

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

УДК 539.17

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ π^0 МЕЗОНОВ В
ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРА PHOS В RUN3**

Научный руководитель
к.ф.-м.н., рук. отд. НИЦ КИ

_____ Д. С. Блау

Студент

_____ Г. Е. Фоменко

Москва 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 2 |
| Эксперимент «ALICE» | 3 |
| Фотонный спектрометр ФОС (PHOS) | 4 |
| Физика процесса | 5 |
| Описание симуляции | 6 |
| Обработка данных | 7 |
| Программный пакет O2 | 9 |
| Результаты | 10 |
| Разделение слившихся сигналов | 10 |
| Обработка данных при моделировании в O2 | 19 |
| Заключение | 21 |
| Список используемых источников | 23 |

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью и задачей данной работы является создание алгоритма для разделения слившихся сигналов от двух γ -квантов, находящихся на близком расстоянии друг к другу. Проверить применимость выбранных функций для реконструкции инвариантной массы π^0 . Также в работе рассмотрена генерация данных с применением программного обеспечения O2, которое разработано для RUN3 на эксперименте ALICE.

Для набора данных использовался программный пакет для моделирования GEANT4. В данном пакете программ была создана модель детектора из сцинтиляционных кристаллов PbWO₄(PWO), была проведена симуляция попадания в детектор двух частиц на некотором расстоянии друг от друга, симуляция распада π^0 – мезона. Для обработки данных использовался программный пакет ROOT.

ЭСПЕРИМЕНТ «ALICE»

Эксперимент «АЛИСА» изначально был спроектирован для эффективно-го исследования столкновений тяжелых ионов (Свинец), поэтому основу дан-ных «АЛИСА» составляют столкновения тяжелых ионов, имеющих энергию в системе центра масс порядка 2.76 ТэВ и 5.02 ТэВ на пару нуклонов.

Исследования проекта «АЛИСА» затрагивают широкий спектр явлений в области физики высоких энергий, в том числе затрагиваются такие вопросы как: исследование кварк-глюонной плазмы, что является основной целью экспе-римента. В ходе столкновения образуется такое состояние материи как кварк-глюонная плазма, в таком состоянии была наша вселенная в момент времени 10^{-5} с с момента Большого Взрыва, существование данного состояния вещества и его свойства – это ключевой вопрос для объяснения явления «конфайнмент», которое заключается в том, что мы не можем наблюдать кварки в чистом виде, а только их агрегаты, состоящие из двух (мезоны) , трех (барионы) кварков.

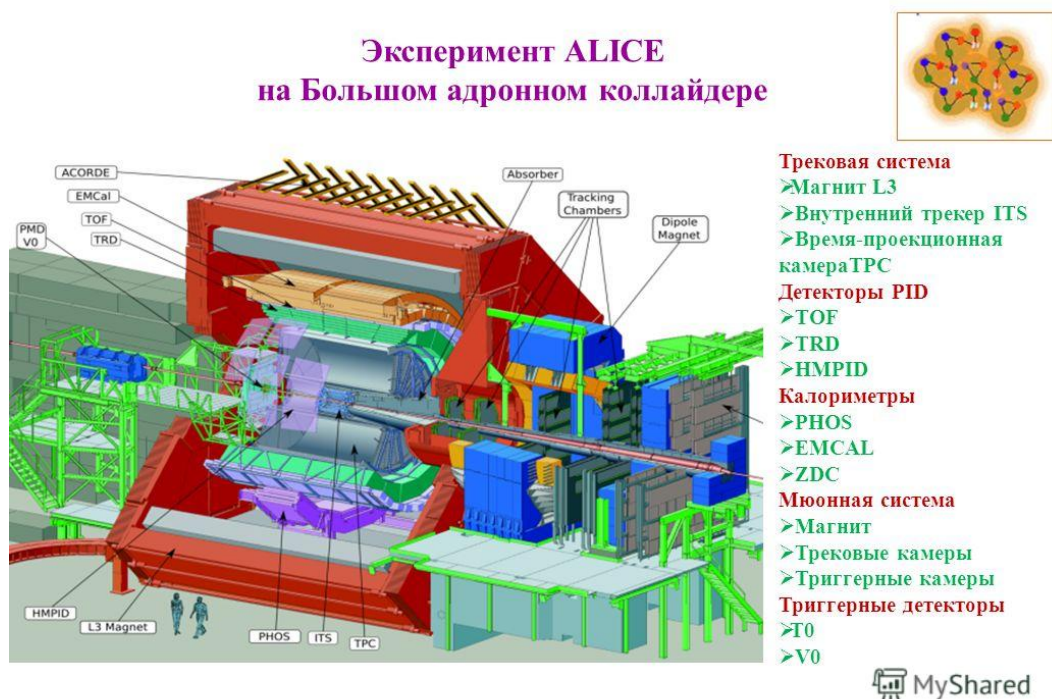


Рисунок 1 — Схема эксперимента «АЛИСА»

ФОТОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ФОС (PHOS)

Фотонный спектрометр «PHOS», обеспечивает получение важной информации о материи, образующейся при взаимодействии встречных пучков тяжелых ионов высоких энергий. Он позволяет регистрировать, во-первых, прямые фотоны при энергиях выше 1 ГэВ. А во-вторых, π^0 и η^0 – мезоны по их двухфакторным распадам.

Спектрометр представляет собой сложную сегментированную систему с площадью чувствительной поверхности 6 м² и примерно 12500 измерительных каналов на основе сцинтилляционных кристаллов вольфрамата свинца PbWO₄. Для таких целей требуются специфические кристаллы, у которых низкая радиационная длина (влияет на компактность) и малый радиус Мольера, который соответствует поперечному размеру электромагнитного ливня.

Детектор «PHOS» состоит из набора кристаллов PbWO₄ размерами 22 × 22 × 180 мм³, ориентированными торцами к потоку регистрируемого излучения. Ливни, возникающие в кристаллах под действием фотонов высоких энергий, преобразуются в сцинтилляционное световое излучение, регистрируемое ливневым фотодиодом «APD». [1]

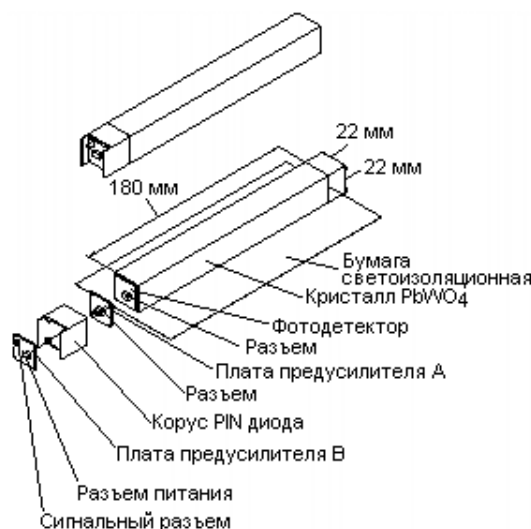


Рисунок 2 — Схема детектирующего элемента спектрометра «PHOS»

ФИЗИКА ПРОЦЕССА

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЛИВЕНЬ

Электроны, позитроны и гамма-кванты рожают в веществе калориметра электромагнитные ливни (рис. 1). При энергии более 1 ГэВ основной процесс для фотона – рождение электрон-позитронной пары, для электрона (позитрона) – рождение тормозного фотона. При этом оба процесса уже мало зависят от энергии частицы. Рассмотрим формирование электромагнитного ливня на примере влетающего в калориметр фотона. Влетающий в калориметр фотон рождает электрон-позитронную пару. В свою очередь, если энергия электронов (позитронов) больше критической, они производят тормозное излучение (фотоны). Количество частиц в ливне будет быстро расти, пока средняя энергия не понизится до критической и основным механизмом для заряженных частиц не станет ионизация.

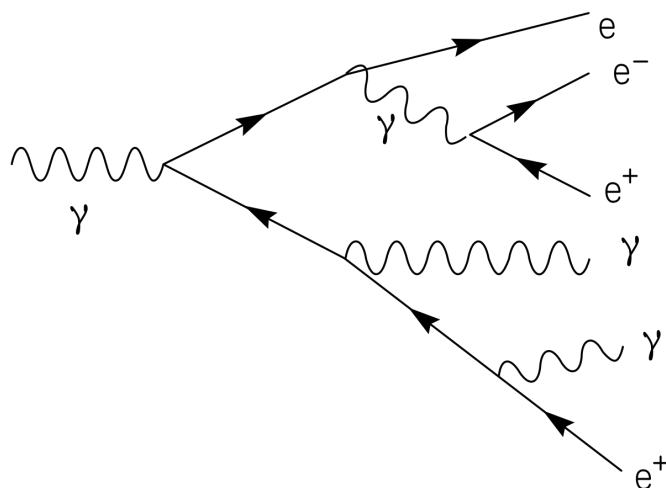


Рисунок 3 — Схема электромагнитного ливня

ОПИСАНИЕ СИМУЛЯЦИИ

Для набора данных была создана модель в пакете для моделирования физического эксперимента GEANT4. Была создана модель сборки калориметра PHOS размером 11×11 элементов с зазором между элементами 0.1 мм. В симуляции разыгрывались события, в каждом из которых создавалась пара частиц. Одна прилетала всегда в центр сборки, другая запускалась на заданном от центральной частицы. Были рассмотрены пары частиц с одинаковыми энергиями при энергиях в 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 6, 10 ГэВ на расстоянии в 3 см. Также были рассмотрены случаи для частиц с энергией в 6 ГэВ для расстояний 3, 4, 5, 6 см, случаи для частиц с разными энергиями на расстоянии в 3 см от центральной частицы для сочетаний энергий в 2+1, 6+3, 10+5 ГэВ. Была рассмотрена возможность восстановления величины инвариантной массы π^0 – мезона при энергиях до 40 ГэВ.

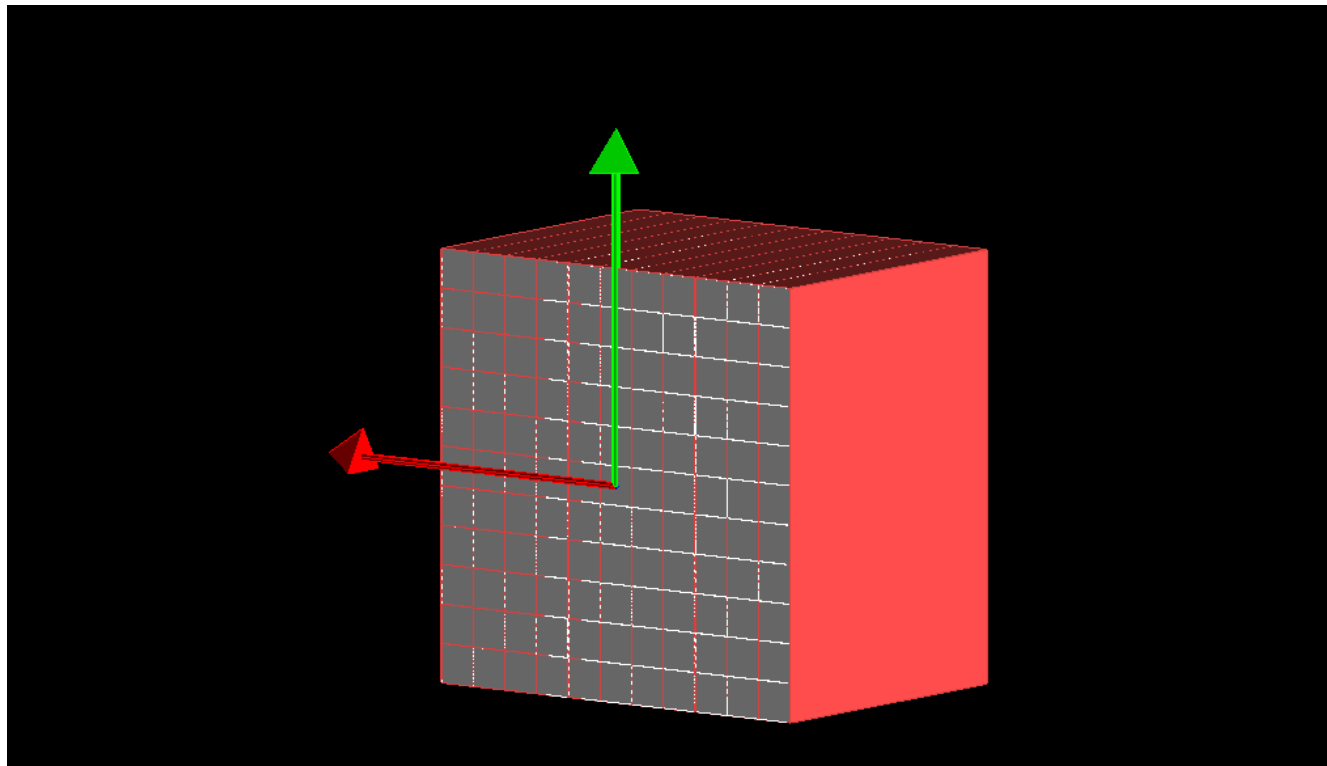


Рисунок 4 — Сборка PHOS

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для обработки данных были выбраны две функции для аппроксимации ими распределений энергий от частиц для дальнейшего перевзвешивания вкладов от энерговыделений каждой из частиц в отдельно взятом элементе сборки. Первая функция (далее, для простоты, она именуется как Фиттер) была взята из ALICE Technical Design Report of the Photon Spectrometer (PHOS)[2]. Применимость данной функции для описания кластера энерговыделения в кристалле PHOS была мной проверена в прошлой работе, вкратце данная функция достаточно точно восстанавливает величину энергии и расстояний между частицами, несмотря на высокий относительный χ^2 .

$$f(E, r) = \begin{cases} par[0] \cdot \exp(-r^4/par[3]) & r \leq 0.5 \text{cm} \\ par[0] \cdot \max(\exp(-r^4/par[3]), par[5] \cdot \exp(-r^{0.6}/par[4])) & r > 0.5 \text{cm} \end{cases} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{(x - par[1])^2 + (y - par[2])^2}$$

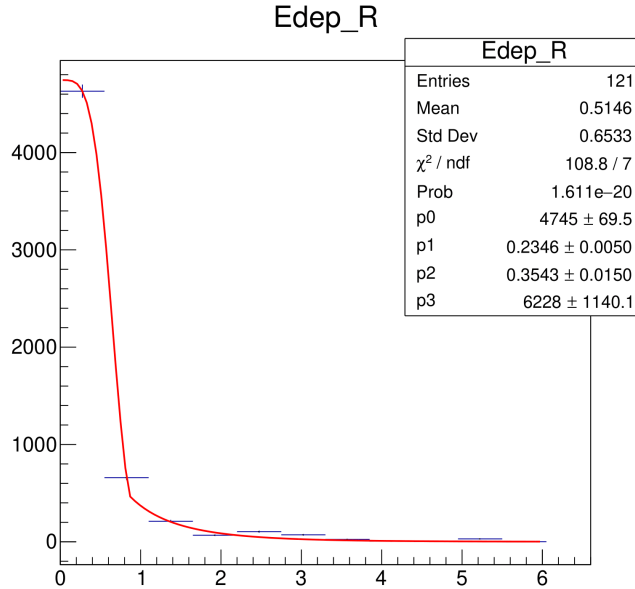


Рисунок 5 — Результат фитирования для 6 ГэВ

Вторая функция, которой мне было предложено аппроксимировать распределения энергии, это функция Гаусса. Основная идея разделения слившихся кластеров от двух частиц – это перевзвешивание. Перевзвешивание – разделение вкладов в энерговыделение в каждом отдельном кристалле сборки от каждой из частиц.

ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ O2

Следующим этапом в разработке методов по реконструкции π^0 стало применение среды для симуляции физического эксперимента O2, разработанной для Run3 на LHC. Программный пакет O2 создан в первую очередь для реализации на программном уровне параллельных вычислений, оптимизируя элементы Монте-Карло моделирования. Сам пакет включает в себя 55 элементов, которые вместе позволяют реализовать моделирование любого элемента эксперимента ALICE. В данной работе будет затронут контроль вычислений процессов взаимодействия с веществом частиц и внутренних процессов ливня.

После окончания симуляции, на выходе будут получены первичные файлы отклика детектора, далее данные файлы диджитизируются, а после кластеризуются, на выходе мы получаем кластеры — цифровые данные отклика детектора при взаимодействии с данной частицей.

Данные на каждом из описанных этапов представлены в виде .root файлов. Файл содержит полученные, при помощи моделирования, сигналы-отклики. Особый интерес представляют собой следующие ветви:

Глобальный список кластеров с их свойствами размечен на события с помощью записей триггера, они вместе порождают тип кластер - его свойствами являются лейблы: список частиц, которые породили этот кластер, выделенная энергия и их номер. Кластеру также заданы некоторые свойства — энергия, локальные координаты кластера, которые, с помощью матрицы расположения, переводятся в глобальные координаты. При помощи данных переведенных в глобальные координаты можно вычислить углы прилета частиц, а из этих данных рассчитать инвариантную массу родительской частицы. Применяя классы True McArray и Лейблов, мы можем получить характеристики самих частиц: координаты их появления, энергии конкретной частицы, ее PDG коду.

В O2 также реализован метод, с помощью которого можно получить список ее родительских частиц, частиц которые были порождены данной частицей. Программный пакет устроен так, что мы можем проконтролировать процессы внутри симуляции физического эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

РАЗДЕЛЕНИЕ СЛИВШИХСЯ СИГНАЛОВ

В ходе проведенной работы, с помощью симуляции физического эксперимента, были получены и обработаны данные энерговыделения двух частиц с равными энергиями на разных расстояниях. Были получены результаты работы алгоритма разделения слившихся кластеров с использованием функции Фиттер и функции Гаусса.

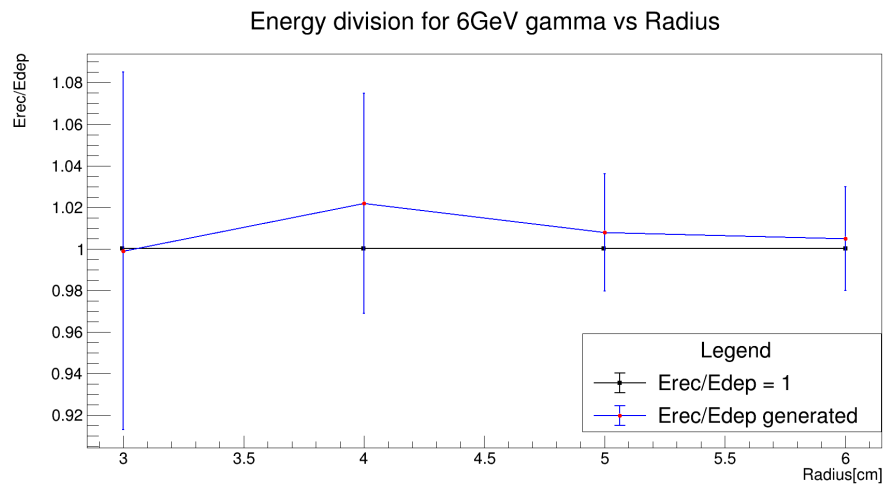


Рисунок 6 — Результат разделения энергий двух гамма квантов с энергией 6 ГэВ на различных расстояниях с использованием функции Фиттер.

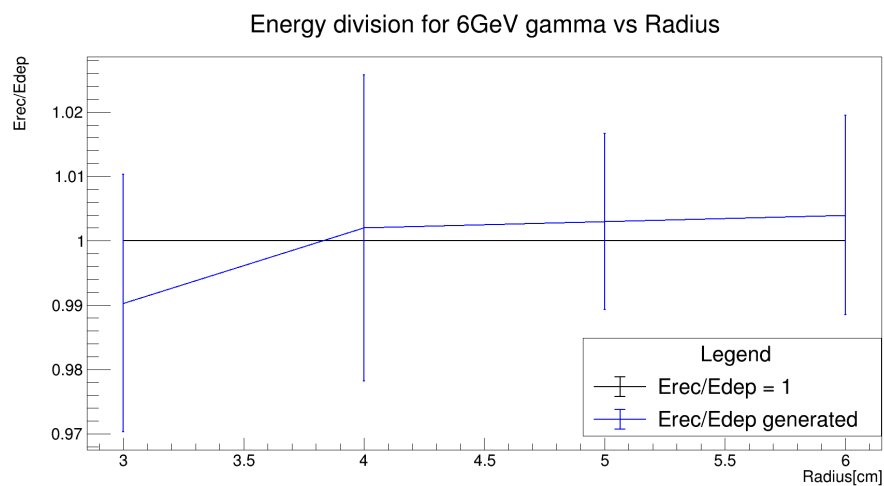


Рисунок 7 — Результат деления энергий двух гамма квантов с энергией 6 ГэВ на различных расстояниях с использованием функции Гаусса.

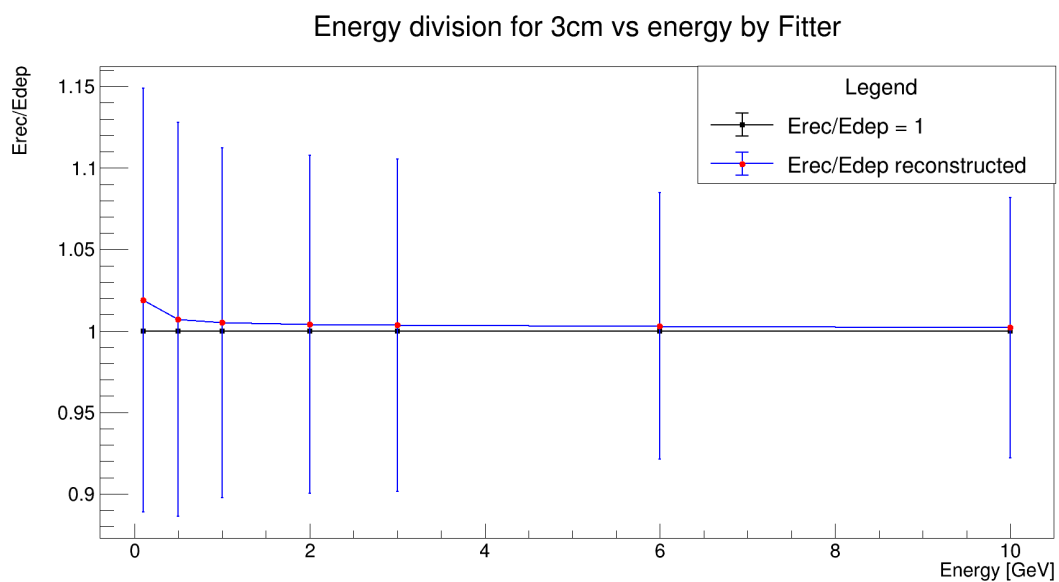


Рисунок 8 — Результат деления энергий двух гамма квантов на расстоянии 3 см с использованием функции Фиттер

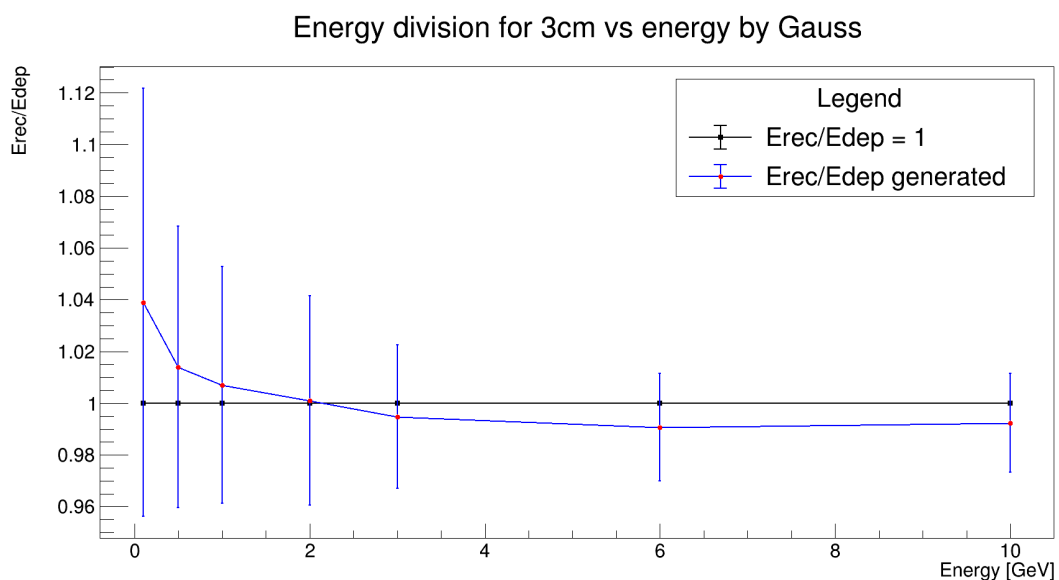


Рисунок 9 — Результат восстановления энергии первой частицы на расстоянии 3см с использованием функции Гаусса

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что и функция Гаусса, и Фиттер разделяют кластеры как на больших расстояниях, так и близкие частицы при различных энергиях. Можно сделать вывод и Гаусс, и Фиттер, оба лучше справляются с разделением частиц с высокими энергиями, нежели с низкими.

Были также получены данные для восстановления расстояний между частицами с применением функций Фиттер и Гаусса.

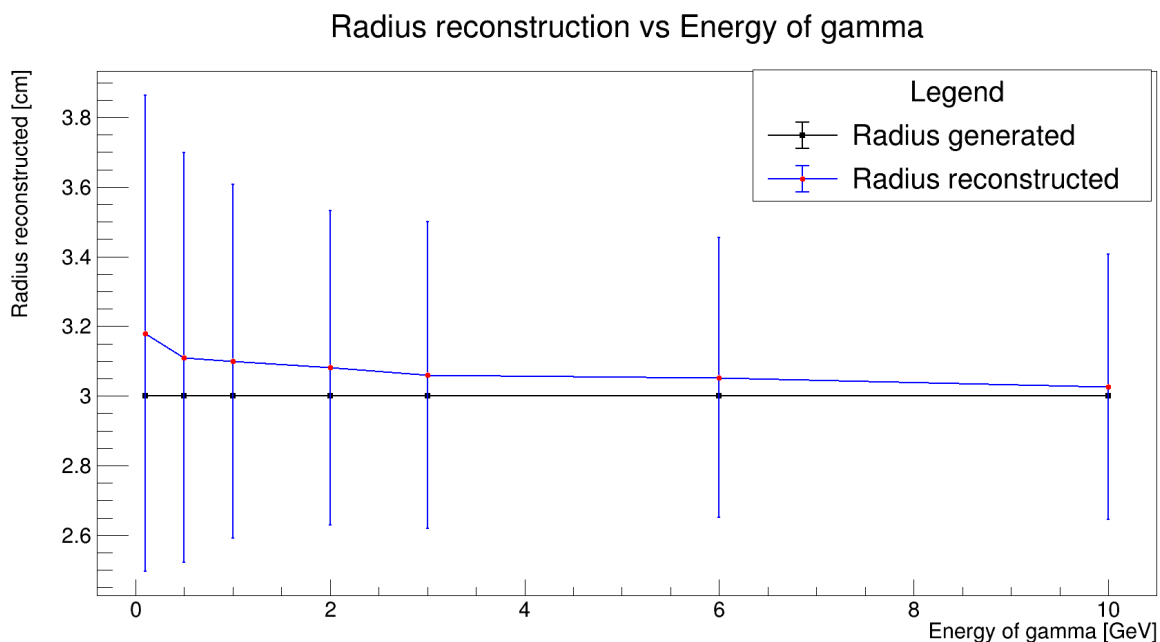


Рисунок 10 — Результат восстановления расстояния между частицами для различных энергий с помощью функции Фиттер

Также представлено распределение значений восстановленного расстояния между частицами для энергий в 6 ГэВ

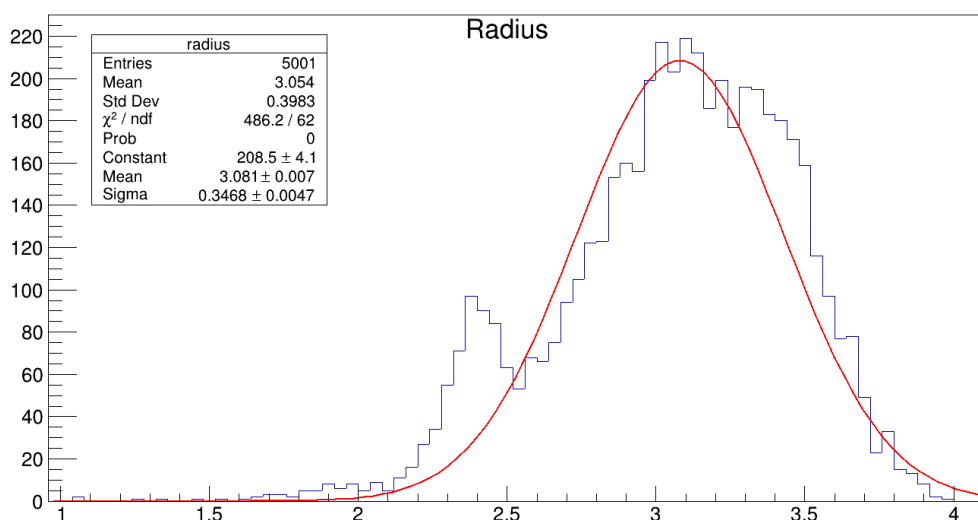


Рисунок 11 — Распределение величины восстановленного расстояния между частицами для энергии 6 ГэВ, полученное с помощью функции Фиттер

Также были получены данные восстановленного расстояния между сгенерированными частицами для функции Гаусса.

Radius reconstruction vs Radius Generated

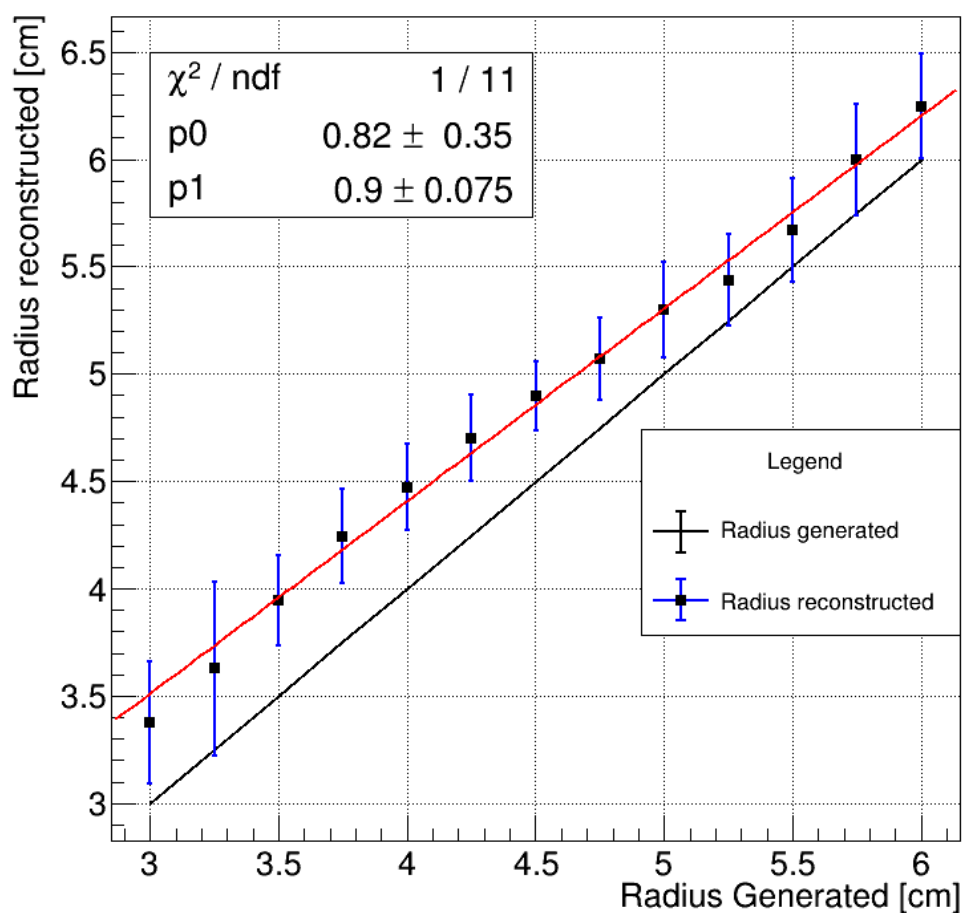


Рисунок 12 — Зависимость восстановленной величины расстояния от заданной для функции Гаусса

Из полученных данных был сделан вывод, что функция Гаусса не может восстановить расстояние между частицами, при этом величина отклонения расстояния с некоторой погрешностью может считаться постоянной. Было принято решение рассмотреть результаты работы алгоритма при использовании различных параметров фита при разделении кластеров.

Получены данные о работе алгоритма при различных параметрах фита для радиусов 3 и 6 см с использованием предложенных функций

| Функция фита | Гаусс | | | | | | Фиттер | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| | 3см | | | 6см | | | 3см | | | 6см | | |
| | L | I | None | L | I | None | L | I | None | L | None | |
| Расстояние между частицами | | | | | | | | | | | | |
| Параметр | | | | | | | | | | | | |
| Среднее значение R_{rec} [cm] | 3.385 | 2.687 | 3.007 | 6.252 | 5.937 | 6.006 | 3.054 | 3.039 | 3.051 | 6.010 | 6.058 | |
| Стандартное отклонение R_{rec} [cm] | 0.1882 | 0.1413 | 0.1432 | 0.1881 | 0.3209 | 0.2289 | 0.1706 | 0.4063 | 0.3880 | 0.2755 | 0.3549 | |
| Процент событий в пике | 98.9% | 99.8% | 59.7% | 99.7% | 100% | 99.4% | 99.3% | 100% | 99.0% | 99.1% | 99.9% | |
| Среднее значение E_{rec}/E_{dep} | 0.991 | 1.009 | 1.009 | 1.004 | 1.005 | 1.005 | 0.998 | 1.019 | 0.989 | 1.007 | 0.998 | |
| Стандартное отклонение E_{rec}/E_{dep} | 0.01618 | 0.03946 | 0.01649 | 0.01453 | 0.03463 | 0.01540 | 0.08115 | 0.04312 | 0.05604 | 0.01762 | 0.02021 | |
| Процент событий в пике | 97.2% | 99.8% | 57.5% | 99.26% | 99.8% | 99.6% | 88.9% | 99.3% | 87.9% | 97.9% | 99.9% | |

Таблица 1 — Результат проверки работы алгоритма с различными параметрами фитирования

Из полученных данных можно сделать вывод, что параметр I никак не влияет на результат, поэтому в дальнейшем он проверяться не будет, так как применение данного параметра увеличивает время работы алгоритма на порядок (Fitter для 1000 событий для частиц с энергией 6 ГэВ обрабатывался более 13 часов).

| Функция фита | Гаусс | | | | | | Фиттер | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2+1 | | 6+3 | | 10+5 | | 2+1 | 6+3 | 10+5 |
| | L | None | L | None | L | None | L | | |
| Энергия частиц [GeV] | | | | | | | | | |
| Параметр | | | | | | | | | |
| Среднее значение R_{rec} [cm] | 3.357 | 2.986 | 3.345 | 2.935 | 3.339 | 3.006 | 2.988 | 3.028 | 3.022 |
| Стандартное отклонение R_{rec} [cm] | 0.2472 | 0.3203 | 0.2159 | 0.2196 | 0.1797 | 0.1419 | 0.598 | 0.3983 | 0.3495 |
| Процент событий в пике | 93.0% | 82.0% | 96.2% | 72.4% | 97.3% | 61.7% | 91.3% | 93.7% | 94.7 |
| Среднее значение E_{rec1}/E_{dep1} | 0.9847 | 0.9762 | 0.974 | 0.9902 | 0.9713 | 0.9904 | 0.9784 | 0.9736 | 0.9752 |
| Стандартное отклонение E_{rec1}/E_{dep1} | 0.02547 | 0.01671 | 0.50910 | 0.01641 | 0.01430 | 0.01525 | 0.07615 | 0.06905 | 0.07032 |
| Процент событий в пике | 87.4% | 58.1% | 90.5% | 61.3% | 89.2% | 61.7% | 76.4% | 86.3% | 85.9% |
| Среднее значение E_{rec2}/E_{dep2} | 1.028 | 1.047 | 1.054 | 1.021 | 1.005 | 1.021 | 0.9902 | 1.054 | 1.007 |
| Стандартное отклонение E_{rec2}/E_{dep2} | 0.04425 | 0.05005 | 0.03816 | 0.03024 | 0.02835 | 0.02528 | 0.09236 | 0.09247 | 0.09817 |
| Процент событий в пике | 86.0% | 57.8% | 92.4% | 60.7% | 89.2% | 59.1% | 82.3% | 89.3% | 88.7% |

Таблица 2 — Результат проверки работы алгоритма с различными параметрами фитирования при асимметрии энергии частиц

В данной таблице приведены результаты работы алгоритма при разделении частиц, с неравными энергиями на расстоянии 3 см. Из результатов видно, что алгоритм также разделяет неравные частицы, за исключением восстановления расстояния функцией Гаусса.

После анализа полученных данных было принято решение приблизить рассматриваемую физическую модель к реальному эксперименту и добавить каты на энергию ниже 10 МэВ. Результаты приведены в таблице ниже для частиц с энергией 6 ГэВ на расстоянии 3 см.

| Функция фита | Гаусс | | Фиттер | |
|--|----------|-----------|----------|-----------|
| Наличие ката | \oplus | \ominus | \oplus | \ominus |
| Среднее значение R_{rec} [cm] | 3.193 | 3.356 | 3.079 | 3.070 |
| Стандартное отклонение R_{rec} [cm] | 0.1697 | 0.1863 | 0.3880 | 0.3742 |
| Процент событий в пике | 99.1% | 99.2% | 98.5% | 98.5 |
| Среднее значение E_{rec}/E_{dep} | 0.9934 | 0.9904 | 0.9929 | 0.9981 |
| Стандартное отклонение E_{rec}/E_{dep} | 0.01987 | 0.02027 | 0.08355 | 0.08109 |
| Процент событий в пике | 98.2% | 97.5% | 89.2% | 89.5% |

Таблица 3 — Результат проверки работы алгоритма с применением катов

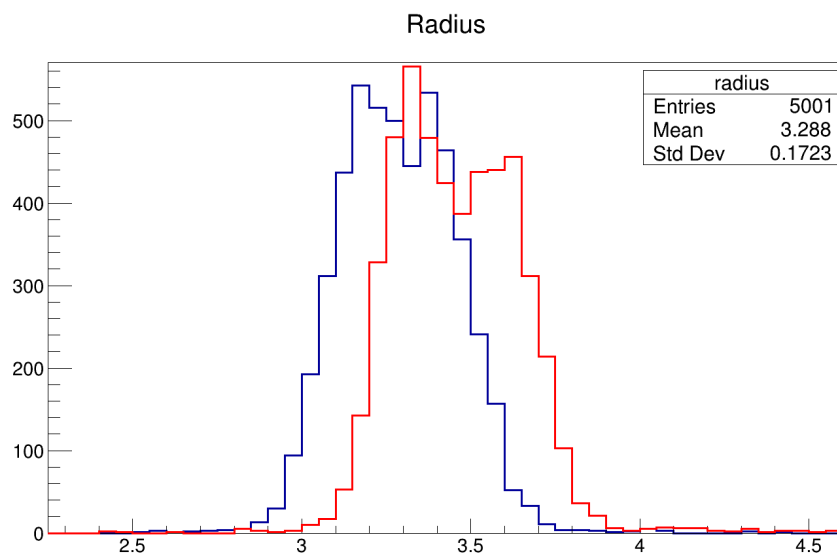


Рисунок 13 — Распределение величин радиусов по событиям при наличии и отсутствии катов для γ -квантов с энергией 6 ГэВ на расстоянии 3 см

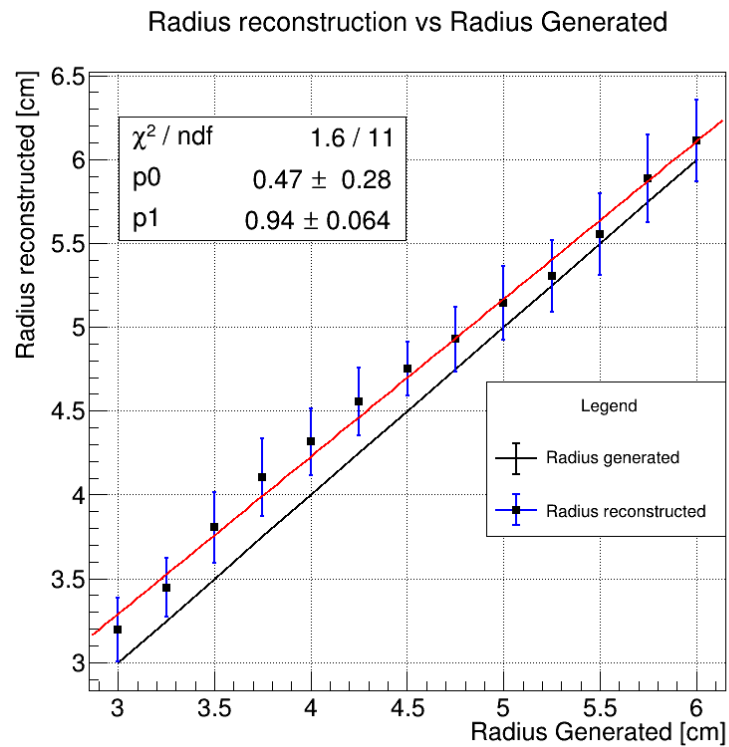


Рисунок 14 — Зависимость восстановленной величины расстояния от заданной для функции Гаусса при наличии катов на энергию более 10 МэВ

Исходя из результатов, предоставленных в таблице, можно сделать вывод, что применение катов на энергию действительно улучшают работу алгоритма с использованием функции Гаусса, при этом на функцию Фиттер каты не оказывают никакого влияния.

Для проверки работоспособности алгоритма, было принято решение восстановить инвариантную массу 40 ГэВ π^0 . Данные для восстановления инвариантной массы были получены с помощью симуляции в среде GEANT4, объем статистики составил 1000 событий.

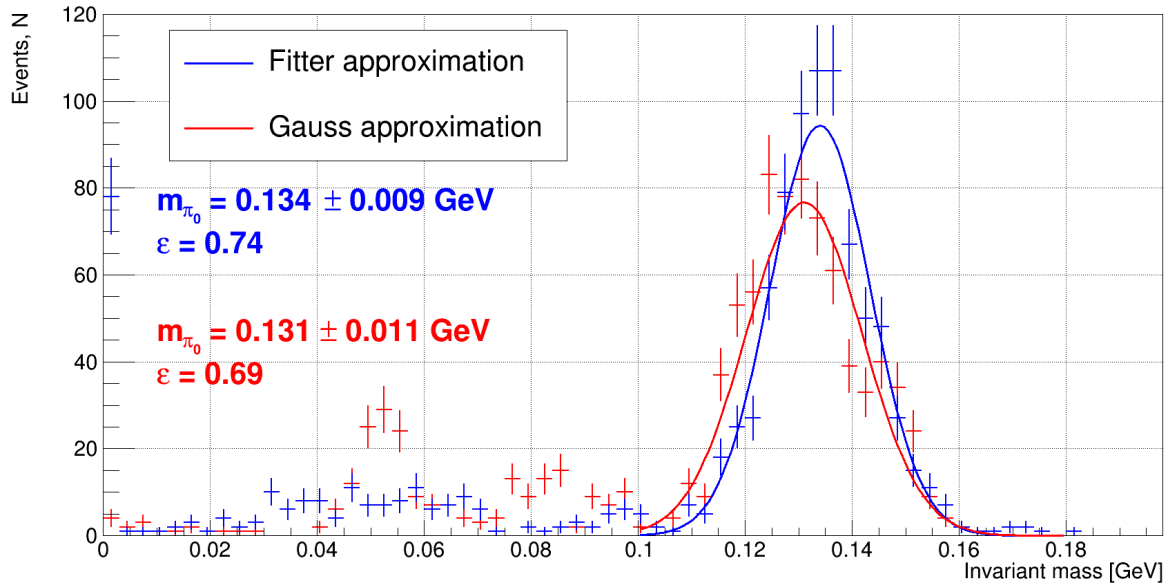


Рисунок 15 — Распределение величины восстановленной инвариантной массы π^0 с использованием функции Гаусса и Фиттера.

Из полученных данных можно сделать вывод, что и функция Гаусса и функция Фиттер справляются с задачей по восстановлению значений инвариантной массы π^0 мезона.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ В O2

В ходе проведенной работы, с помощью симуляции физического эксперимента в среде для моделирования O2, были получены и обработаны данные полученные при попадании π^0 в детектор PHOS при разных начальных энергиях частицы.

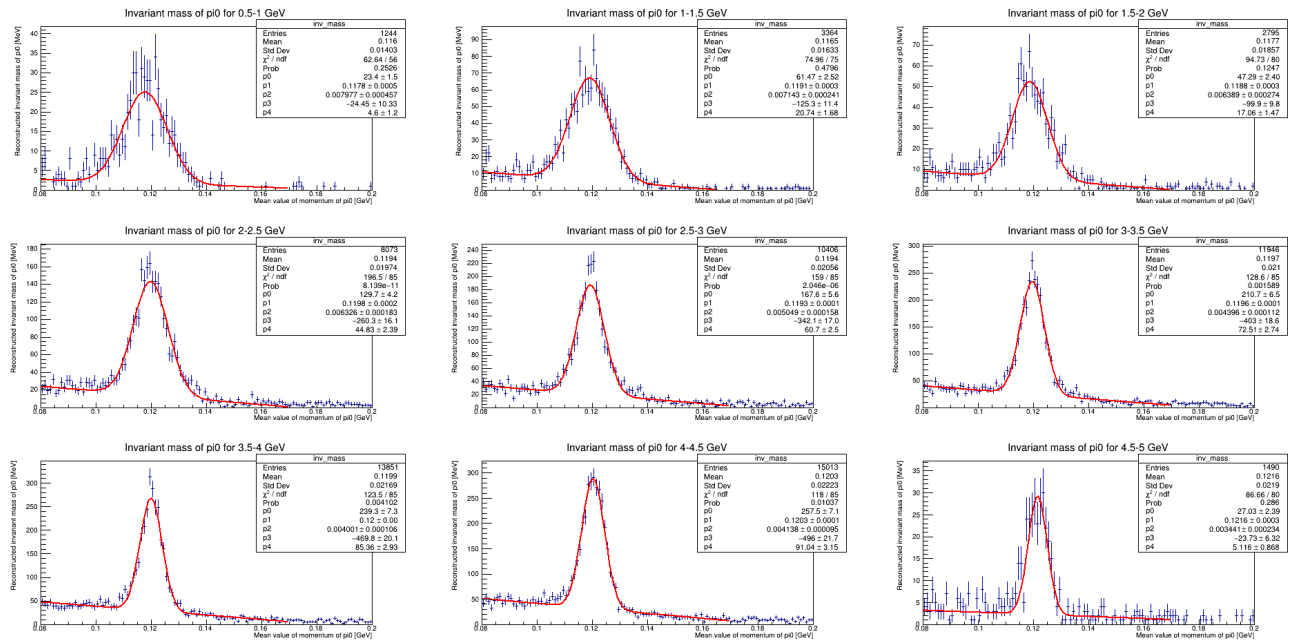


Рисунок 16 — Аппроксимация спектров инвариантных масс π^0 для различных начальных энергий

Из полученных величин инвариантных масс была получена зависимость инвариантной массы π^0 от энергии.

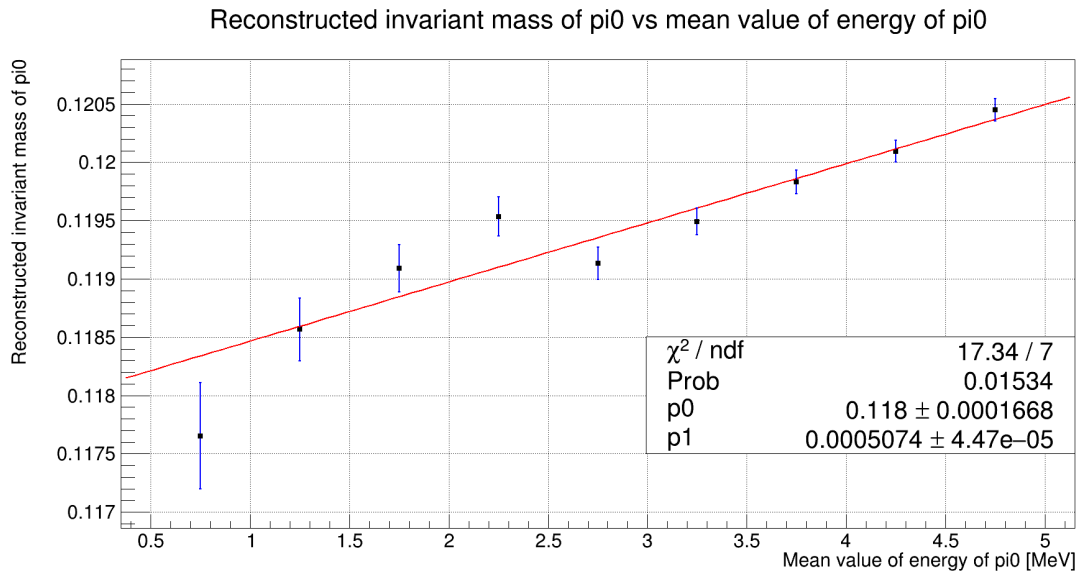


Рисунок 17 — Зависимость инвариантной массы π^0 от энергии частицы

Также была получена зависимость ширины пика инвариантной массы частицы, в зависимости от начальной энергии мезона.

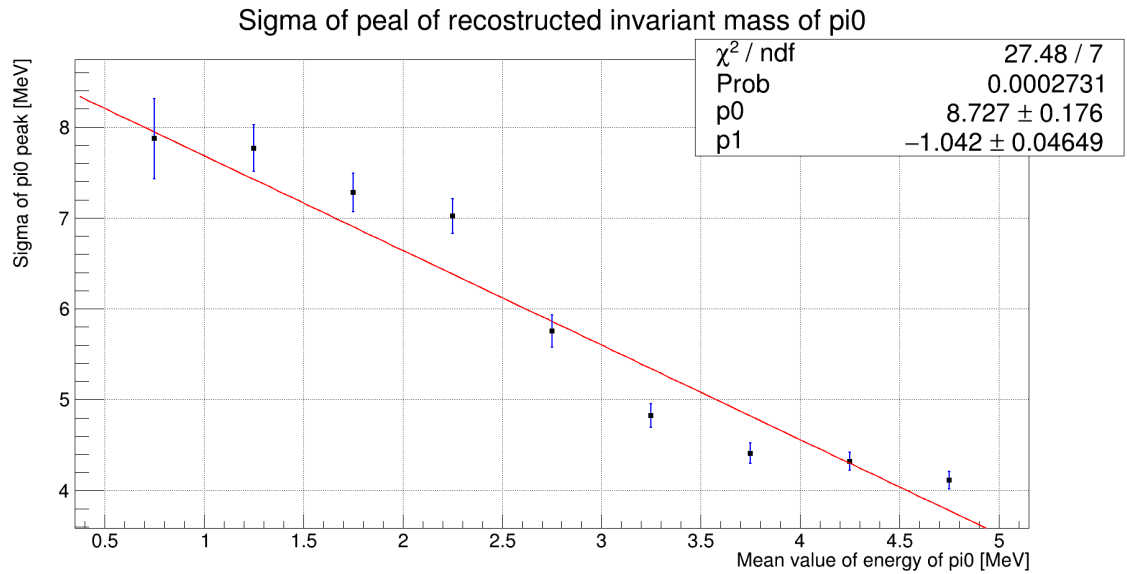


Рисунок 18 — Зависимость ширины пика инвариантной массы π^0 от энергии частицы

В дальнейших планах предполагается определить функцию нелинейности для спектра инвариантных масс и сравнить ее с функцией нелинейности полученной для экспериментальных данных. Также предполагается в дальнейшем начать работу с программой для обработки данных O2-physics, разработанной коллаборацией ALICE для RUN3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была создана симуляция детектирования γ -кванта в сборке кристаллов PbWO_4 , модель была создана в программном пакете **GEANT4**. Данные полученные в ходе симуляции были обработаны в пакете программ **Root**. Были получены данные восстановления величины энергии от гамма-квантов для частиц находящихся на различном расстоянии друг от друга с применением двух выбранных функций.

Были получены данные о точности работы алгоритма при восстановлении расстояния между частицами для различных энергий с применением выбранных функций. Для выбранных функций были собраны и обработаны алгоритмом данные для различных опций фита. Также был рассмотрен случай неравного вклада частиц в общее энергосодержание. Проводимая симуляция была приближена к реальному физическому эксперименту установлением катов на энергию ниже 10 МэВ.

Полученные результаты могут говорить о том, что функция Гаусса, не смотря на неудовлетворительное восстановление расстояния между частицами, все равно остается более предпочтительным вариантом для применения, нежели функция Фиттер. Возможна комбинация функций при обработке данных. Основными преимуществами функции Гаусса является: стабильность работы, скорость счета, фундаментальное значение самой функции и простота интерпретации параметров. Основным недостатком является систематическое завышение величины расстояния между частицами при восстановлении. Для функции Фиттер преимуществами является: точность описания самого распределения, точность восстановления всех необходимых параметров. Недостатки применения функции Фиттер: нестабильность работы (при неверно заданных параметрах скомпилированный код может выдать ошибку), низкая скорость счета, сложность самой функции и интерпретации ее параметров (величина радиуса в степени 0.6 дает основной вклад в увеличение времени работы).

При проверке работоспособности функций при разделении слившихся сигналов, обе функции справились с поставленной задачей, и функция Гаусса, и

функция Фиттер могут разделить слившиеся сигналы от π^0 для случаев с энергией до 40 ГэВ. Преимуществом функции Гаусса остается скорость работы, при более низкой эффективности восстановления инвариантной массы.

В данной работе также был рассмотрен и освоен новый пакет программ для симуляции физического эксперимента O2. Были получены значения инвариантной массы для различных энергий, ширины пиков инвариантных масс для соответствующих пиков. В дальнейшем планируется определение функции нелинейности инвариантных масс π^0 и освоение новой программы для обработки данных O2-physics.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Gustafsson H.-A.* The ALICE experiment at the CERN LHC // Journal of Instrumentation. — 2008. — Т. 3. — С. 88—91.
2. *Schukraft J., Manko V.* ALICE Technical Design Report of the Photon Spectrometer. 1999.
3. *Howard A.* Geant4 User's Guide for Application Developers. — 2007.
4. *Halterman R. L.* Fundamentals of Programming C++. — School of Computing Southern Adventist University, 2018.
5. *Acharya S.* Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment // Journal of instrumentation. — 2019. — Т. 14.
6. *Berger F.* Particle identification in modular electromagnetic calorimeters. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1992. — С. 152—164.