

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  
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ФОТОНОВ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КАЛОРИМЕТРОМ  
ЭКСПЕРИМЕНТА SPD НА УСКОРИТЕЛЕ NICA

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

\_\_\_\_\_ Е. Ю. Солдатов

Студент

\_\_\_\_\_ Г. Е. Петров

Москва 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Теоретическая часть</b>	<b>4</b>
1.1 Цель эксперимента SPD . . . . .	4
1.2 Первая стадия эксперимента . . . . .	4
1.3 Вторая стадия эксперимента . . . . .	5
1.4 Назначение и конструкция электромагнитного калориметра SPD . . . . .	6
<b>2 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ФОТОНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТ- НЫМ КАЛОРИМЕТРОМ</b>	<b>8</b>
2.1 Общая структура кода . . . . .	8
2.2 Первая симуляция и изначальные проблемы с реконструкцией . . . . .	9
2.3 Проверка корректности работы модели калориметра на примере распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ . . . . .	12
2.4 Исследование реконструкции фотонов в распаде $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ . . . . .	15
<b>Заключение</b>	<b>22</b>

# 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. Одним из важных детекторов первой и второй стадии эксперимента является электромагнитный калориметр.

Электромагнитный калориметр (ECal) SPD играет ключевую роль в идентификации фотонов и электронов, измерении их энергии и направления, а также в подавлении фоновых событий, возникающих при распадах нейтральных мезонов. Эффективность реконструкции фотонов напрямую влияет на точность физических измерений, включая регистрацию prompt-фотонов и реконструкцию нейтральных пионов. Поэтому оптимизация алгоритмов реконструкции и изучение характеристик калориметра с помощью моделирования — неотъемлемая часть подготовки к полноценному эксперименту.

Целью настоящей работы является исследование реконструкции фотонов в электромагнитном калориметре SPD. Для выполнения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Запуск и отладка симуляции столкновений пучков частиц 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

Одна из основных целей эксперимента SPD - получение доступа к глюонным функциям распределения, зависящим от поперечного импульса (далее будет использоваться аббревиатура TMD PDFs - Transverse Momentum Dependent Parton Distribution Functions) в протоне и дейтроне [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].

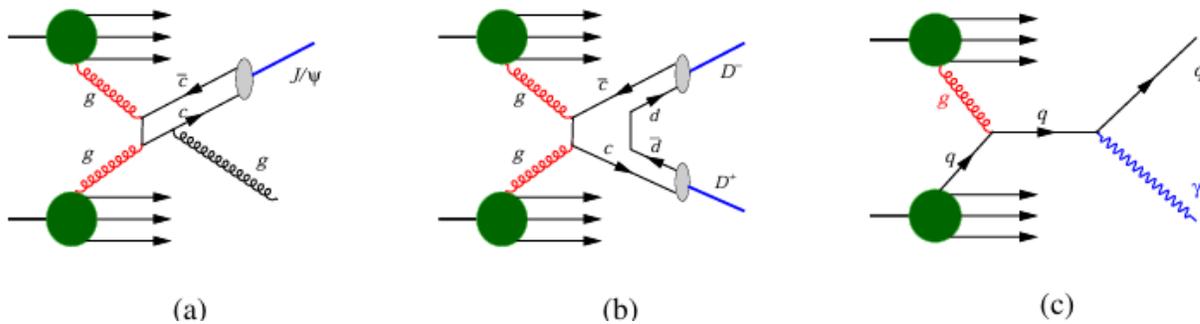


Рисунок 1 — Диаграммы иллюстрирующие реакции: production of (a) charmonium, (b) open charm, and (c) prompt photons

## 1.2 Первая стадия эксперимента

### Цели:

- Начальные измерения по изучению спиновой структуры протонов и глюонных TMD PDFs в процессах с фотонами, заряженными частицами и  $J/\psi$ .
- 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.

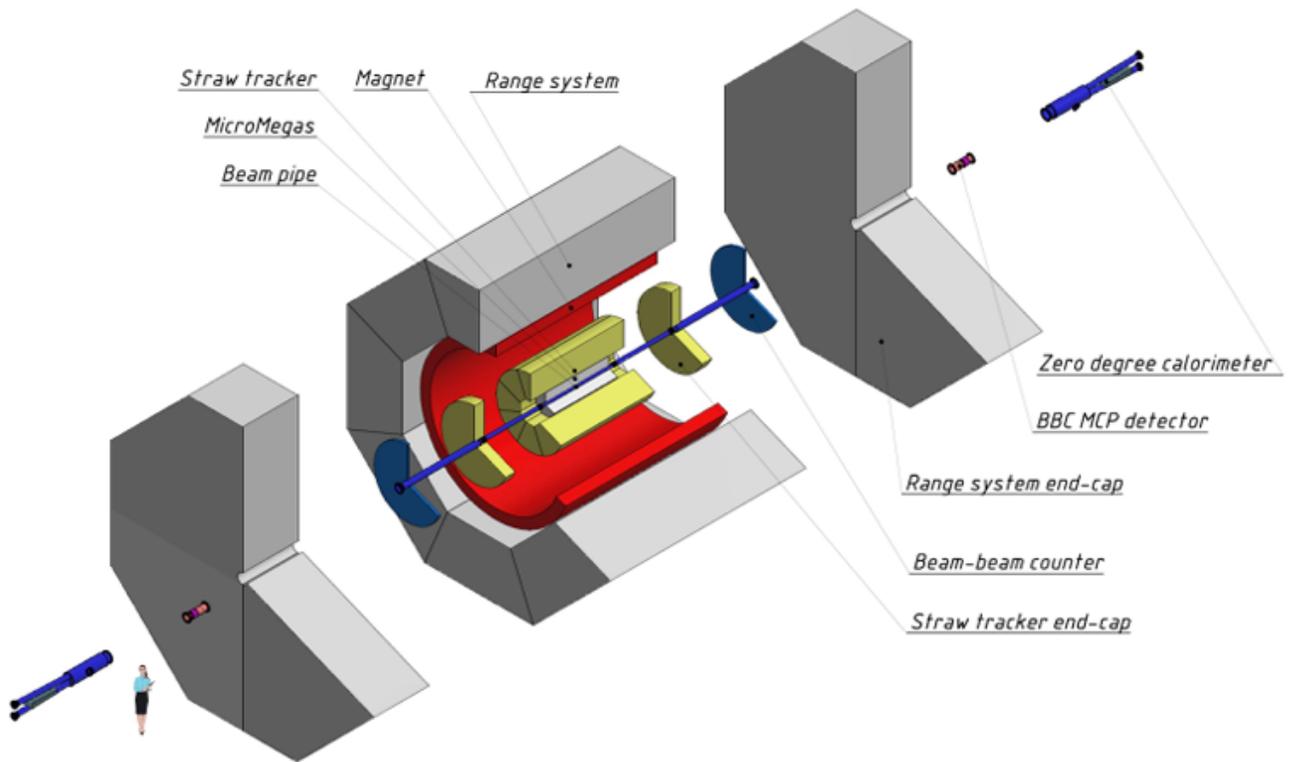


Рисунок 2 — Детекторы первой стадии эксперимента

### 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  $\pi/K$   $K/p$ )
- **FARICH (Aerogel-Based Detector или AEG):** Улучшение идентификации частиц (в частности протонов и каонов).

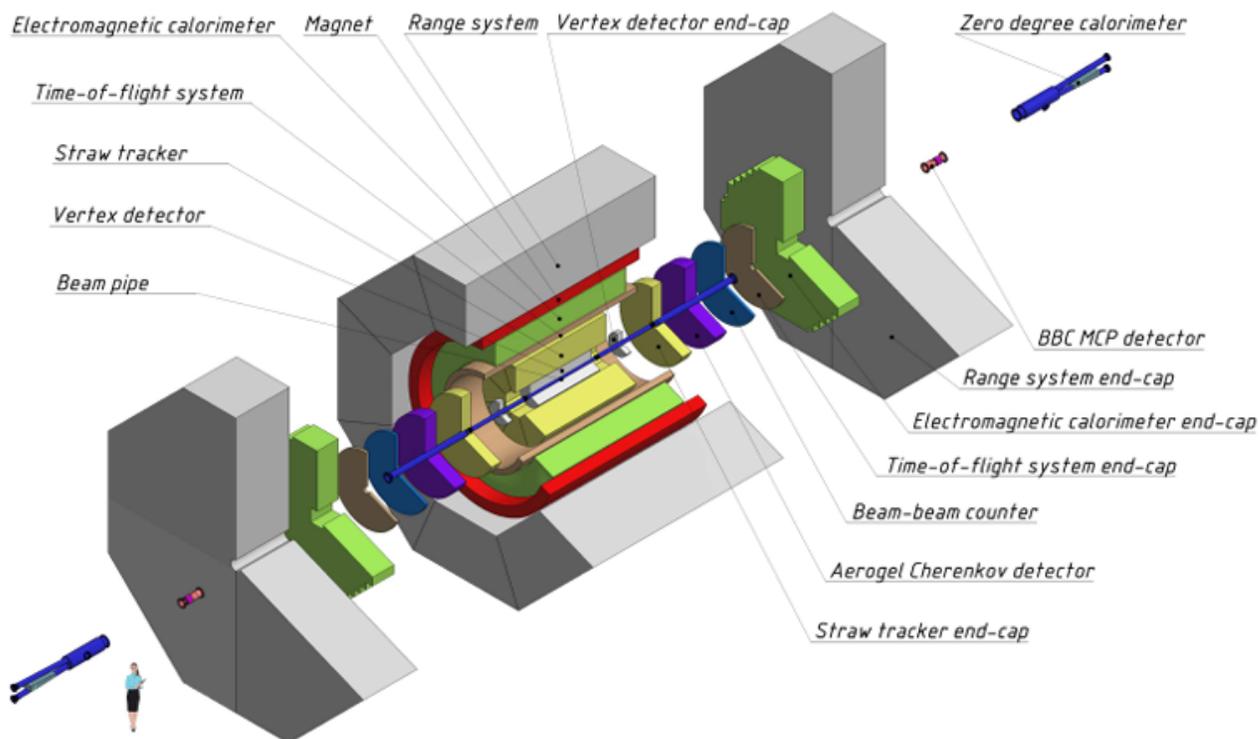


Рисунок 3 — Детекторы второй стадии эксперимента

## 1.4 Назначение и конструкция электромагнитного калориметра SPD

Электромагнитный калориметр (ECal) является одним из ключевых компонентов детектора SPD и предназначен для точного измерения энергии, координат и времени прихода фотонов и электронов, возникающих в результате столкновений частиц. Его значимость обусловлена рядом задач, решаемых в рамках эксперимента SPD, таких как реконструкция нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$ ), подавление фоновых событий при регистрации prompt-фотонов [1].

Конструктивно калориметр представляет собой сэмплирующий детектор, состоящий из чередующихся слоёв свинца (поглотитель) и пластикового сцинтиллятора. Каждый модуль включает 190 двойных слоёв из 1.5 мм сцинтиллятора и 0.5 мм свинца, что обеспечивает суммарную толщину активной части порядка 380 мм. Свет от сцинтилляторов собирается с помощью волокон со сдвигом длины волны (wavelength-shifting fibers,

or WLS) и регистрируется многоэлементными фотодиодами (multi-pixel photon counter, or MPPC) [1]. Общая толщина модуля с учётом конструктивных элементов составляет около 490 мм.

Калориметр разделён на цилиндрическую (баррельную) часть и два торцевых энд-капа, что позволяет покрывать почти полный  $4\pi$  телесный угол: по  $\phi$  от 0 до  $2\pi$ , по  $\eta$  приблизительно от  $-3.2$  до  $3.2$ .

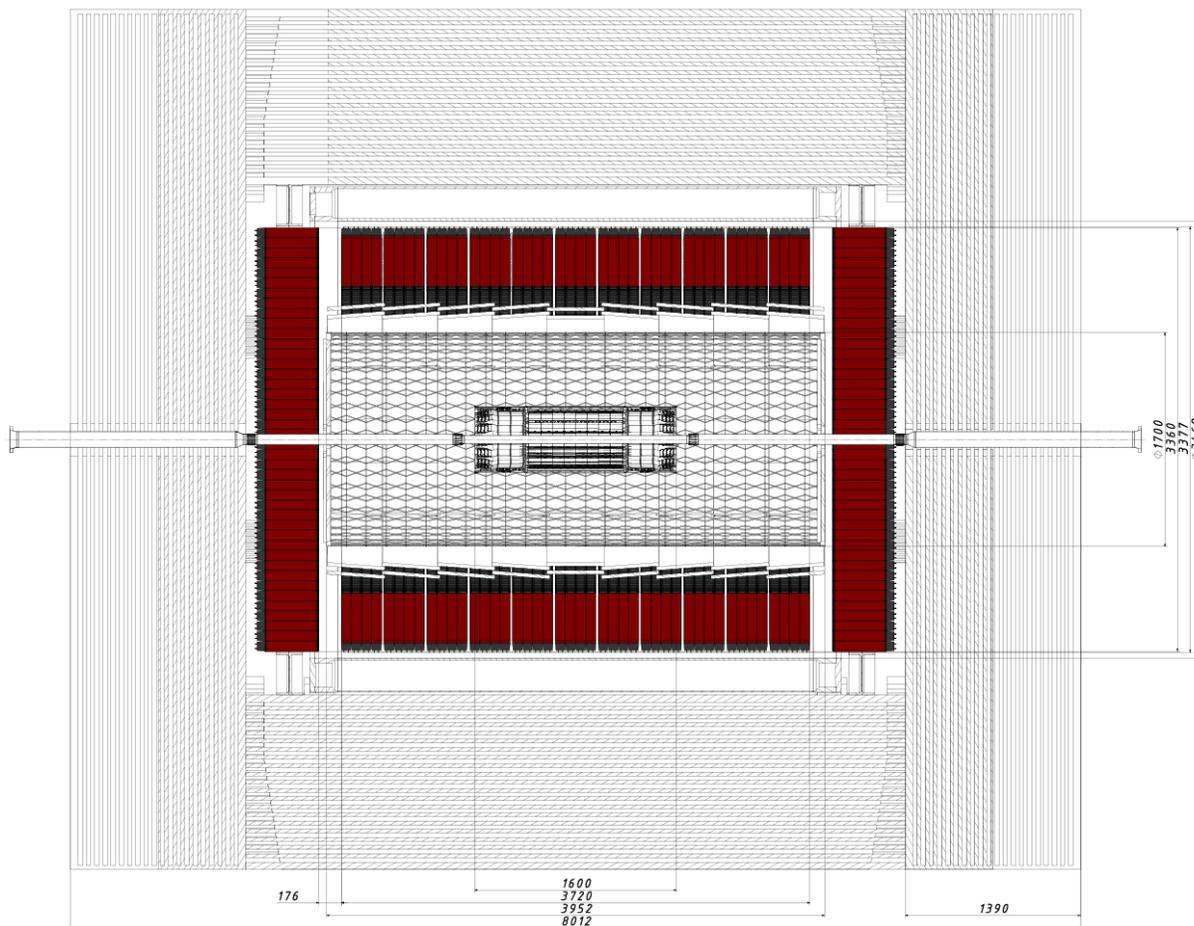


Рисунок 4 — Калориметр, вид сбоку, красным изображены эндкапы и баррельная часть калориметра

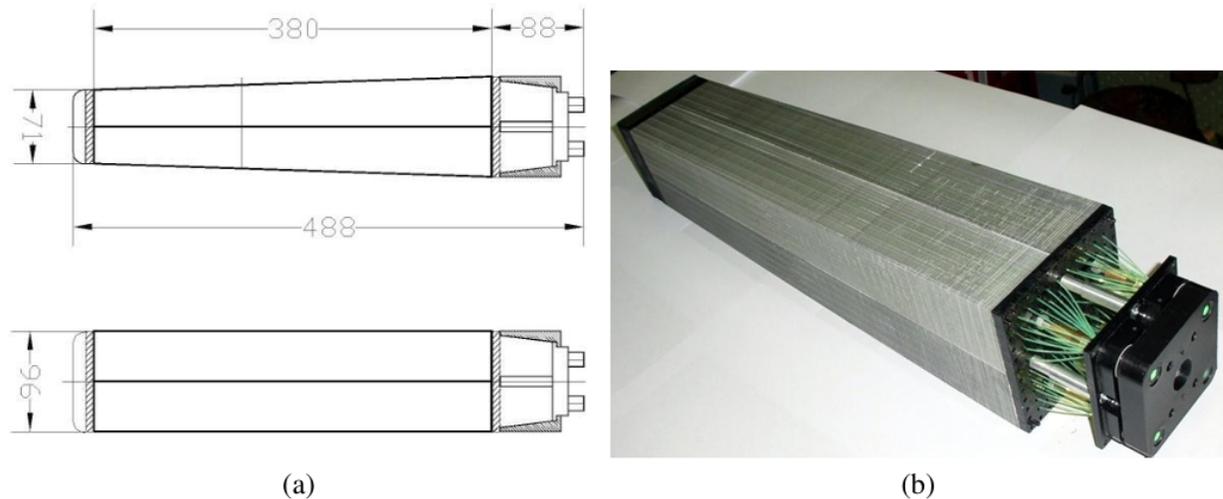


Рисунок 5 — Чертеж отдельного модуля калориметра (a) и фото модуля без внешнего корпуса (b)

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ФОТОНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КАЛОРИМЕТРОМ

### 2.1 Общая структура кода

Код, с которым велась работа напрямую, представляет собой 3 скрипта в среде `spdrroot`:

- Скрипт, отвечающий за симуляцию
- Скрипт, отвечающий за реконструкцию
- Скрипт, отвечающий за анализ данных

В скрипте, ответственном за симуляцию, запускаются методы, ответственные за генерацию событий. События генерируются при помощи `Pythia 8 Generator` или другим генератором, если необходима тонкая настройка параметров пучка. При помощи редактирования кода задаются параметры симуляции, а именно: состав и направление пучков, число событий, энергия частиц и используемые детекторы. На выходе данного скрипта — файлы с данными, необходимыми для дальнейшей реконструкции и анализа.

В скрипте, ответственном за реконструкцию, запускаются методы, ответственные за взаимодействие частиц со всеми включенными детекторами. На выходе скрипта — файл с данными, необходимыми для дальнейшего анализа.

В скрипте, ответственном за анализ данных, происходит извлечение данных из симуляции и реконструкции, обработка данных - фильтрация, заполнение и создание гистограмм.

## 2.2 Первая симуляция и изначальные проблемы с реконструкцией

Параметры первой симуляции:

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

На этапе симуляции не было замечено аномалий, но на реконструкции была замечена проблема.

```
-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 6 — Изначальные результаты реконструкции событий

Как можно заметить, реконструкция прошла успешно для всех детекторов, однако в ECal события отсутствовали, что потребовало дальнейшего анализа.

В результате методического исследования и верификации кода было установлено, что источник проблемы заключается в ошибке инициализации класса калориметра в симуляционном скрипте. После внесения соответствующих исправлений удалось добиться успешной реконструкции событий в ECal. Кроме того, была успешно построена 3D карта попаданий в калориметре. Геометрия детектора соответствует ожиданиям.

```
-I- <SpdTofMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 1281, failed: 0  
-I- <SpdEcalMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 13963, failed: 0  
-I- <SpdRsMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 4527 failed: 0  
-I- <SpdBbcMCHitProducer::Finish> [Hits] total: 992, failed: 0  
-I- <SpdRsMCClusterMaker::Finish> hits: 4527, clusters: 332, particles: 368
```

Рисунок 7 — Проблема с отсутствием событий в калориметре решена

### 3D Ecal Hit Map

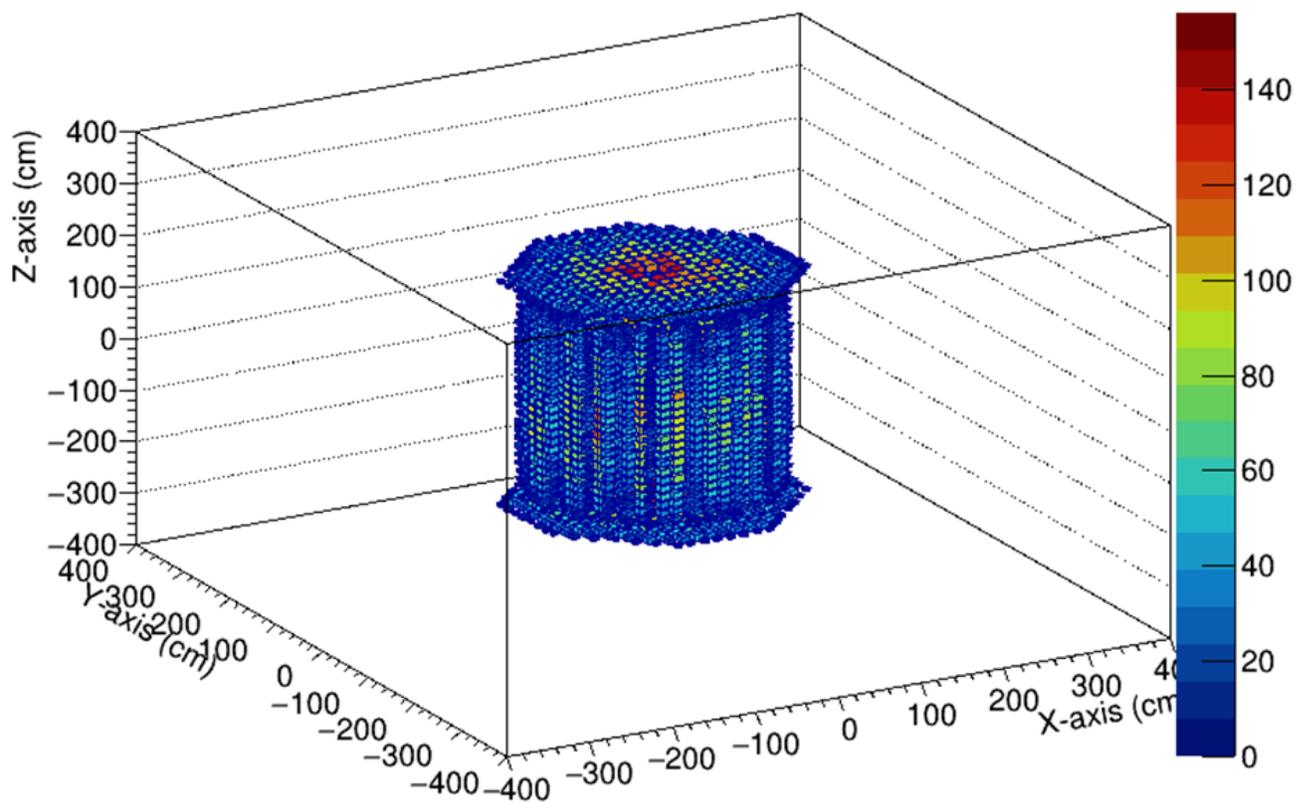


Рисунок 8 — 3D карта попаданий Ecal

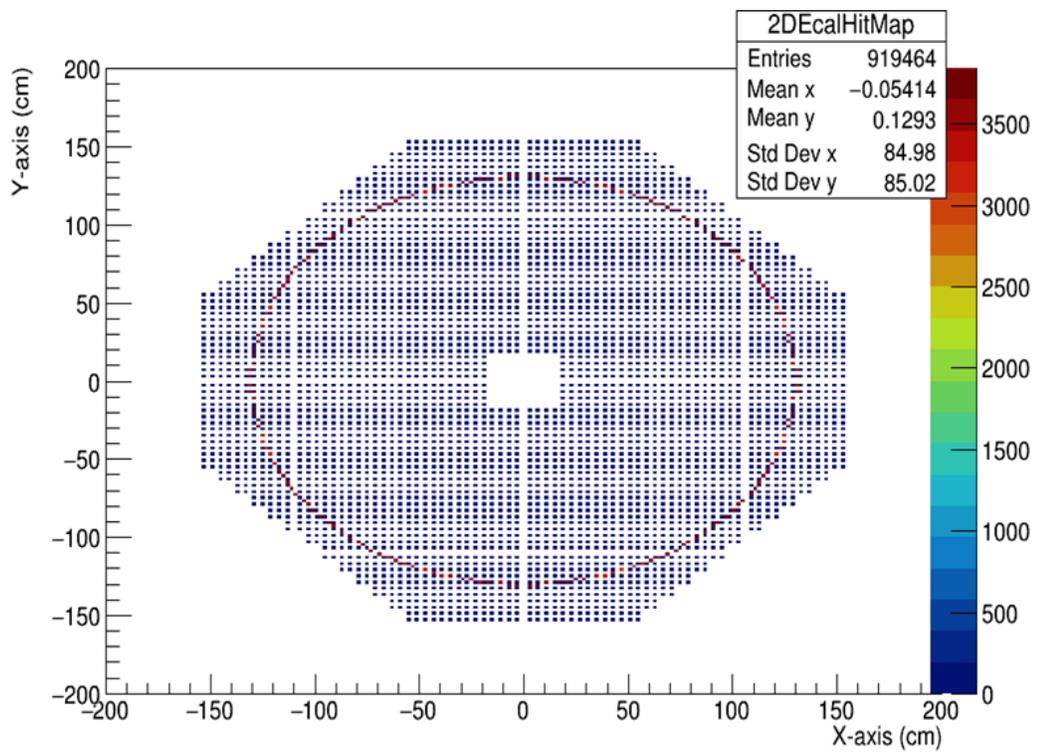


Рисунок 9 — 2D карта попаданий Ecal

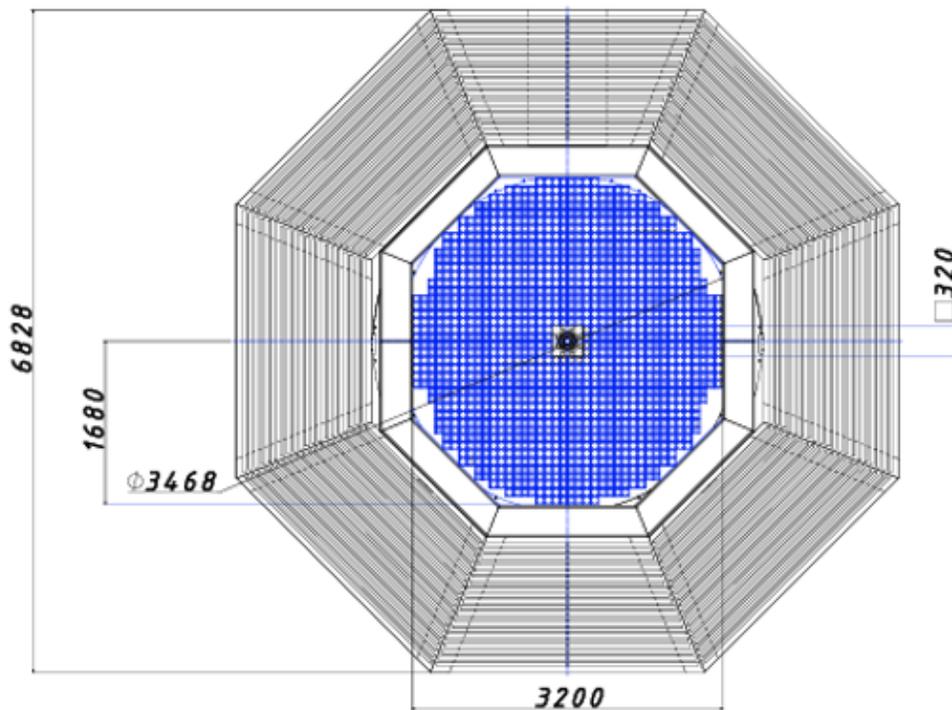


Рисунок 10 — Чертеж эндкапа Ecal, установленного в RS, он состоит из 5136 ячеек

## 2.3 Проверка корректности работы модели калориметра на примере распада $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

Для проверки корректности функционирования калориметра был выбран канал распада  $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ , исследовавшийся в предыдущих работах, что позволило использовать накопленный опыт анализа данной реакции. Параметры симуляции оставлены прежними.

Были построены следующие распределения псевдобыстроты ( $\eta$ ):

- распределение зарегистрированных детектором  $\pi^+$ -мезонов (синяя гистограмма)
- распределение всех  $\pi^+$ -мезонов из симуляции (красная гистограмма)
- распределение зарегистрированных  $\pi^+$ -мезонов с материнской частицей  $K_S^0$  (фиолетовая гистограмма)
- распределение всех  $\pi^+$ -мезонов с материнской частицей  $K_S^0$  из симуляции (желтая гистограмма)

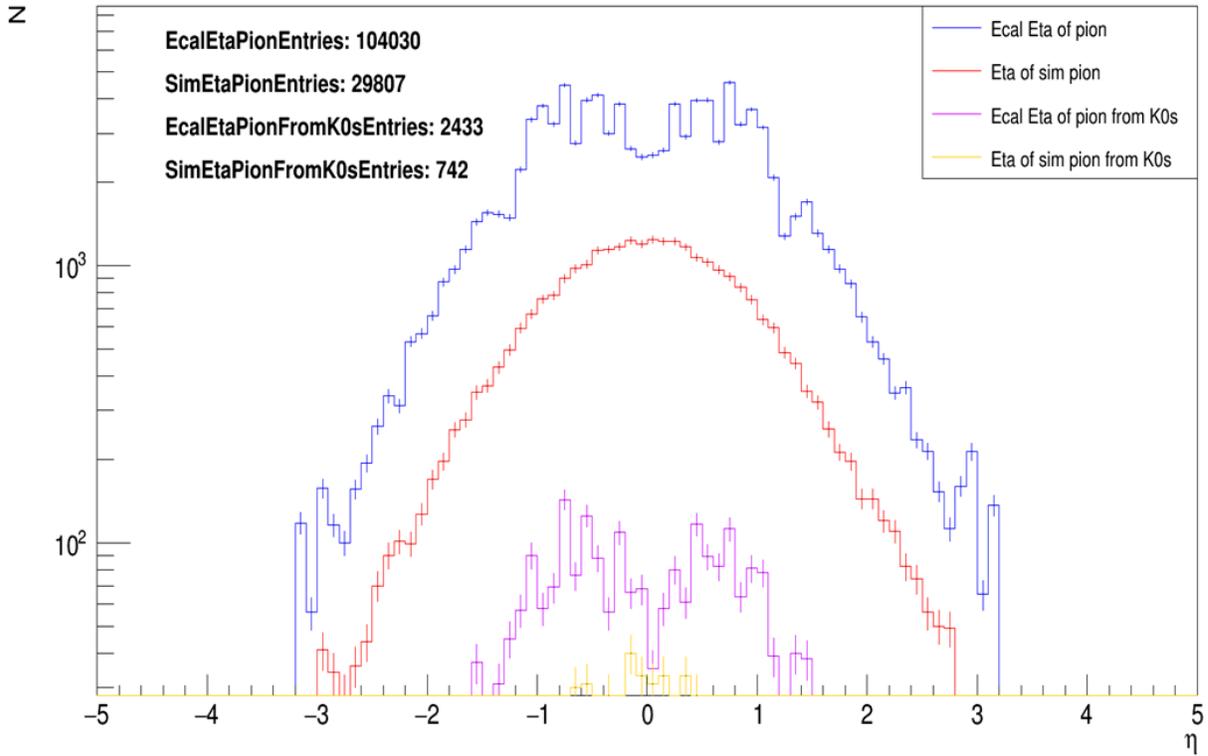


Рисунок 11 — Распределение по  $\eta$  для  $\pi^+$  без отборов

Результаты сравнительного анализа показали существенное расхождение: количество реконструированных  $\pi^+$  мезонов превышало число  $\pi^+$  в модели приблизительно в 3 раза. (рис. 9)

Для выявления источника данного эффекта была проведена верификация уникальных идентификаторов частиц. В ходе исследования обнаружено, что значительная доля

хитов демонстрирует следующую аномалию: многим хитам соответствует частица с идентичным ID.

Для устранения данного эффекта был разработан алгоритм фильтрации, реализующий следующий критерий селекции:

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\theta)^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где:

- $\Delta\phi$  – разность азимутальных углов,
- $\Delta\theta$  – разность полярных углов.

Алгоритм осуществляет выбор оптимального хита для каждой частицы, минимизируя приведённую метрику  $\Delta R$ .

После фильтрации оказалось, что всего отфильтровано порядка 450 000 из 1 360 000 частиц (рис. 10).

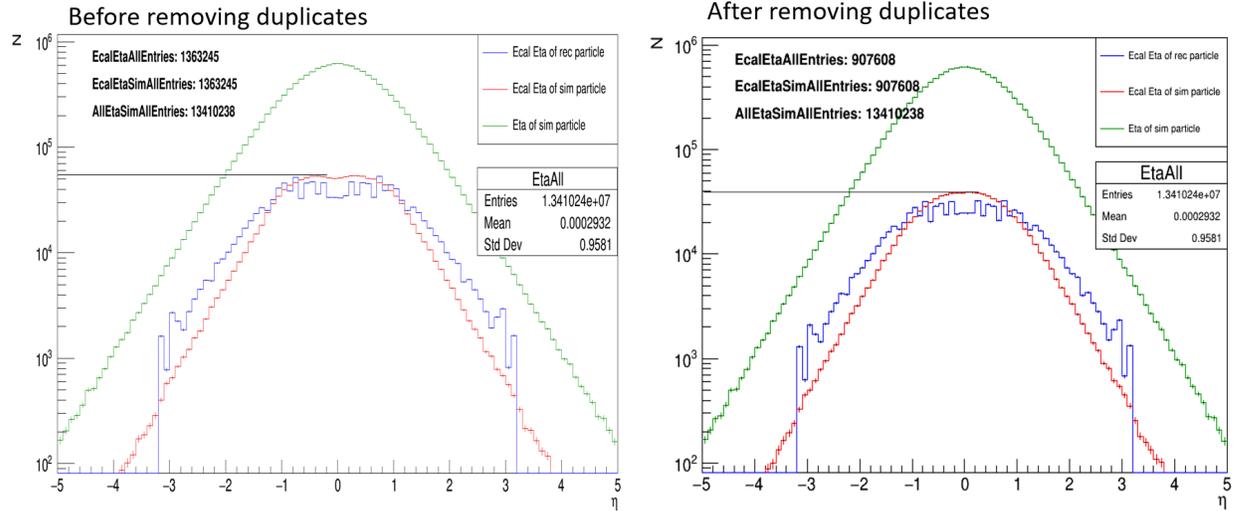


Рисунок 12 — Распределение по  $\eta$  для всех частиц до (слева) и после фильтрации (справа)

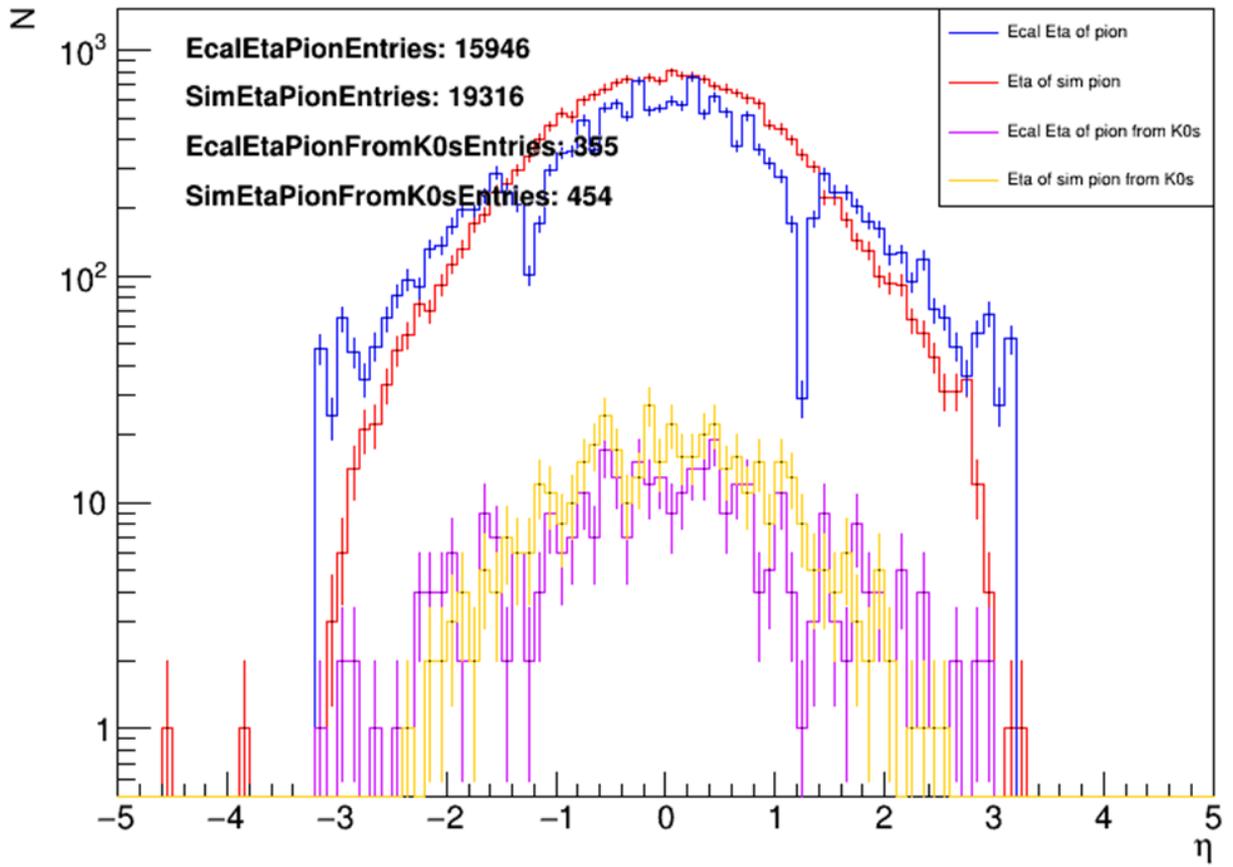


Рисунок 13 — Распределение по  $\eta$  для  $\pi^+$  после фильтрации

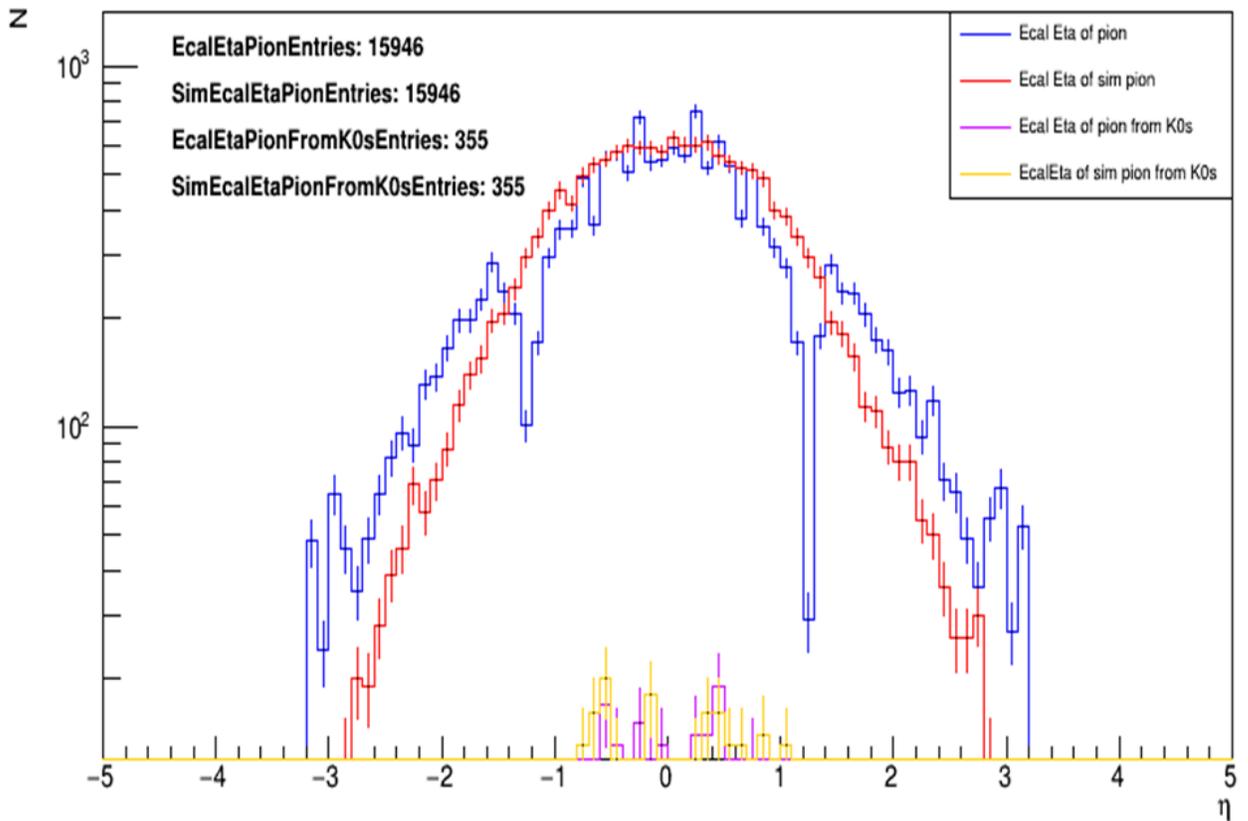


Рисунок 14 — Распределение по  $\eta$  для  $\pi^+$  после фильтрации и с сопоставлением между хитом и mc-частицей

Кроме фильтрации дубликатов была включена фильтрация видимых частиц (у частиц в коде есть тэг *”visible”*, что в соответствии с комментариями в коде значит, что она была задетектирована). В итоге по  $\eta$  для  $\pi^+$  получилась более правдоподобная картина, хотя тем не менее в реконструкции присутствуют провалы на -1.2 и 1.2, которых нет на симуляции (рис. 11 и 12). Провалы могут соответствовать местам стыка эндкапов и барреля calorimetра, которые располагаются на тех же  $\eta$ .

## 2.4 Исследование реконструкции фотонов в распаде $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

Параметры симуляции:

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

Для данной реакции были построены распределения по  $\eta$  и энергии. Цвета гистограмм имеют тот же смысл:

- распределение зарегистрированных детектором  $\gamma$  (синяя гистограмма)
- распределение всех  $\gamma$  из симуляции (красная гистограмма)
- распределение зарегистрированных  $\gamma$  с материнской частицей  $\pi^0$  (фиолетовая гистограмма)
- распределение всех  $\gamma$  с материнской частицей  $\pi^0$  из симуляции (желтая гистограмма)

Кроме упомянутого ранее фильтра дубликатов работает фильтр по eta от -3.2 до 3.2, что соответствует области пропускания детектора. Стоит также отметить, что все реконструированные фотоны не имели тэга "visible". Поэтому данный фильтр был отключен.

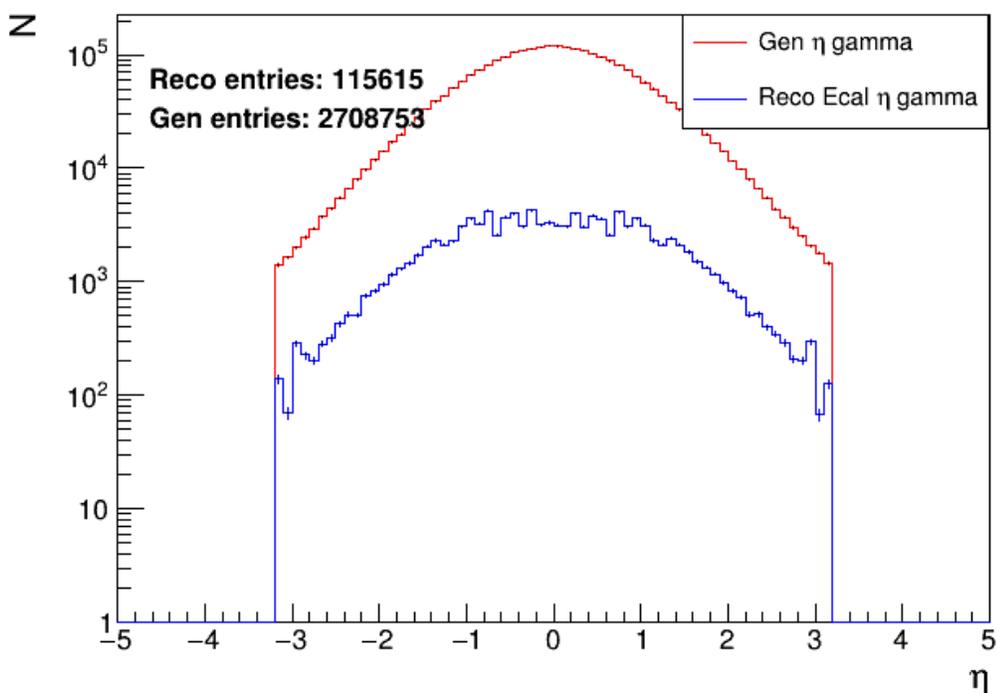


Рисунок 15 — Распределения по  $\eta$  и энергии для  $\gamma$  после фильтрации

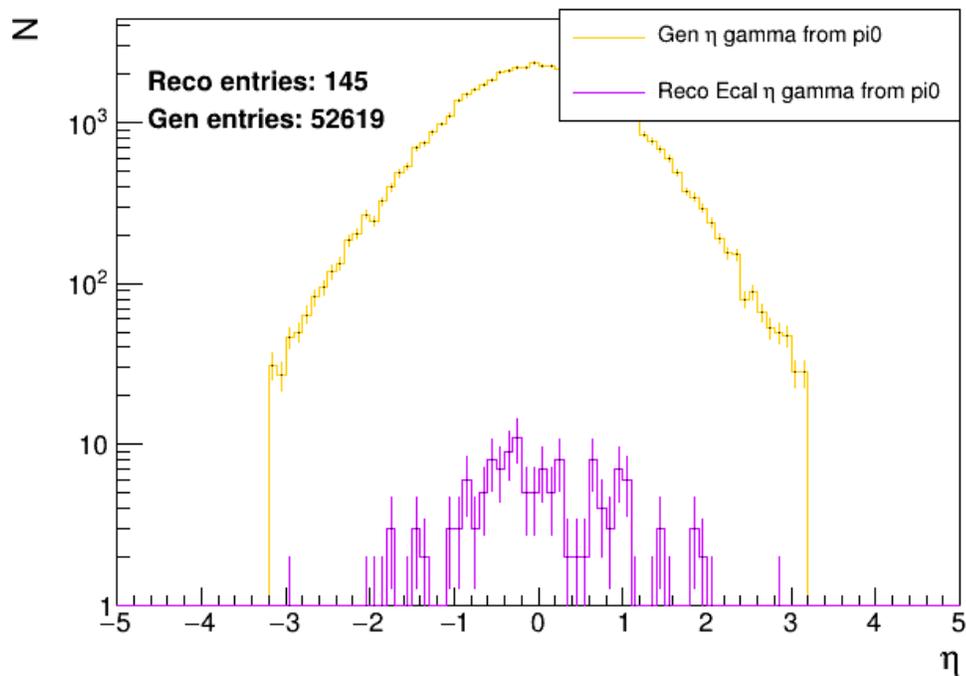


Рисунок 16 — Распределения по  $\eta$  и энергии для  $\gamma$  от  $\pi^0$  после фильтрации

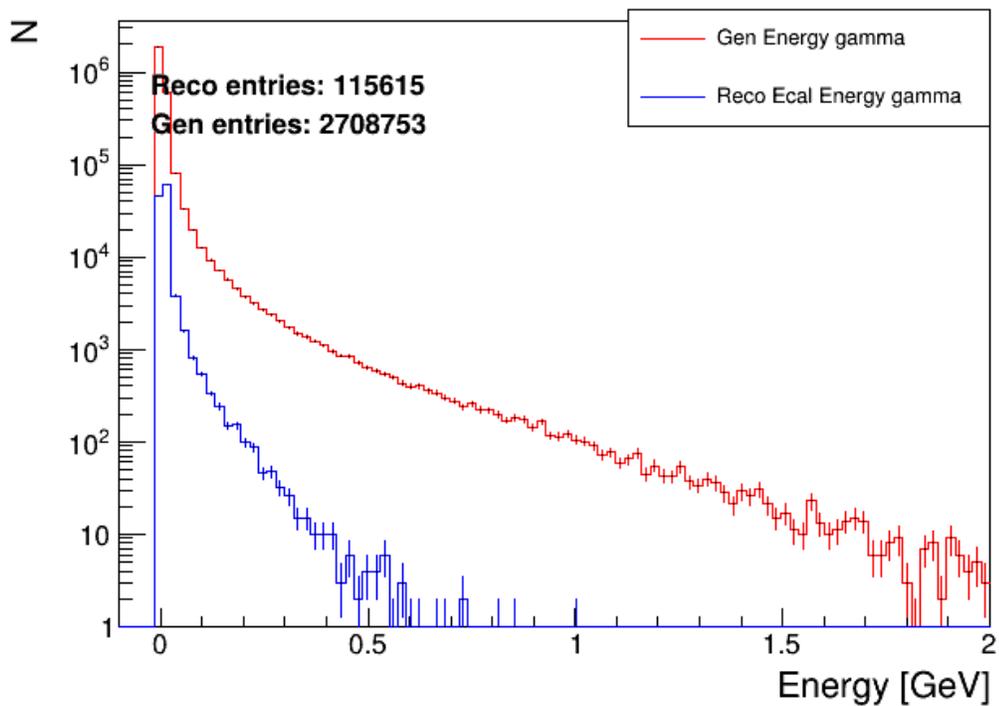


Рисунок 17 — Распределения по энергии для  $\gamma$  после фильтрации

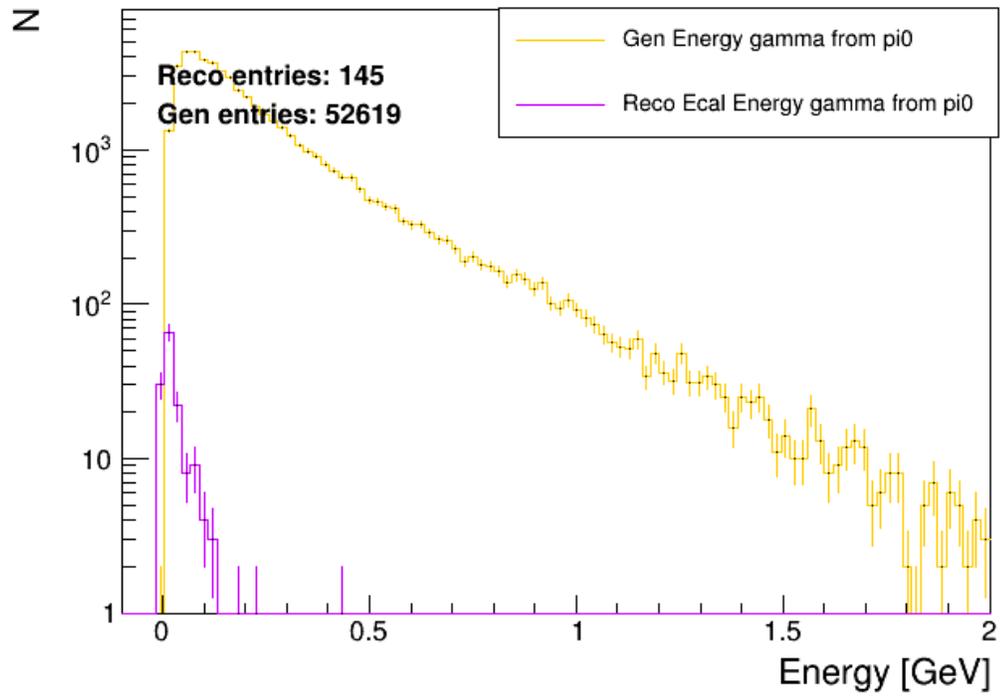


Рисунок 18 — Распределения по энергии для  $\gamma$  от  $\pi^0$  после фильтрации

Число же отфильтрованных событий (дубликатов) в случае  $\gamma$ , оказалось значительно меньше, чем в случае с  $\pi^+$ : 4 из 116000 хитов. (рис. 13)

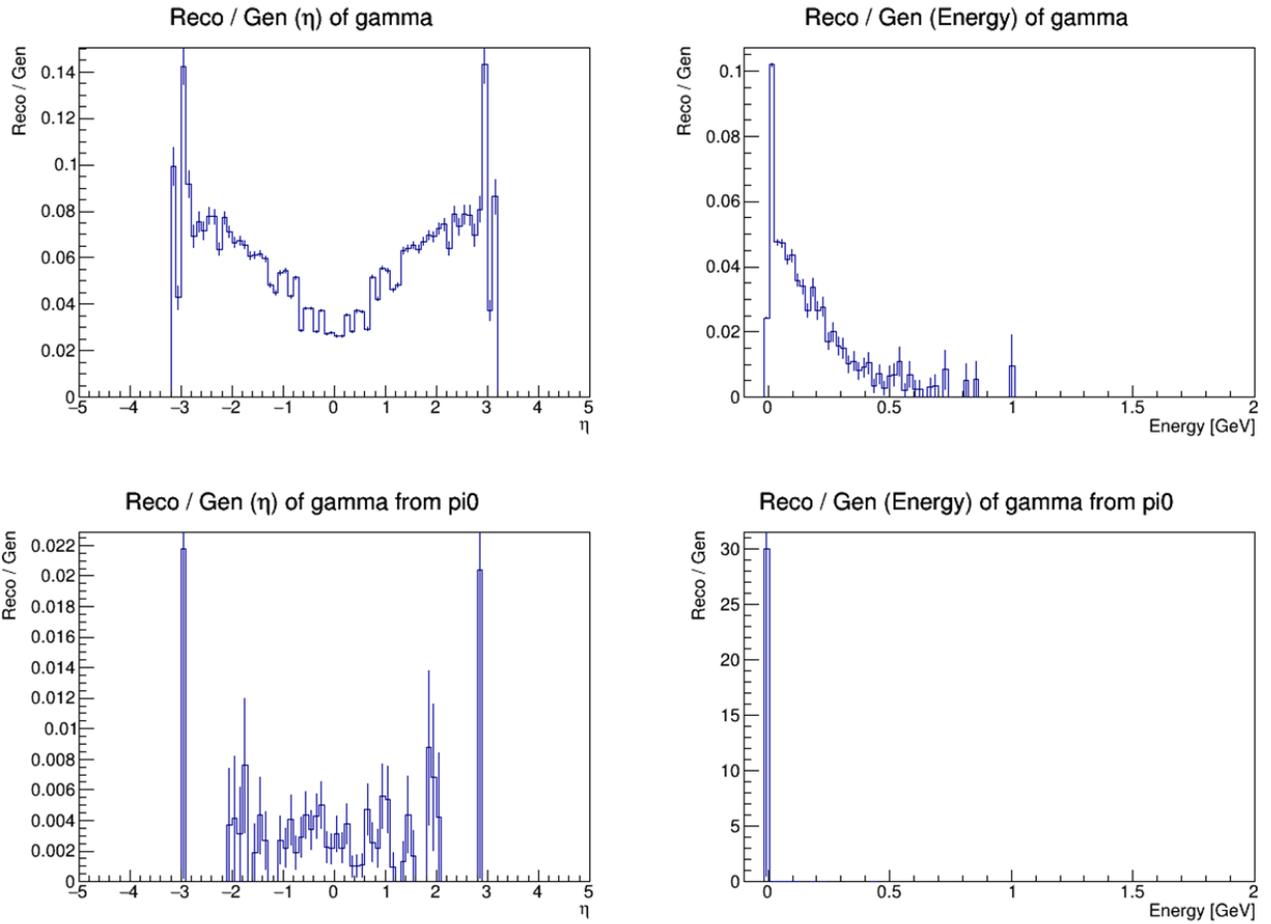


Рисунок 19 — Reco/gen распределения для  $\eta$  и энергии для  $\gamma$  после фильтрации

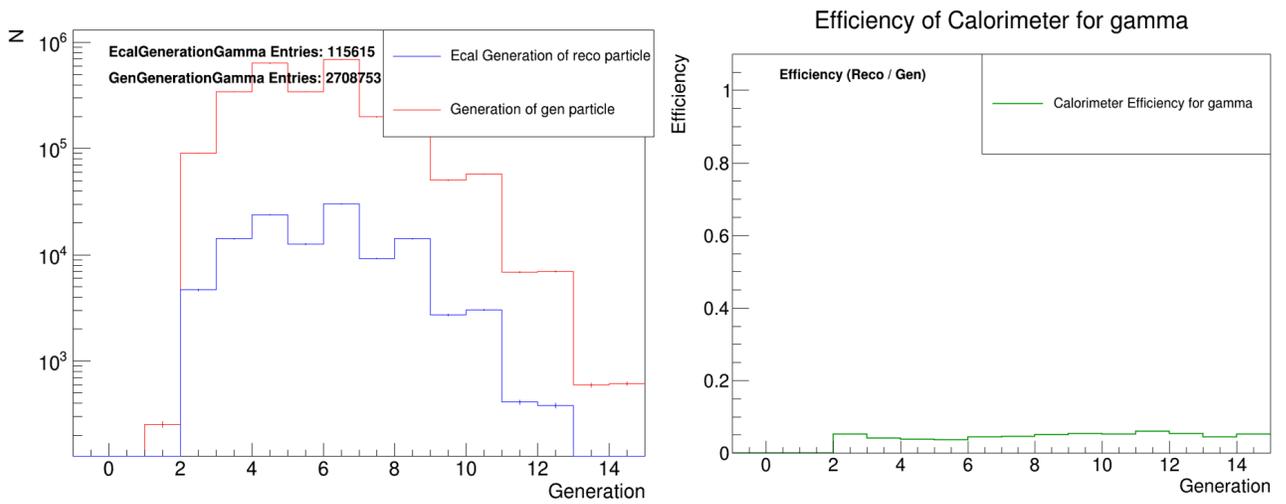


Рисунок 20 — Reco, gen и их отношение по поколениям для  $\gamma$  после фильтрации

Первоначальная оценка эффективности реконструкции, полученная делением гистограмм, дала среднее значение  $\sim 0.05$  (рис. 17 и 18), что существенно ниже ожидаемого ( $> 0.9$ ). Последующий анализ выявил некорректность данной методики расчета.

Для верификации результатов была выполнена контрольная симуляция с параметрами:

- Число событий: 10000
- Один пучок  $\gamma$  из 1 частицы вдоль  $Oz$  (направлена вверх на рис 4)
- Энергия: 1 ГэВ
- Включен только электромагнитный калориметр

Включена фильтрация по  $\eta$  и фильтрация дубликатов. Получены следующие результаты:

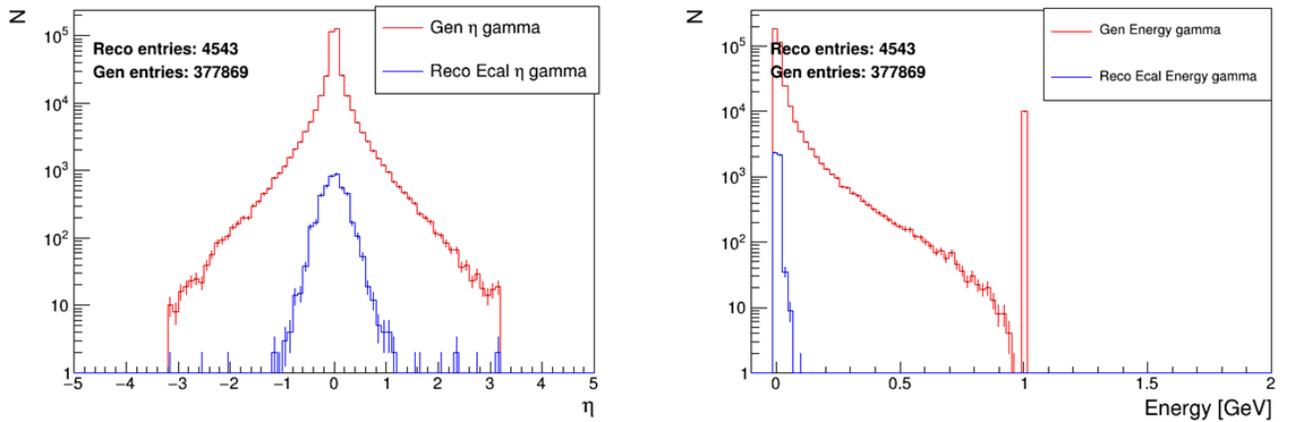


Рисунок 21 — Распределения по  $\eta$  (слева) и энергии (справа) для  $\gamma$  после фильтрации

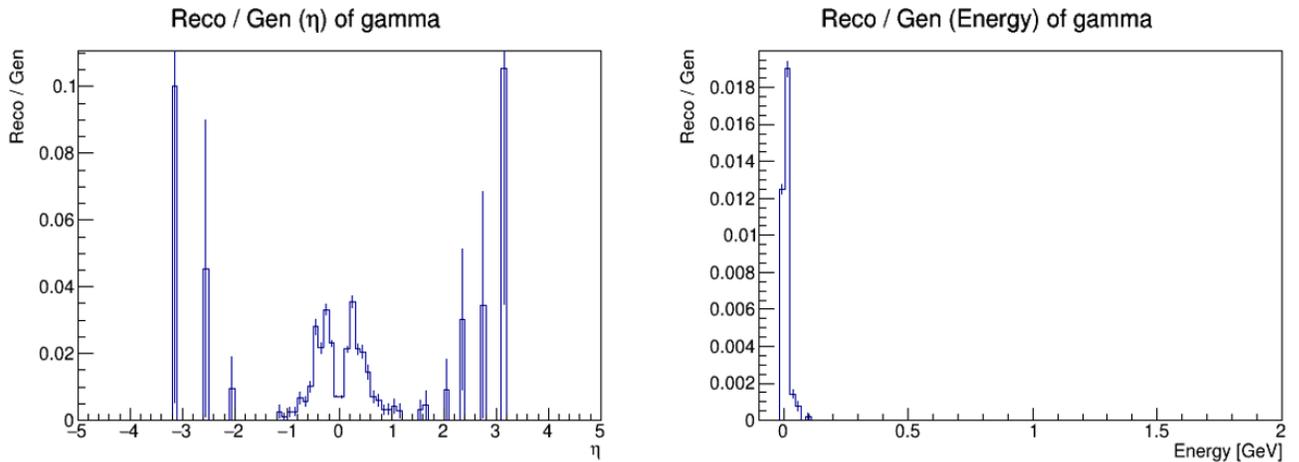


Рисунок 22 —  $\text{Reco}/\text{gen}$  распределения для  $\eta$  и энергии для  $\gamma$  после фильтрации

Анализ распределений выявил наличие пика при 1 ГэВ ровно на 10000 событий, соответствующего первичным частицам пучка (рис. 19). Это свидетельствует о том, что

в выходные данные записываются как частицы пучка, так и частицы из ливня, ему соответствующего, что делает некорректной интерпретацию отношения  $Reco/Gen$  как меры эффективности реконструкции.

В связи с вышеуказанными трудностями была применена альтернативная методика оценки эффективности калориметра. Для каждого события вычислялось суммарное энерговыделение в калориметре по всем зарегистрированным частицам. Полученное значение интерпретировалось как реконструированная энергия частицы. В качестве генерируемых частиц в симуляции рассматривались частицы первого поколения с энергией 1 ГэВ. Результаты анализа представлены в виде гистограмм:

## Gen vs Reco Energy for Gamma

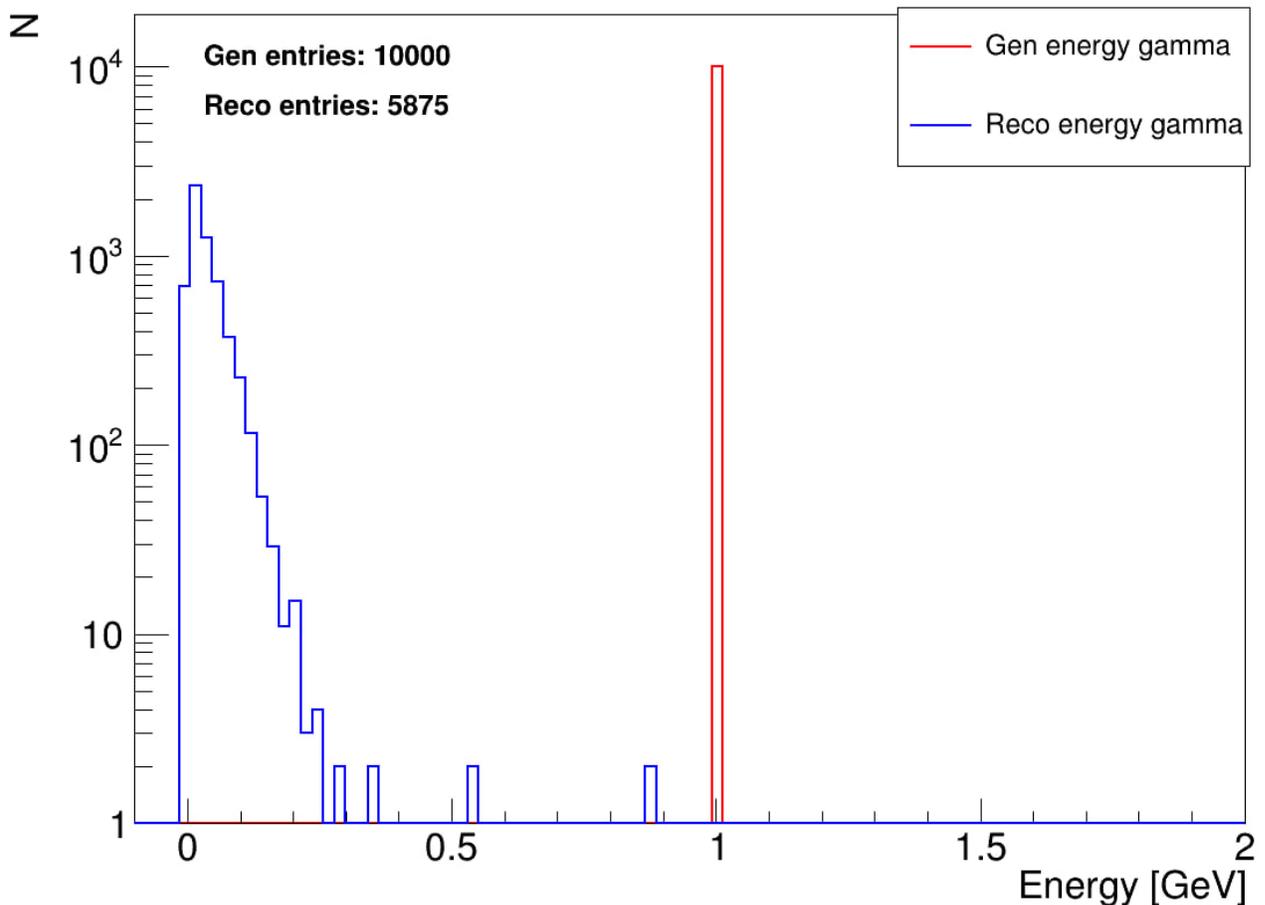


Рисунок 23 — Распределения реконструированной (Reco) и истинной (Gen) энергии для фотонов после суммирования энерговыделений в калориметре

Если определить эффективность как отношение числа частиц, для которых зарегистрировано ненулевое энерговыделение, к общему числу частиц, то полученное значение составляет порядка 0.59. Хотя этот результат всё ещё ниже ожидаемого, он представляется более реалистичным по сравнению с предыдущими оценками. Таким образом, можно заключить, что для получения достоверной оценки эффективности необходима дополнительная работа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проведены симуляции и анализ реконструкции фотонов в электромагнитном калориметре (ECal) эксперимента SPD на коллайдере NICA. Основной целью было изучение корректности работы алгоритмов реконструкции, выявление и устранение возможных проблем, а также получение первичных количественных характеристик реконструкции фотонов и других частиц.

В ходе исследования удалось достичь следующих результатов:

- Устранена критическая ошибка в инициализации калориметра, из-за которой события не реконструировались в ECal.
- Разработан и реализован алгоритм устранения дубликатов частиц на основе минимизации углового расстояния  $\Delta R$ , что позволило повысить точность сопоставления частиц между симуляцией и реконструкцией.
- Выполнен анализ реконструкции  $\pi^+$ -мезонов из распада  $K_S^0$ , что подтвердило корректную работу детектора и выявило возможные особенности отклика калориметра в переходной зоне между баррельной частью и эндкапами.
- Проведено исследование реконструкции фотонов из распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ , а также симуляции одиночных фотонов. Было выявлено, что часть хитов фотонов, регистрируемых в калориметре, не являются фотонами из пучка, а являются фотонами из соответствующего ливня. Это показало необходимость кластеризации хитов и более строгих критериев отбора при оценке эффективности реконструкции.
- Показано, что простое отношение числа реконструированных частиц к числу сгенерированных не отражает реальную эффективность калориметра.

На основе проведённого анализа можно сделать вывод, что система реконструкции в ECal функционирует в целом корректно, однако требуется дальнейшая работа для точной оценки эффективности. Полученные методы фильтрации и сопоставления частиц могут быть использованы в дальнейших исследованиях и при подготовке к экспериментальной фазе SPD.

Работа закладывает основу для последующего анализа эффективности калориметра и построения алгоритмов реконструкции нейтральных пионов и prompt-фотонов.

## 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).