

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 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	2
Эксперимент «ALICE»	3
Фотонный спектрометр (PHOS)	4
Физика процесса	5
Описание моделирования	6
Нелинейность отклика детектора	8
Результаты	10
Заключение	16
Список используемых источников	17

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью и задачей данной работы является разработка методов реконструкции π^0 мезонов в эксперименте «ALICE».

В работе рассмотрена генерация данных с применением программного обеспечения O2, которое разработано для RUN3 в эксперименте «ALICE». В работе восстановлены значения инвариантных масс π^0 мезона для различных энергий. Для обработки данных применялся пакет программ ROOT с библиотеками O2 и O2-sim для работы с классами и типами данными применяющихся в среде моделирования. Для генерации данных в O2 применяется генератор boxgen и рассматривается отклик только в детекторе PHOS. Также применяются такие фреймворки как FairRoot, O2-sim. Основной задачей O2 является объединение всех этих фреймворков для симуляции эксперимента.

Для извлечения спектра инвариантных масс π^0 мезонов подразумевается несколько этапов работы с данными. При моделировании эксперимента в самом начале мы получаем данные в виде хитов(hits). Каждый hit – энергия, выделенная в одном кристалле одной частицей, прошедшей через переднюю поверхность кристалла. Далее мы диджитизируем, т.е. суммируем все hit в кристалле в одном событии. После мы кластеризуем полученные диджиты, т.е. получаем набор диджитов с общей стороной.

В данной работе извлекается спектр масс π^0 , обрабатывая полученные сигналы в детекторе, применяются восстановленные данные из отклика детектора.

Отдельной задачей является точное воспроизведение положения и ширины пика π^0 мезона в эксперименте или в Монте-Карло моделировании. Для облегчения их совпадения и уменьшения ширины мезонного пика в данных поправка нелинейности подбирается так, чтобы положение пика оставалось постоянным для различных энергий. В данной работе будет подобрана поправка нелинейности для Монте-Карло данных.

ЭСПЕРИМЕНТ «ALICE»

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

Исследования проекта затрагивают широкий спектр явлений в области физики высоких энергий, в том числе затрагиваются такие вопросы как: исследование кварк-глюонной плазмы, что является основной целью эксперимента. 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.

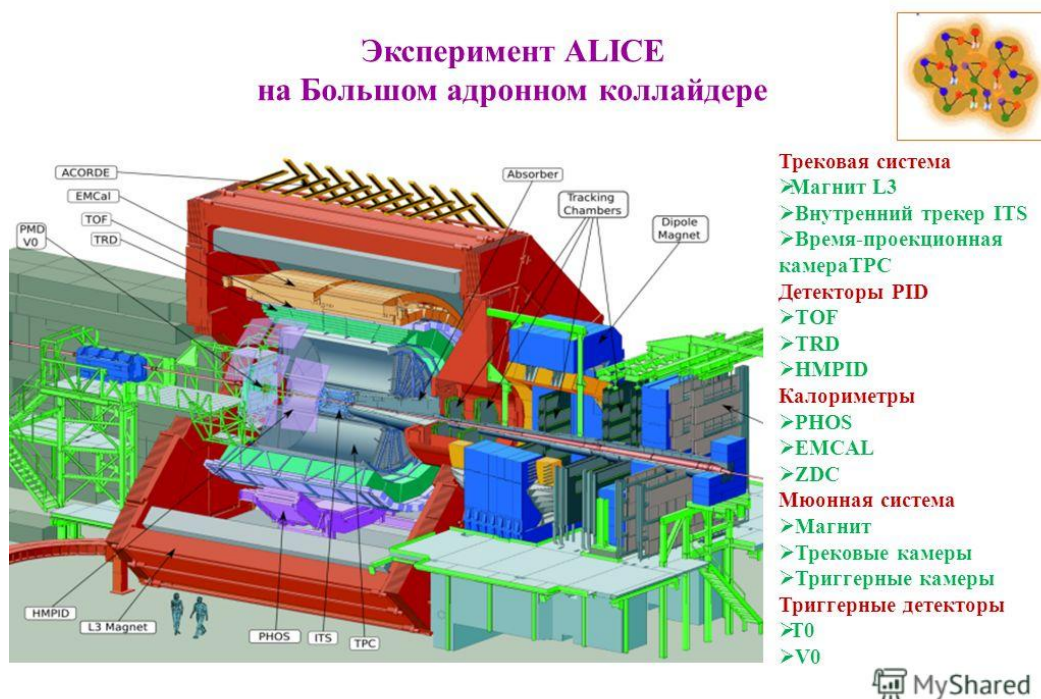


Рисунок 1 — Схема эксперимента «АЛИСА»

ФОТОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР (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 pиn-диодом. [1]

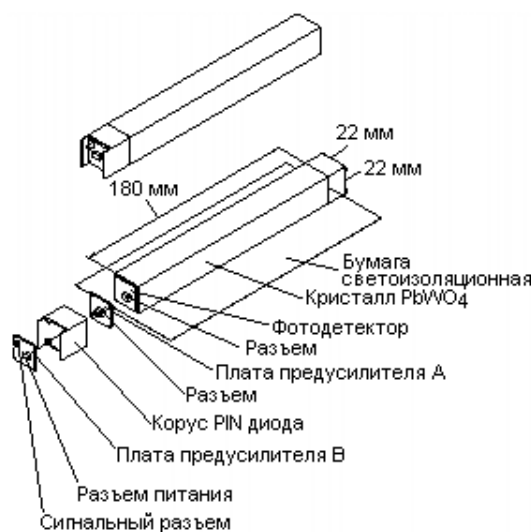


Рисунок 2 — Схема детектирующего элемента спектрометра «PHOS»

ФИЗИКА ПРОЦЕССА

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЛИВЕНЬ

Электроны, позитроны и гамма-кванты рожают в веществе калориметра электромагнитные ливни (рис. 1). При энергии > 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.

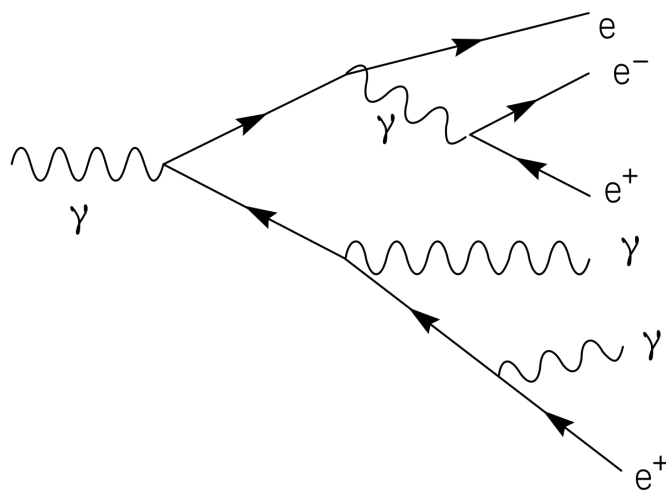


Рисунок 3 — Схема электромагнитного ливня

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для набора данных применялась среда для моделирования физического эксперимента O2, разработанная 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, начиная от C++, Python модулей, заканчивая фреймворками FairRoot, Root, GEANT3/4, PUTHYA и многими другими, которые вместе позволяют реализовать моделирование любого элемента эксперимента ALICE в разных областях физики в зависимости от требований задачи. В данной работе будет затронут контроль вычислений процессов взаимодействия с веществом частиц и внутренних процессов ливня.

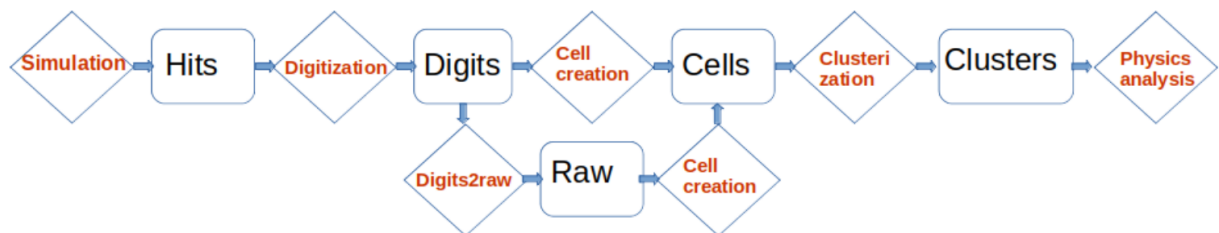


Рисунок 4 — Этапы моделирования данных в среде O2

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 частиц: координаты их появления, энергии конкретной частицы, ее PDG код.

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

НЕЛИНЕЙНОСТЬ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА

При снятии данных с детектора, результат должен быть прямо пропорционален величине энергии частицы, попавшей в него. Однако, в реальности отклик детектора имеет нелинейную форму, в том числе у спектрометра PHOS. Существует несколько причин возникновения явления нелинейности в детекторе:

- При больших энергиях пучка, попадающего в детектор, возникает утечка ливня в конце кристалла, он не успевает высветиться в кристалле, из-за чего показания искажаются.

- При оцифровке сигнала величина сигнала искажается из-за ограниченной точности чисел с плавающей запятой.

- При отклике электроники также возникают всевозможные искажения.

Одной из основных задач данной работы – поиск функции нелинейности детектора в симуляции и применение ее на реальных данных, для проверки того, насколько точно полученные данные смоделированы в программе.

Поиск данной функции на большом массиве данных довольно затратный процесс, который требует большой объем вычислительной мощности и времени. Поэтому для подбора функции нелинейности был выбран более экономный подход. Данный механизм включает в себя несколько этапов:

- Выбор функции, для которой будут подбираться параметры для калибровки значений. В данном случае рассматривается функция:

$$f(E) = par_0 + par_1 \cdot E + par_2 \cdot E^2 + \frac{par_3}{E}$$

- Набор достаточного объема статистики, в нашем случае мы рассматриваем 10.000 событий, в каждом из которых рассматривается один π^0 .

- Далее выбирается функция для аппроксимации π^0 пика, в данном случае рассматривается сумма полинома второй степени и функции Гаусса, однако в будущем может быть рассмотрена функция Crystal Ball.

– Подбор первичного значения параметров функции с максимально подходящим значением инвариантной массы частицы. Необходимо, чтобы значения слабо колебались с ростом энергии вокруг теоретического значения.

– Варьирование пары параметров с поиском такого набора, при котором χ^2 функции фитирования зависимости инвариантной массы от энергии будет минимальным, это необходимо для того, чтобы добиться максимального соответствия неизменности положения мезонного пика. Повторять до тех пор, пока все параметры не будут так проварьированы.

Критерий правильности подбора функции нелинейности в данной работе – расчет инвариантной массы π_0 . Она рассчитывается по формуле:

$$m_{nl} = \sqrt{\frac{f(E_1)}{E_1} \cdot \frac{f(E_2)}{E_2}} \cdot m_{\gamma\gamma}$$

m_{nl} – масса π^0 мезона с поправкой на функцию нелинейности.

$f(E_{1,2})$ – значение функции нелинейности в зависимости от энергии одного из фотонов, образованных при распаде мезона.

$E_{1,2}$ – значение энергии одного из фотонов, образованных при распаде π^0 .

$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2E_1E_2 \cdot (1 - \cos \Theta)}$ – масса π^0 мезона без поправки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведенной работы, с помощью симуляции физического эксперимента, были получены и обработаны данные распада π^0 мезона. Была получена зависимость инвариантной массы π^0 от его начальной энергии.

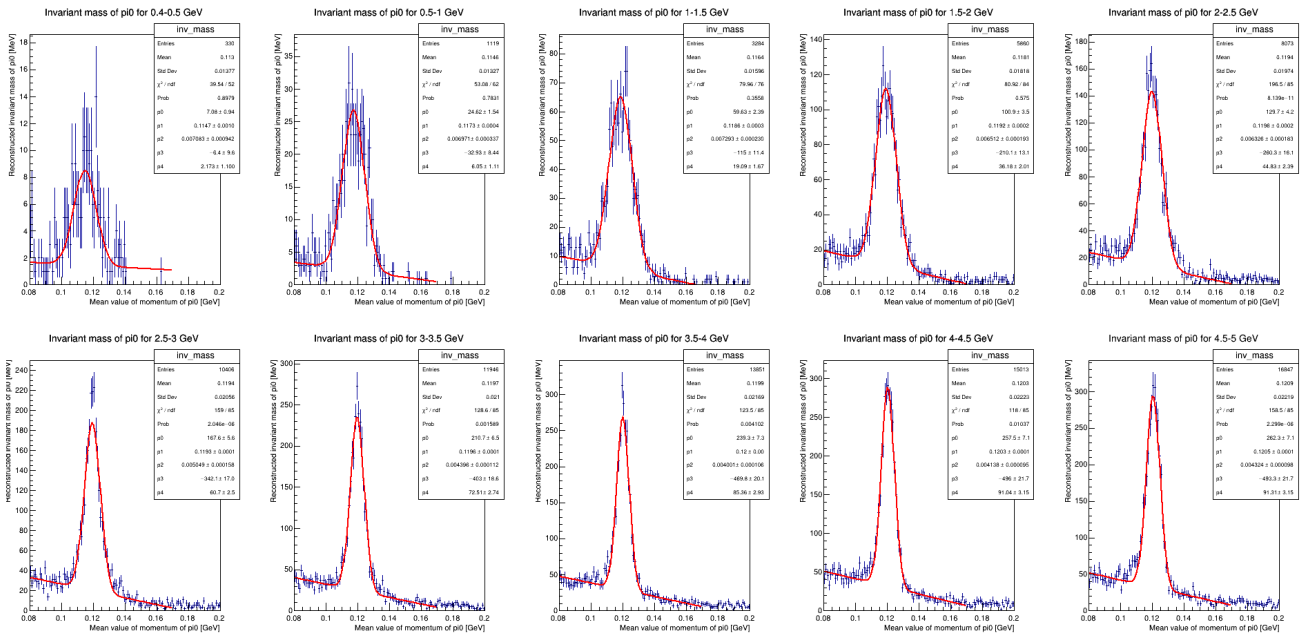


Рисунок 5 — Аппроксимация спектров инвариантных масс π^0 для различных начальных энергий

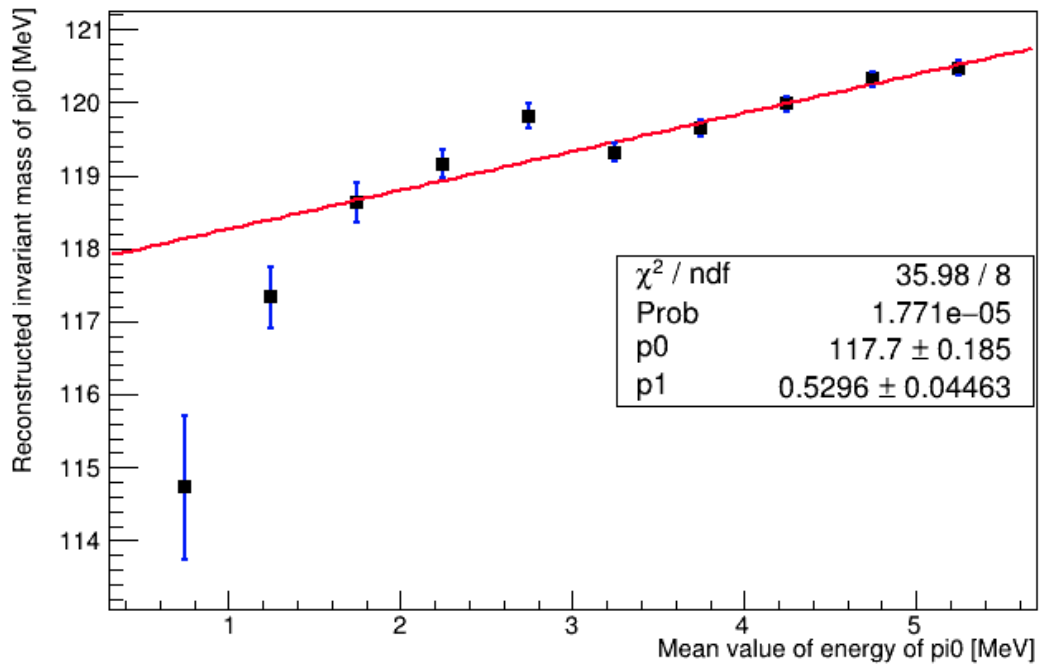


Рисунок 6 — зависимость инвариантной массы π^0 от его начальной энергии

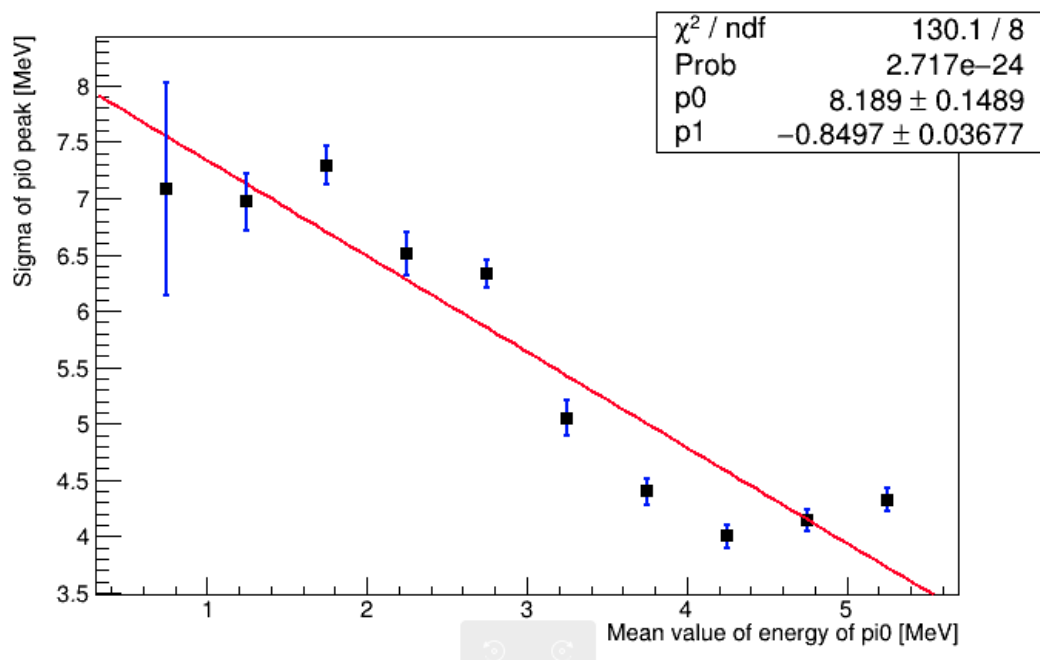


Рисунок 7 — Величина ширины мезонного пика для различных энергий π^0

Полученные данные наглядно показывают, что отклик детектора зависит от множества параметров. В том числе от вклада нелинейности детектора.

Мною были подобраны первичные значения параметров для функции нелинейности: $par_0 = -36.4 \cdot 10^{-3}$, $par_1 = 1.81$, $par_2 = -0.016$, $par_3 = 6.435 \cdot 10^{-3}$.

Однако для подбора наиболее оптимального значения параметров необходимо проварьировать значения. Мною было выбрано варьирование параметров

в диапазоне $\pm 9\%$ от исходного значения с шагом в 3% .

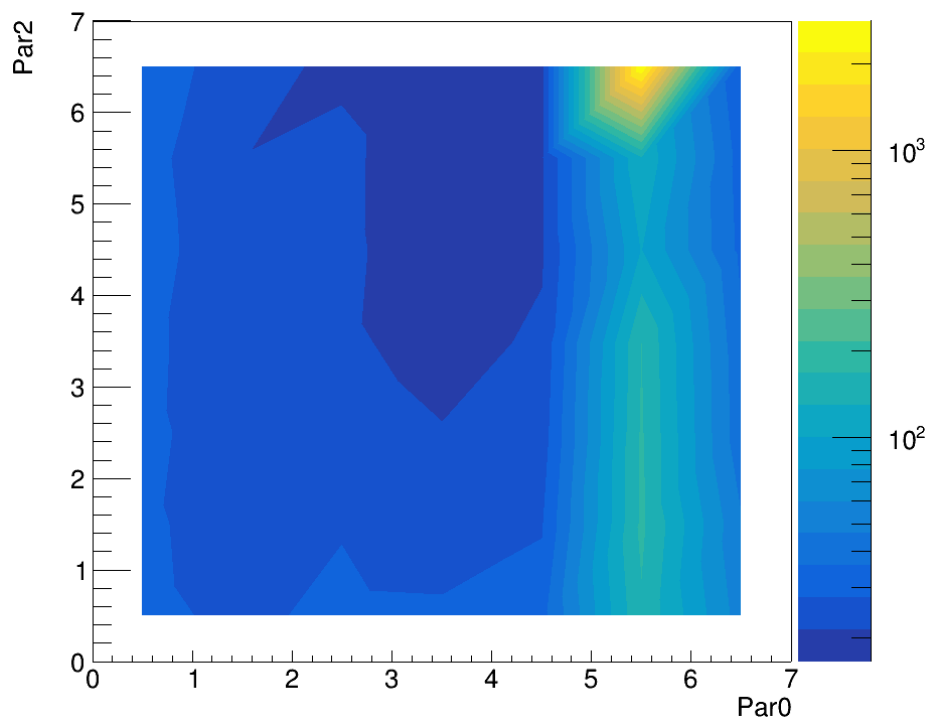


Рисунок 8 — значения χ^2 для варьирования параметров par_0 и par_2

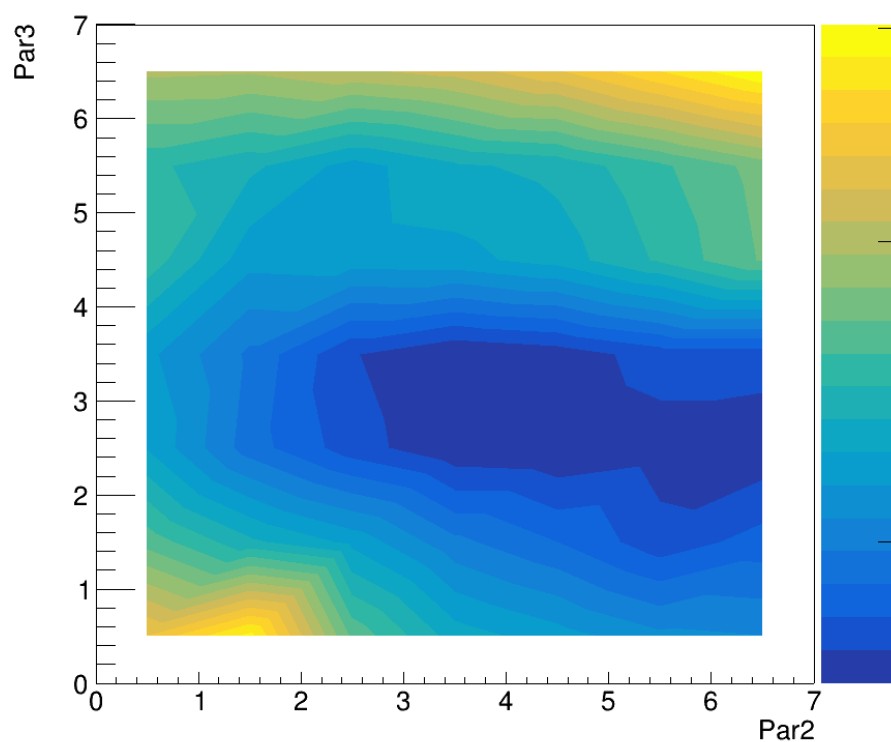


Рисунок 9 — значения χ^2 для варьирования параметров par_2 и par_3

Из полученных данных можно сделать вывод, что параметр 3 был изначально подобран максимально корректно, при этом параметр 0 и 2 следует

изменить. Параметр 1 не варьировался, тк он отвечает за линейный сдвиг функции, тем самым не оказывая существенного влияния на поведение функции, при анализе параметр задается вручную.

Итоговые значения параметров функции нелинейности принимают вид: $par_0 = -0.0364$, $par_1 = 1.17828$, $par_2 = -0.0174617$, $par_3 = 0.006435$.

Сама зависимость примет вид:

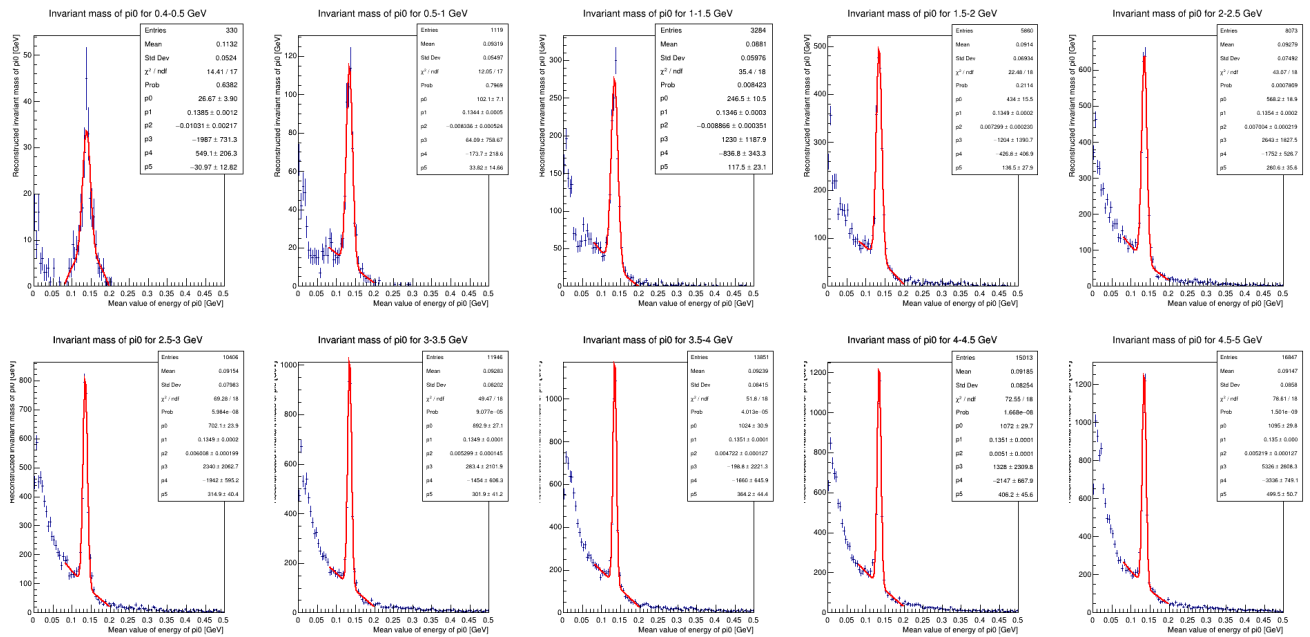


Рисунок 10 — Аппроксимация спектров инвариантных масс π^0 для различных начальных энергий с учетом функции нелинейности

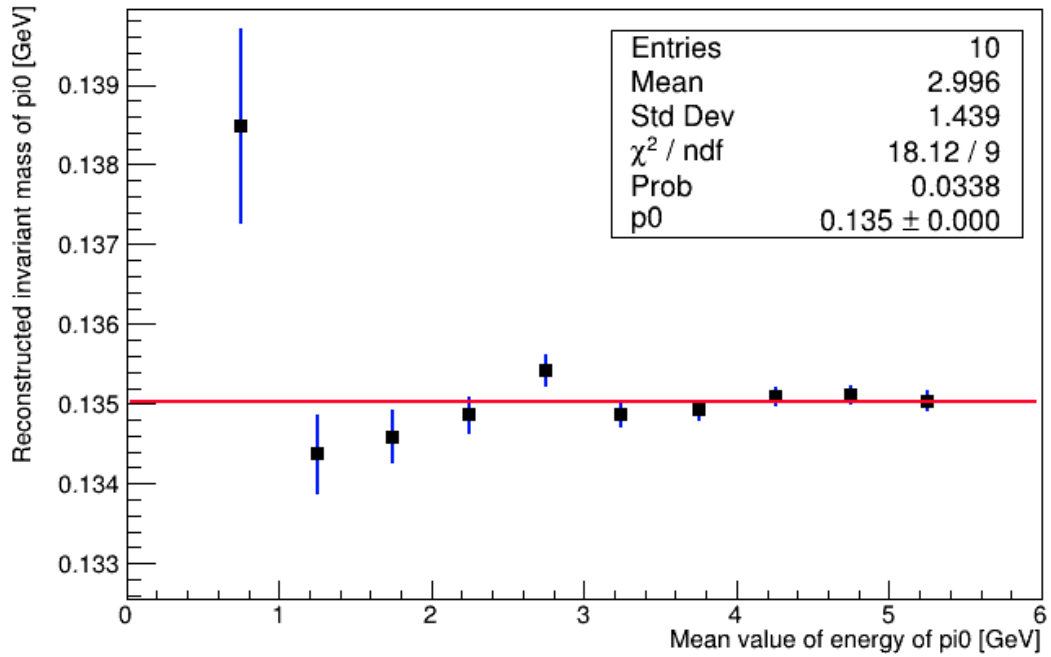


Рисунок 11 — зависимость инвариантной массы π^0 от его начальной энергии с учетом функции нелинейности

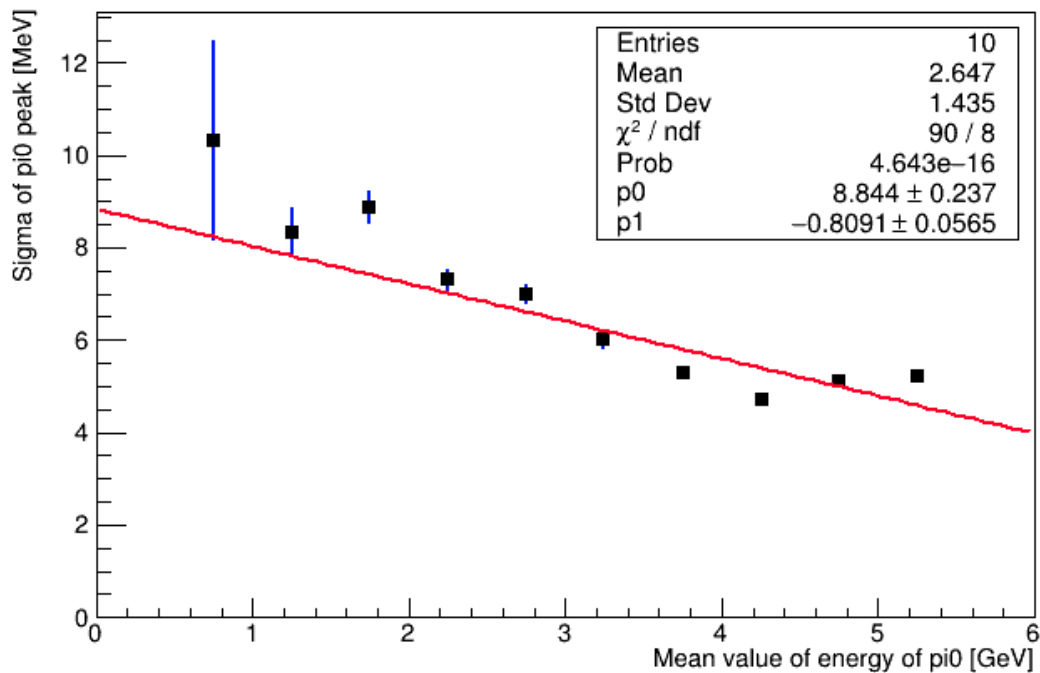


Рисунок 12 — Величина ширины мезонного пика для различных энергий π^0 с учетом функции нелинейности

На графике видно отклонение положения мезонного пика при значениях энергии пиона 0.4-0.5 ГэВ. Данная энергия является нижней границей работы детектора, из-за чего из 10.000 событий удается зарегистрировать малую часть от всего объема статистики. Пренебрегая отклонением на малых энергиях, мож-

но сделать вывод, что функция нелинейности, в пределах погрешности, сделала устойчивым значение положения π^0 пика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы были сгенерированы и обработаны данные в среде для симуляции физического эксперимента ALICE RUN3 O2. В рамках данной работы были восстановлены значения координаты положения мезонного пика и их ширины с нелинейным откликом детектора, получены спектры инвариантных масс. В результате проделанной работы определена функция нелинейности детектора PHOS в среде O2. Были подобраны начальные параметры данной функции, также, с помощью вариации значений, были более точно определены наиболее оптимальные значения параметров. Корректность выбранных параметров была подтверждена результатом вида зависимости восстановленной инвариантной массы π^0 от энергии родительской частицы.

В будущем полученные данные будут проверены на реальных данных, для проверки симуляции физического эксперимента в O2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Gustafsson H.-A.* The ALICE experiment at the CERN LHC // Journal of Instrumentation. — 2008. — т. 3. — с. 88—91.
2. *Howard A.* Geant4 User's Guide for Application Developers. — 2007.
3. *Halterman R. L.* Fundamentals of Programming C++. — School of Computing Southern Adventist University, 2018.
4. *Acharya S.* Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment // Journal of instrumentation. — 2019. — т. 14.
5. *Berger F.* Particle identification in modular electromagnetic calorimeters. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1992. — с. 152—164.
6. GEANT4—a simulation toolkikt. GEANT4. A Simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A. — 2003. — т. 506, № 3. — с. 250—303.