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] V. Abazov и др. «Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA». В: (апр. 2024). arXiv: 2404.08317 [hep-ex].
- [2] V. M. Abazov и др. «Conceptual design of the Spin Physics Detector». В: (январь. 2021). arXiv: 2102.00442 [hep-ex].
- [3] A. Guskov и др. «Probing Gluons with the Future Spin Physics Detector». В: *Physics* 5 (2023), с. 672—687.
- [4] *Spin Physics Detector Project*. URL: <https://spd.jinr.ru/>. (дата обр.: 26.12.2024).