

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ РЕКОНСТРУКЦИИ  
НЕЙТРАЛЬНЫХ  $\pi$ -МЕЗОНОВ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА  
ЭКСПЕРИМЕНТА MRD/NICA**

Студент \_\_\_\_\_ А. А. Каюков

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Д. С. Блау

Москва 2020

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ РЕКОНСТРУКЦИИ  
НЕЙТРАЛЬНЫХ  $\pi$ -МЕЗОНОВ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА  
ЭКСПЕРИМЕНТА MRD/NICA**

Студент	_____ А. А. Каюков
Научный руководитель, к.ф.-м.н.	_____ Д. С. Блау
Рецензент, к.ф.-м.н.	_____ Д. Ю. Пересунько
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

# РЕФЕРАТ

Отчет 31 с., 26 рис., 2 табл., 9 источн.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Ядро-ядерные столкновения, эксперимент MPD, электромагнитная калориметрия, идентификация фотонов, Монте-Карло моделирование, нейтральные мезоны

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

При помощи среды MPDRoot и генератора UrQMD разработать алгоритмы для реконструкции нейтральных  $\pi$ -мезонов.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ

- 1) Программный пакет MPDRoot;
- 2) Генератор ядро-ядерных событий UrQMD
- 3) Метод реконструкции нейтральных мезонов с помощью построения инвариантных масс кластеров в калориметре;
- 4) Методы идентификации: по дисперсии кластера, по соответствию кластера и экстраполированного трека заряженной частицы, по времени пролета;

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Получены критерии идентификации нейтральных кластеров. Подсчитаны эффективность и отношение сигнала к фону при регистрации нейтральных  $\pi$ -мезонов.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Техническое описание эксперимента.</b>	<b>6</b>
1.1 Устройство комплекса «NICA» . . . . .	6
1.2 Дизайн установки МРД. . . . .	8
1.3 Конструкция калориметра ECal. . . . .	9
<b>2 Программное обеспечение</b>	<b>12</b>
2.1 UrQMD . . . . .	12
2.2 MPDRoot . . . . .	12
<b>3 Симуляция событий в детекторе МРД</b>	<b>14</b>
<b>4 Реконструкция и кластеризация событий</b>	<b>16</b>
4.1 Реконструкция треков . . . . .	16
4.2 Кластеризация событий в калориметре . . . . .	17
<b>5 Критерии отбора нейтральных кластеров</b>	<b>18</b>
5.1 Вето на заряженные треки . . . . .	18
5.2 Критерий на дисперсию кластера . . . . .	22
5.3 Критерий на время пролета частицы . . . . .	24
<b>6 Результаты наложения критериев</b>	<b>28</b>
6.1 Фитирование . . . . .	28
6.2 Применение всех критериев . . . . .	28
<b>7 Заключение</b>	<b>30</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>31</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена разработке критериев идентификации фотонов на калориметре ECal, эксперимента MPD в рамках проекта «Комплекс NICA». Целью проекта «Комплекс NICA» [1] является создание экспериментальной базы мирового уровня для проведения фундаментальных исследований по ряду наиболее значимых вопросов современной физики высоких энергий и выполнения актуальных прикладных исследовательских работ.

Исследования на комплексе NICA охватывают широкий круг явлений, связанных со структурой сильновзаимодействующей материи и проявляющихся в реакциях с участием тяжелых ионов, поляризованных адронов и легких ядер. Основным направлением программы исследований является поиск и экспериментальное исследование фазовых переходов и критических явлений в сильновзаимодействующей ядерной материи при экстремальных барионных плотностях. Достигаемая барионная плотность существовала только на ранних этапах рождения Вселенной и существует также в ядрах нейтронных звезд. Энергетический диапазон комплекса позволяет изучать образование кварк-глюонной плазмы и вести поиск критической точки, возле которой, предположительно, возможны аномальные эффекты.

Экспериментальная установка MPD [2] предназначена для проведения экспериментов на встречных пучках тяжелых ионов коллайдера NICA по детальному исследованию фазовой диаграммы КХД в области высоких плотностей и температур, включая поиск основных состояний адронной материи и фазовые переходы. С этой целью планируется изучать [3]:

- выход странных частиц, барионов и антибарионов;
- пособытийную флуктуацию множественного рождения частиц, поперечного импульса, отношения выходов частиц;
- анизотропные и коллективные потоки;
- импульсные корреляции;

- рождение лептонных пар и мягких фотонов;
- поляризационные явления.

Калориметр ECal является одним из детекторов эксперимента MPD. Его главное назначение – измерение координаты и энергии электронов и фотонов, рожденных в столкновениях тяжелых ионов. Благодаря высокому временному разрешению калориметр играет важную роль в идентификации частиц. Кроме того, детектор будет использоваться для измерения полного потока энергии, который, в немалой степени, отражает начальные условия, достижимые в столкновениях тяжелых ионов на установке NICA [2]. Таким образом, цель ECal заключается в измерении пространственного положения и энергии фотонов и электронов для того, чтобы:

- исследовать фемтоскопические корреляционные эффекты в двух- и четырех- фотонных распределениях;
- получить новые экспериментальные данные о выходе нейтральных мезонов в Au+Au столкновениях по фотонным инвариантным массам;
- изучить прямые фотоны в столкновениях Au+Au;

Идентификация нейтральных кластеров позволит уменьшить фон и улучшить систематические ошибки при вычислении числа  $\pi^0$ , тем самым улучшив сигнал от прямых фотонов.

# 1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.

## 1.1. УСТРОЙСТВО КОМПЛЕКСА «NICA».

Ускорительная часть проекта NICA предполагает создание на базе модернизированного ускорителя Нуклотрон уникального комплекса, позволяющего проводить исследования[4]:

- На встречных высокоинтенсивных пучках ионов, вплоть до золота при энергиях вплоть до  $\sqrt{s} = 11$  ГэВ;
- На встречных пучках поляризованных протонов и дейтронов при энергиях до  $\sqrt{s} = 12.6$  ГэВ;
- На выведенных пучках тяжелых ионов и поляризованных частиц для энергий от 2 до 6 ГэВ;

Ускорительный комплекс NICA состоит из двух инжекционных цепочек лёгких и тяжёлых ионов, синхротронов Бустера и Нуклотрона, двух накопительных колец Коллайдера и каналов транспортировки между этими элементами[1].

Инжекционная цепочка легких ионов создает, ускоряет и транспортирует ионы в Нуклотрон; инжекционная цепочка тяжелых ионов также обеспечивает ими Бустер, из которого они после ускорения транспортируются в Нуклотрон. Нуклотрон обеспечивает пучками ионов широкого спектра (от протонов до золота) установки для прикладных исследований, эксперимент BM@N и коллайдер через соответствующие каналы транспортировки частиц. Основной установкой комплекса, обеспечивающей проведение экспериментов на установках MPD и SPD, является коллайдер. Он представляет собой два расположенных друг над другом накопительных кольца с двумя точками столкновения пучков. Столкновения пучков проводятся под нулевым углом.

Инжекционная цепочка лёгких ионов предназначена для инжекции



Рисунок 1.1 — Схема комплекса NICA

в нуклотрон пучков различных ионов – от протонов до магния, поляризованных пучков протонов с энергией до 12 МэВ и дейтронов с энергией до 6 МэВ/н. Инжекционная цепочка тяжелых ионов предназначена для инъекции в бустер пучков ионов вплоть до золота с энергией до 3.24 МэВ/н.

Синхротрон «Бустер» является основным инжектором тяжелых ионов в нуклотрон. Его основными задачами являются:

- накопление ионов при энергии инъекции (до  $2 \cdot 10^9$  ионов  $^{197}\text{Au}^{31+}$ );
- эффективное ускорение не полностью ободранных ионов благодаря достижению ультравысокого вакуума в пучковой камере;
- формирование требуемого фазового объема пучка с использованием системы электронного охлаждения;
- ускорение тяжёлых ионов до энергии, требуемой для их эффективной обдирки;
- быстрый (однооборотный) вывод ускоренного пучка для его инъекции в Нуклотрон.

Сверхпроводящий синхротрон нуклотрон является основным ускорителем комплекса NICA и работает в одном из трех режимов:

- 1) ускорение тяжелых ионов для накопления в коллайдере;
- 2) ускорение поляризованных пучков протонов или дейтронов для накопления в коллайдере;
- 3) ускорение различных типов ионов для проведения экспериментов на



внутренней мишени и фиксированных мишенях в экспериментальном зале.

Коллайдер комплекса NICA обеспечивает проведение экспериментов в режиме сталкивающихся пучков. Кольца коллайдера имеют форму стадиона с периметром 500 м и располагаются одно над другим на расстоянии 0.3 м. В прямолинейных секциях коллайдера располагаются детекторы MPD и SPD.

## 1.2. ДИЗАЙН УСТАНОВКИ MPD.

Детекторы установки должны обеспечить эффективную идентификацию продуктов соударения ядер и измерение их параметров при высоких нагрузках в широком диапазоне фазового пространства. В связи с этим установка включает [2]:

- систему измерения импульса частиц в диапазоне  $p = 0.1 - 0.2$  ГэВ;
- систему идентификации частиц для разделения протонов,  $\pi$ -мезонов, К-мезонов и электронов в диапазоне импульсов  $0.1 - 3$  ГэВ/с;
- систему восстановления первичной вершины взаимодействия с точностью 100–200 мкм и вторичных вершин распада с точностью 10–20 мкм;
- возможность регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий 50–2000 МэВ.

Детектор состоит из цилиндрической и торцевой частей. Все они расположены в магнитном поле. Цилиндрическая часть состоит из различных типов детекторов, расположенных вокруг области столкновения пучков, которые включают трековую систему, времяпролетную систему и электромагнитный калориметр.

Время-проекционная дрейфовая камера (TRC) является основной трековой системой детектора, её дополняет внутренняя трековая система на основе кремниевых полупроводниковых детекторов (IT), окружающих область соударения пучков. Оба детектора обеспечивают точное восстановление треков частиц и их импульсов, а также определяют вершины распада частиц.

Времяпролетная система (TOF) обеспечивает идентификацию заря-

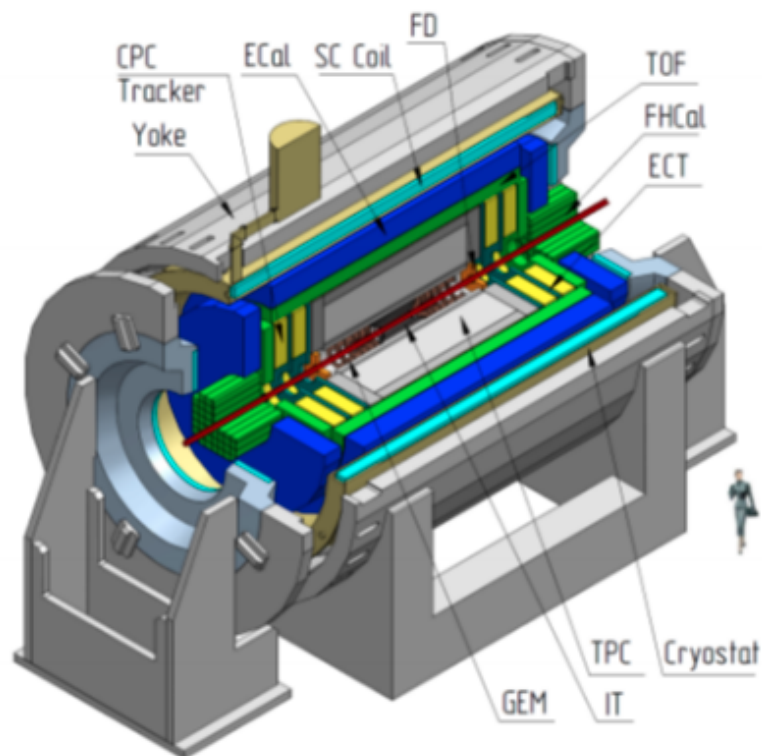


Рисунок 1.2 — Схема установки MPD

женных частиц с импульсами до 2 ГэВ/с в широкой области псевдобыстрот. Быстрый передний детектор (FD) обеспечивает стартовый сигнал для времяпролетной системы и временное разрешение которого не хуже 30 пс.

Для идентификации электронов и фотонов, а также измерения их энергии используется электромагнитный калориметр (EMC).

## 1.3. КОНСТРУКЦИЯ КАЛОРИМЕТРА ECAL.

В детекторе MPD будет использоваться слоистый сцинтилляционный электромагнитный калориметр типа «шашлык» со свинцовым поглотителем. Калориметр будет иметь цилиндрическую структуру и расположен в MPD на радиусе  $R = 1.78$  м., баррельная часть ECal покрывает интервал псевдобыстрот  $-2.5 < \eta < 2.5$ . Основой калориметра будут модули (рис. 1.3), состоящие из 16-ти оптически изолированных башен (рис. 1.4), которые считываются электроникой индивидуально.

Свет от каждой башни проходит через 16 продольно проникающих

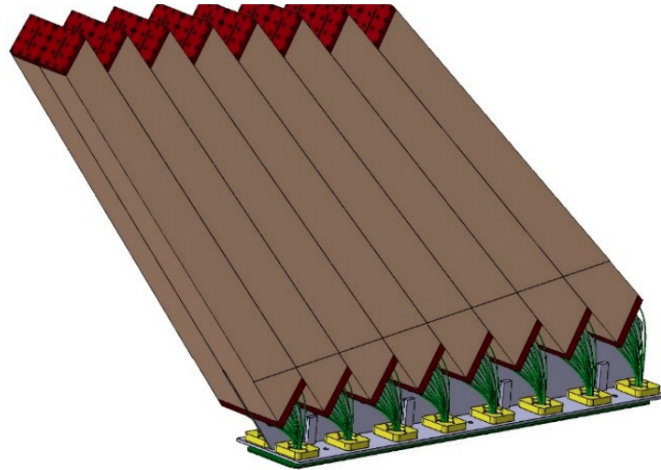


Рисунок 1.3 — Один модуль калориметра ECal.

волокон, сдвигающих длину волны. Продольный размер модуля ограничен конструкцией MPD. Поперечное сечение составляет  $400 \text{ мм}^2$  для активной среды и  $150 \text{ мм}^2$  для фотодетекторов.[5]

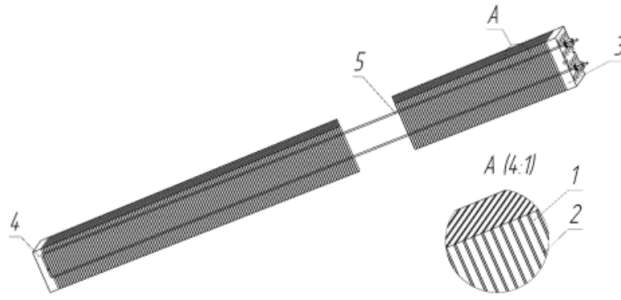


Рисунок 1.4 — Принципиальная схема башни калориметра ECal, где 1 — сцинтилляционная пластина, 2 — свинцовая пластина, 3 и 4 — сдвливающие пластины, 5 — натягивающая струна.

Каждый модуль имеет наклон в зависимости от положения относительно оси пучка — Z. Наклон выбран таким образом, чтобы отклонение точки прицеливания от центра MPD было минимальным (рис 5). [6]

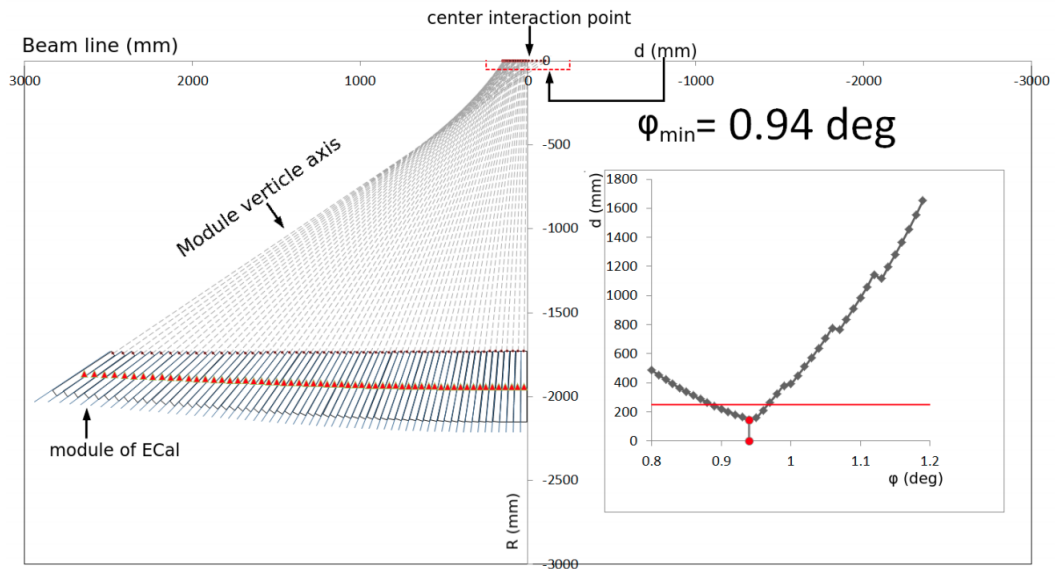


Рисунок 1.5 — Расстояние от центральной точки взаимодействия ( $d$ ) до пересечения вертикальных осей модуля с линией луча в зависимости от полярного угла резки каждого модуля.

## 2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

### 2.1. URQMD

Для моделирования использовался программный генератор UrQMD. UrQMD (Ultra relativistic Quantum Molecular Dynamics) [7] - это генератор адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействий, основанный на ультра-релятивистской квантовой молекулярной динамике в рамках теории цветных струн. Он предназначен для моделирования взаимодействий тяжелых ионов. В рамках этого генератора изучается широкий круг эффектов, связанных с тяжелыми ионами: от мультифрагментации и коллективного движения до образования конечных частиц и корреляций между ними.

Модель UrQMD позволяет симулировать столкновения частиц в диапазоне энергий  $\sqrt{s}$  от 2 ГэВ до 100 ГэВ. Для низких и промежуточных энергий адрон-адронные и ядро-ядерные столкновения описываются в терминах взаимодействий между адронами и их возбужденными состояниями. При высоких энергиях учитываются кварковая и глюонная степени свободы и вводится понятие возбуждения цветных струн с последующей их фрагментацией в адроны.

### 2.2. MPDR00T

Целями экспериментальных вычислительных сред проекта «NICA» являются моделирование столкновений с реалистичным откликом детектора, а также реконструкция и анализ данных, поступающих от имитированных и реальных взаимодействий. Программные среды для каждого эксперимента проекта NICA – MPD, BM@N и SPD, соответственно называются MPDR00t, BMNR00t и SPDR00t и отличаются только описанием различных наборов детекторов [8]. Эти среды наследуются от структуры CBMR00t, имеют такую же структуру и используют ROOT, FAIRR00t,

FAIRsoft как внешние пакеты. Пакет FAIRsoft включает в себя внешние пакеты для разработки программного обеспечения, такие как BOOST, GSL, GEANT4(3), Millepede и ZeroMQ.

Одной из особенностей оболочки MPDRoot является метод описания геометрии детектора. Ввод информации в этом методе осуществляется в формате геометрии Root. Введенные данные о геометрии детектора, его материалах и параметрах сохраняются затем в базе данных внутри MPDRoot.

Для реалистичного моделирования физических процессов в оболочке обеспечен ввод данных от различных Монте-Карло генераторов событий ядро-ядерных столкновений, таких как UrQMD и FastMC и др. Также в оболочке предусмотрен механизм, моделирующий наложение фоновых событий на исследуемое распределение.

### 3. СИМУЛЯЦИЯ СОБЫТИЙ В ДЕТЕКТОРЕ MRD

На генераторе UrQMD было сгенерировано 100 тыс. событий столкновений  $Au_{97}^{179} + Au_{97}^{179}$  при нормально распределенном прицельном параметре в диапазоне от 0 до 15 фм и  $\sqrt{s} = 11$  ГэВ. На основе сгенерированных данных была построена зависимость множественности числа  $\pi^0$  от прицельного параметра (рис. 3.1).

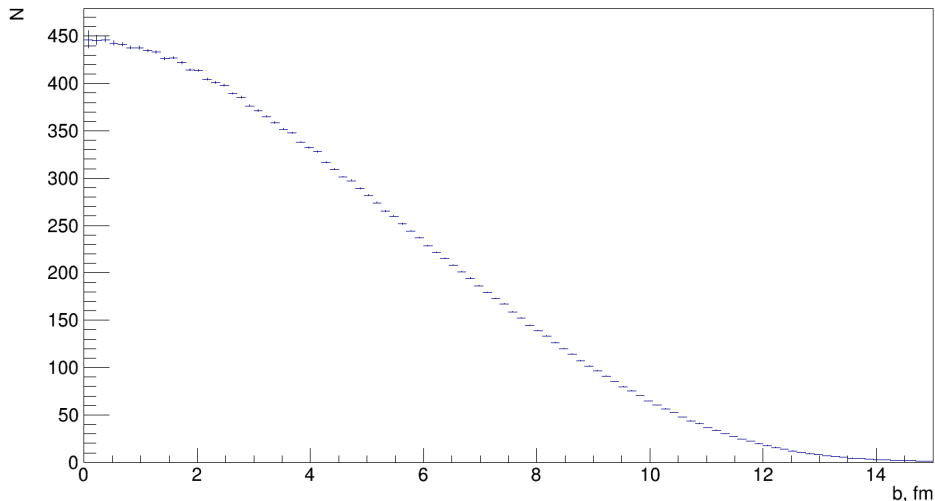


Рисунок 3.1 — Зависимость множественности  $\pi^0$  от прицельного параметра при энергии столкновения  $\sqrt{s} = 11$  ГэВ

Из-за ограниченности мощностей используемого оборудования в симуляции детектора, использовались только 10 тыс. событий. В связи с тем, что искомый пик нейтральных  $\pi$  - мезонов проявляется только на порядке 100 тыс. событий, к каждому событию с помощью генератора VOX было искусственно добавлено по 200 изотропно распределенных нейтральных  $\pi$  - мезонов в диапазоне поперечного импульса  $P_{\perp} \in (0.25 - 2.00)$  GeV/c. На рис. 3.2 представлены полученные распределения поперечного импульса  $\pi^0$  для каждого из перечисленных генераторов и их суперпозиции для 10 тыс. событий.

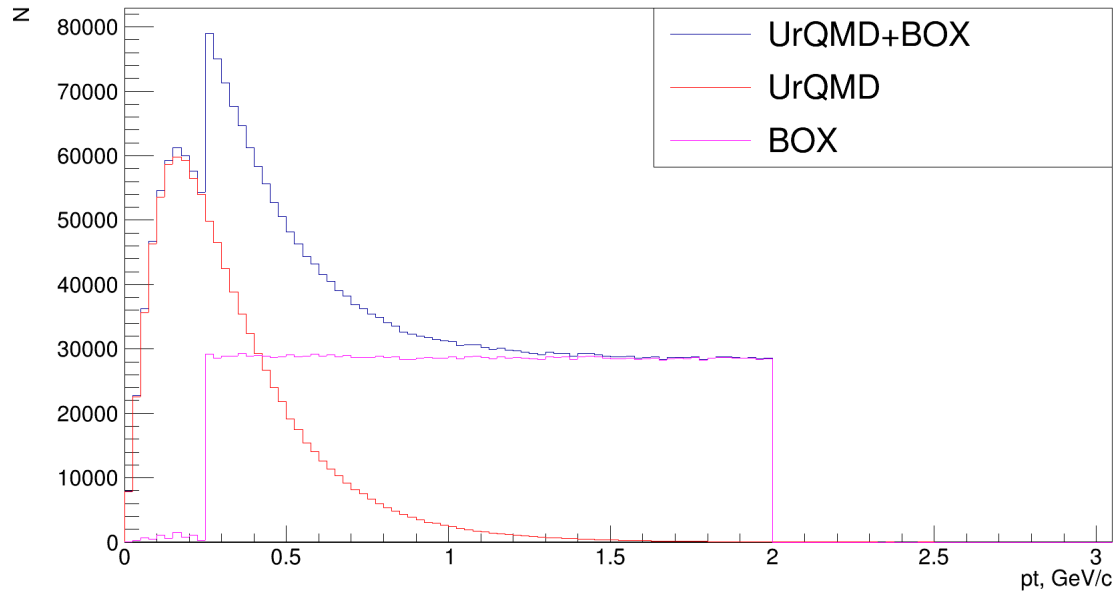


Рисунок 3.2 — Распределения поперечного импульса при использовании генераторов UrQMD и BOX.

Полученные данные о генерации событий использовались для симуляции детектора MPD с помощью пакетов программ MPDRoot и Geant 4.



# 4. РЕКОНСТРУКЦИЯ И КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СОБЫТИЙ

## 4.1. РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКОВ

Реконструкция событий – это процесс интерпретации электронных сигналов, генерируемых детектором, для определения исходных частиц, которые прошли через них, их импульсов, направлений и первичной вершины события. Реконструкция событий в трековом детекторе состоит из следующих основных этапов:

- Реконструкция хитов в субдетекторах
- Реконструкция трека
- Поиск вершин
- Идентификация частиц

Общий подход к проблеме реконструкции трека частицы основан на методике фильтрации Калмана. Фильтр Калмана представляет собой набор математических уравнений, которые обеспечивают эффективное вычислительное (рекурсивное) решение методом наименьших квадратов.

Алгоритм начинается с отслеживания кандидатов в треки, для которых оцениваются вектора исходных параметров и ковариационные матрицы. Затем, каждый трек распространяется на некоторую поверхность (детектор или промежуточную точку). Новая ковариационная матрица может быть получена с использованием матрицы преобразования Якоби, то есть матрицы производных параметров распространяемого трека по текущим параметрам.

Первичная вершина находится путем экстраполяции всех первичных треков обратно в начало координат, и её разрешение определяется как среднеквадратическое значение распределения экстраполяции первичных треков в начале координат. Среднее значение этого распределения – позиция вершины.

## 4.2. КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СОБЫТИЙ В КАЛОРИМЕТРЕ

Кластер - это группа соседних ячеек, значения энергии в которых превышают пороговое значение шума, считая смежными любые два модуля, которые имеют общую сторону или угол.

Процесс кластеризации состоит из нескольких частей. Во-первых, все ячейки с амплитудами сигнала выше порога шума (0.0015 ГэВ) располагаются в соответствии с их энергиями в порядке убывания, и вокруг первой ячейки формируется кластер, значение которого должно быть больше, чем 0.010 ГэВ. Затем в качестве кластерного центра берется следующая неиспользуемая ячейка, вокруг которой формируется кластер и так далее. Если одна из ячеек, принадлежащих кластеру, имеет значение энергии больше, чем 0.010 ГэВ, и в то же время ее сигнал выше, чем сигналы всех соседних ячеек, по крайней мере, на определенное значение 0.015 ГэВ, то эта ячейка помечается как локальный максимум.

Дальнейший анализ зависит от количества локальных максимумов в кластере. Если в кластере есть только один максимум, он считается кластером от одной частицы. Если в кластере несколько максимумов, то он принимается за кластер от нескольких перекрывающихся частиц и проводится процедура развертывания кластера [9].

# 5. КРИТЕРИИ ОТБОРА НЕЙТРАЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ

## 5.1. ВЕТО НА ЗАРЯЖЕННЫЕ ТРЕКИ

Для отбора нейтральных кластеров строились распределения разности  $\varphi$ -ой помноженной на расстояние от вершины взаимодействия до кластера и  $z$ -ой координат кластера и ближайшего к данному кластеру экстраполированного трека для кластеров в диапазоне энергий от 0.0 ГэВ до 0.8 ГэВ. Брались кластеры от всех частиц и кластеры, рожденные от  $\pi^0$ . На рис. 5.1 и рис. 5.2 показаны данные распределения энергий от 0.1 до 0.2 ГэВ.

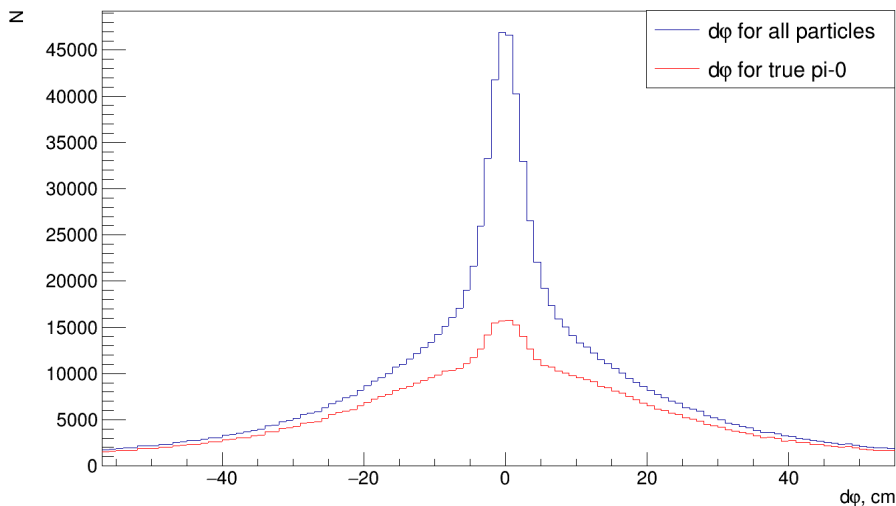


Рисунок 5.1 — Зависимость числа кластеров от разности  $\varphi$ -ых координат кластера и трека помноженных на расстояние от вершины взаимодействия до кластера ( $0.1 < E < 0.2$  ГэВ).

Далее рассматривалось отношение распределения для всех кластеров к распределению для кластеров, рожденных фотонами от распадов  $\pi^0$ . «Дальние концы» этих распределений выходили на постоянное значение, которое было найдено. Отношения распределений представлены на рис. 5.3

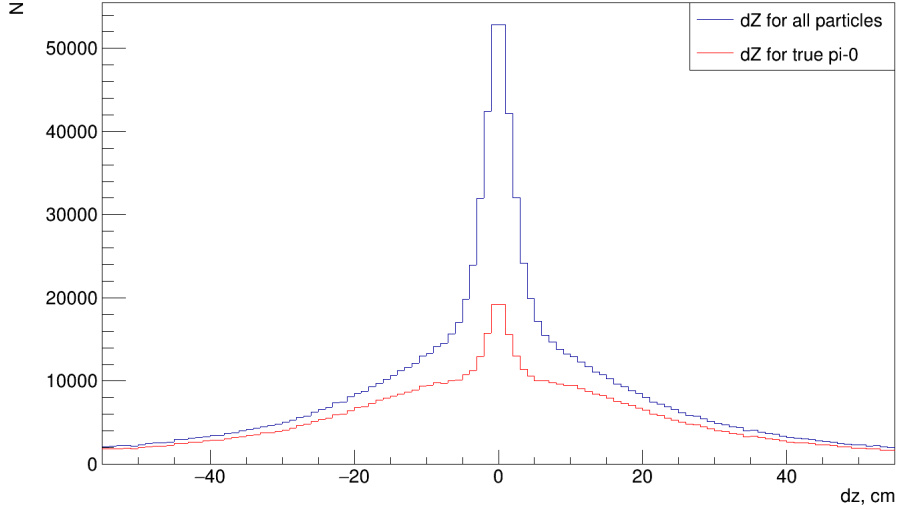


Рисунок 5.2 — Зависимость числа кластеров от разности Z-ых координат кластера и трека ( $0.1 < E < 0.2$  ГэВ).

и рис. 5.4.

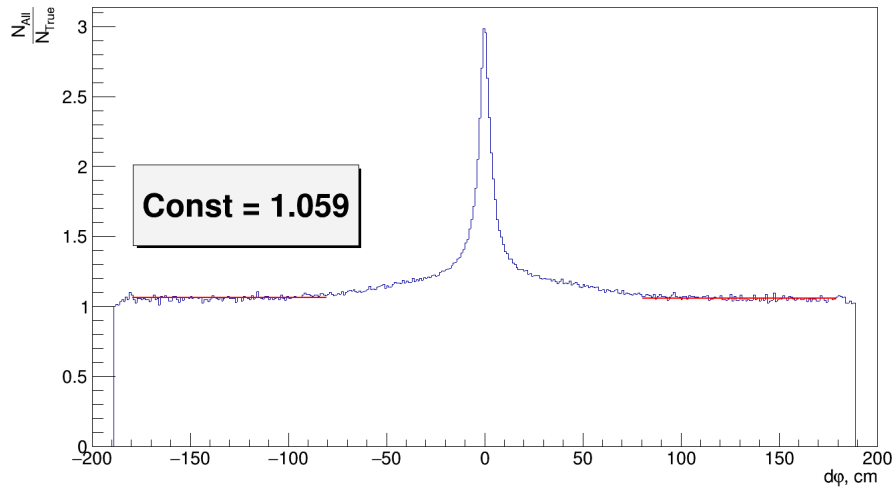


Рисунок 5.3 — Отношение числа всех кластеров к числу кластеров от  $\pi^0$  при разных  $d\varphi$  ( $0.1 < E < 0.2$  ГэВ).

Далее, из распределений для всех кластеров вычиталось распределение кластеров от фотонов от распадов  $\pi^0$ , умноженные на полученные коэффициенты. Полученные распределения фитировались функцией 5.1.

$$N_1 \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x - \mu^2}{\sigma} \right)^2 \right] + \frac{N_2}{(x - a)^2 + b} \quad (5.1)$$

Результаты фитирования представлены на рис. 5.5 и рис. 5.6. Все кластеры что находились ближе к  $\mu$ , чем  $\pm 2 \cdot \sigma$ , принимались за кластеры

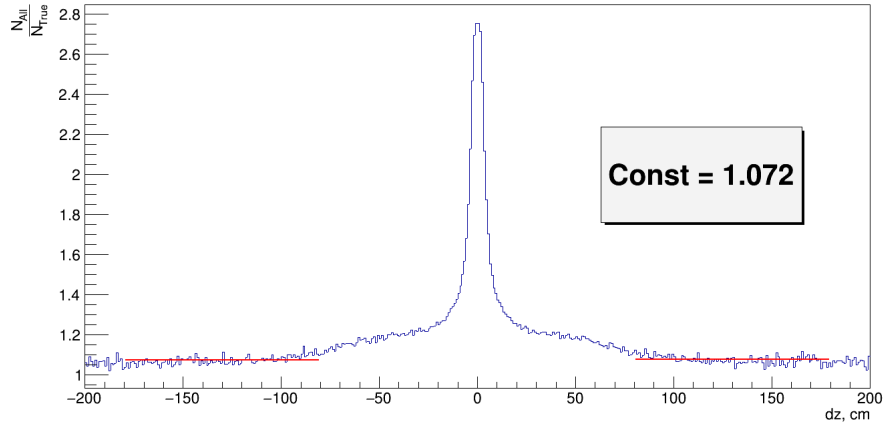


Рисунок 5.4 — Отношение числа всех кластеров к числу кластеров от  $\pi^0$  при разных  $dz$  ( $0.1 < E < 0.2$  ГэВ).

от заряженных частиц и не принимались за нейтральные. Данная процедура проводилась для таких диапазонов энергий кластеров, как  $(0.0, 0.1)$ ,  $(0.1, 0.2)$ ,  $(0.2, 0.3)$ ,  $(0.3, 0.4)$ ,  $(0.4, 0.5)$ ,  $(0.5, 0.6)$ ,  $(0.6, 0.7)$ . Если энергия кластера не попадала в обусловленные диапазоны, то брались параметры из фита для всех энергий.

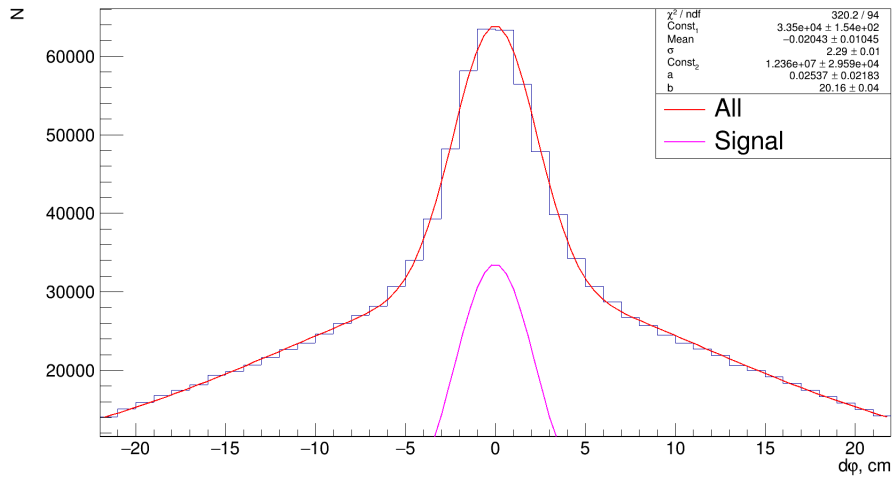


Рисунок 5.5 — Распределение заряженных кластеров по  $d\phi$  ( $0.1 < E < 0.2$  ГэВ).

По разработанному критерию было построено распределение инвариантных масс пар кластеров для поперечных импульсов в диапазонах  $(0.75; 1.00)$ ,  $(1.00; 1.25)$ ,  $(1.25; 1.50)$ ,  $(1.50; 1.75)$ ,  $(1.75; 2.00)$  ГэВ. На рисунках 5.7 и 5.8 представлено распределение для поперечного импульса в диапазонах  $(1.00; 1.25)$  и  $(1.75; 2.00)$  ГэВ, соответственно.

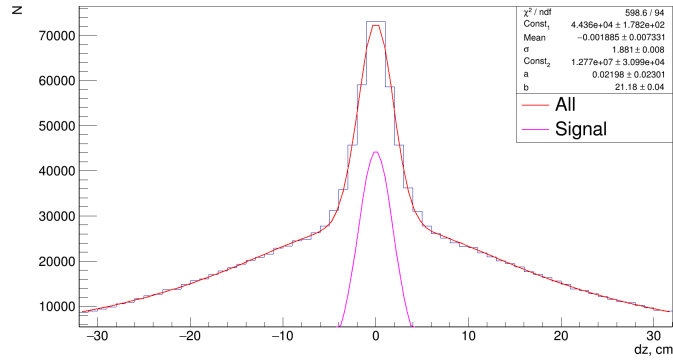


Рисунок 5.6 — Распределение заряженных кластеров по  $dz$  ( $0.1 < E < 0.2$  ГэВ).

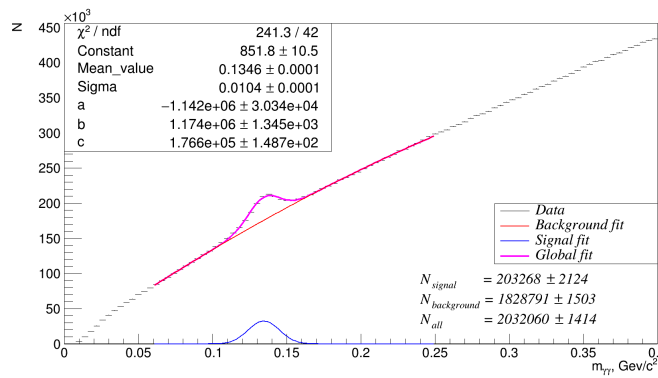


Рисунок 5.7 — Распределение по двухфотонным инвариантным массам при действии критерия на вето заряженных треков ( $1.25 < pt < 1.50$  ГэВ).

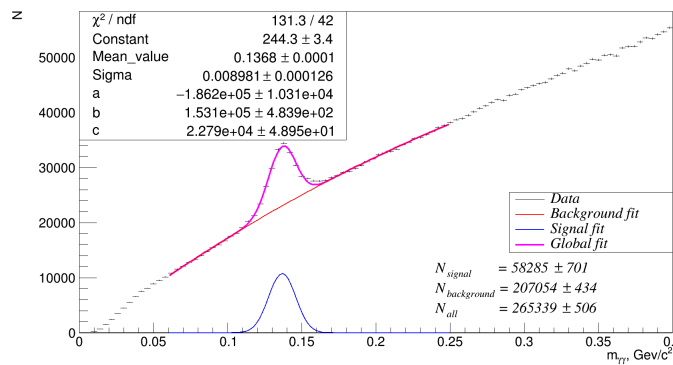


Рисунок 5.8 — Распределение по двухфотонным инвариантным массам при действии критерия на вето заряженных треков ( $1.75 < pt < 2.00$  ГэВ).

## 5.2. КРИТЕРИЙ НА ДИСПЕРСИЮ КЛАСТЕРА

Одним из параметров, характеризующих форму кластера, является форма проекции энерговыделения в ливне на поверхность калориметра (рис. 5.9). Эта поверхность может быть выражена через ковариационную матрицу по формулам 5.2, 5.3 и 5.4.

$$S = \begin{pmatrix} s_{xx} & s_{zx} \\ s_{zx} & s_{zz} \end{pmatrix}, \quad (5.2)$$

где

$$s_{xx} = \langle (x - \bar{x})^2 \rangle, \quad (5.3)$$

$$s_{xz} = \langle (x - \bar{x})(z - \bar{z}) \rangle, \quad (5.4)$$

здесь  $\bar{x}$  и  $\bar{z}$  являются центрами кластеров, а треугольные скобки означают усреднение с логарифмическими весами. Диагонализация этой ковариационной матрицы определит величины главных осей поверхности ливня ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ) как квадратный корень из собственных векторов ковариационной матрицы.

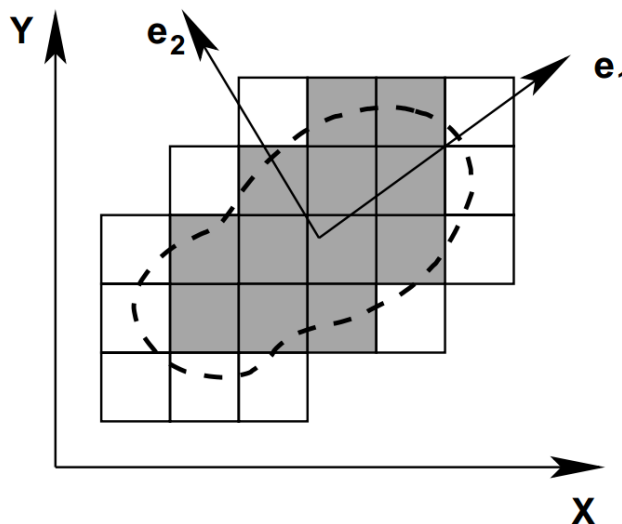


Рисунок 5.9 — Форма кластера

Построив распределения по дисперсиям для различных диапазонов энергий кластеров (рис. 5.10), и профитировав их двумерным распределе-

нием Гаусса (формула 5.5) можно получить еще один критерий для нейтральных кластеров.

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_x \sigma_y} \cdot e^{\left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} - 2r_{xy} \cdot \frac{(x-\mu_x)}{\sigma_x} \cdot \frac{(y-\mu_y)}{\sigma_y} \right) \right]} \quad (5.5)$$

где  $\mu_x, \mu_y$  – средние значения дисперсий;  $\sigma_x, \sigma_y$  – среднеквадратичные отклонения и  $r_{xy}$  – коэффициент корреляции.

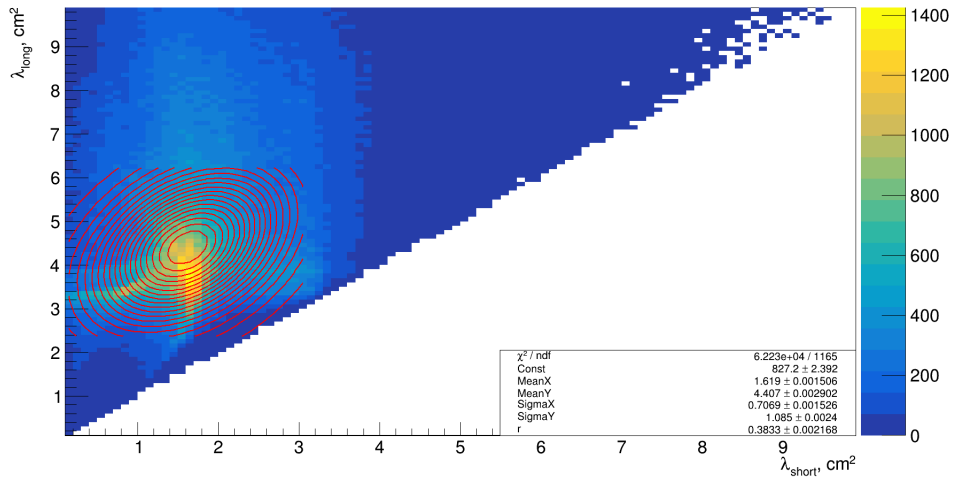


Рисунок 5.10 – Распределение по дисперсиям кластеров ( $0.0 < E < 0.1$ )

За нейтральные кластеры принимаются все кластеры, дисперсии которых удовлетворяют формуле 5.6.

$$-\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(x - \mu_x)^2}{(3 \cdot \sigma_x)^2} + \frac{(y - \mu_y)^2}{(3 \cdot \sigma_y)^2} - 2r_{xy} \cdot \frac{(x - \mu_x)}{3 \cdot \sigma_x} \cdot \frac{(y - \mu_y)}{3 \cdot \sigma_y} \right) < 1 \quad (5.6)$$

Данная процедура проводилась для таких диапазонов энергий кластеров, как (0.0, 0.1), (0.1, 0.2), (0.2, 0.3), (0.3, 0.4), (0.4, 0.5), (0.5, 0.6), (0.6, 0.7), (0.7, 0.8). Если энергия кластера не попадала в обусловленные диапазоны, то брались параметры из фита для всех энергий.

По полученному критерию были заполнены и зафитированы гistogramмы двухфотонной инвариантной массы пар кластеров для диапазонов  $m_T$ , обозначенных в прошлом параграфе. Распределения для некоторых диапазонов показаны на рис. 5.11 и рис. 5.12.



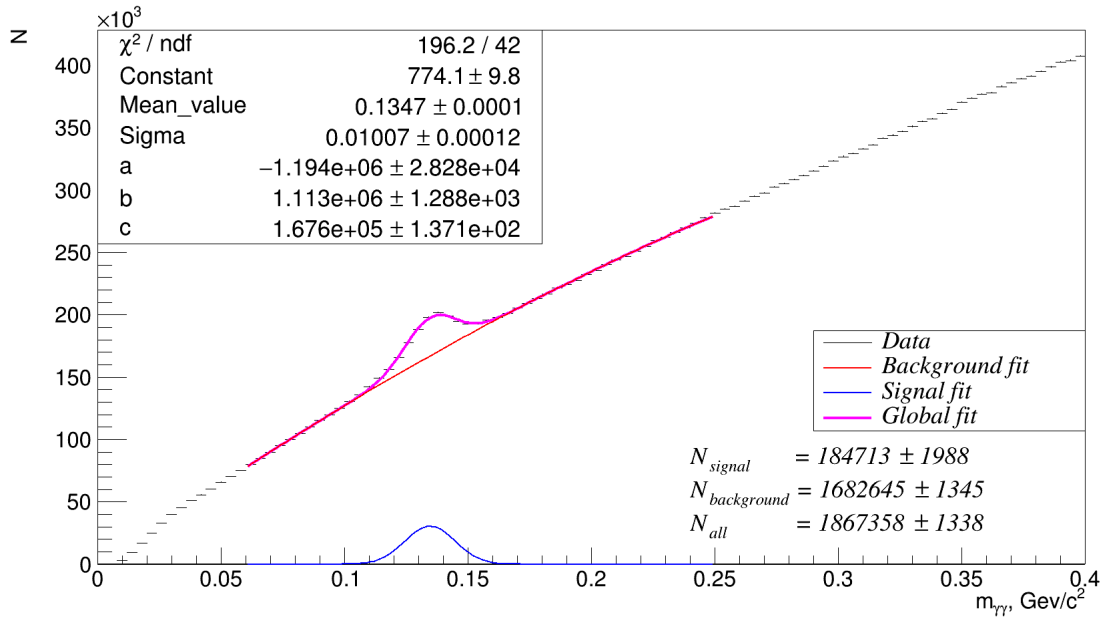


Рисунок 5.11 — Распределение двухфотонных инвариантных масс пар кластеров под действием критерия на дисперсию ( $1.25 < p_t < 1.50$  ГэВ).

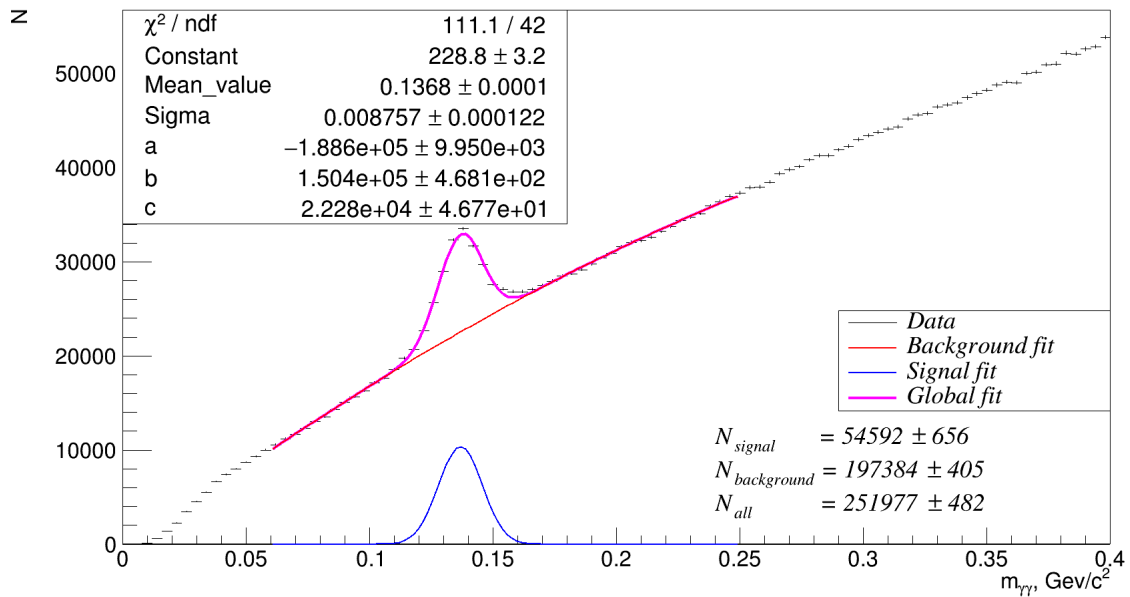


Рисунок 5.12 — Распределение двухфотонных инвариантных масс пар кластеров под действием критерия на дисперсию ( $1.75 < p_t < 2.00$  ГэВ).

## 5.3. КРИТЕРИЙ НА ВРЕМЯ ПРОЛЕТА ЧАСТИЦЫ

Массивные частицы от  $\gamma$ -квантов можно отличить по разнице между измеренным времени пролета частицы до калориметра и ожидаемом вре-

мени пролета  $\gamma$ -кванта, вылетевшего из той же вершины (формула 5.7).

$$\Delta t = t_{clu} - \frac{\Delta r}{c}, \quad (5.7)$$

где  $t_{clu}$  – время, извлекаемое из оцифрованного электроникой калориметра сигнала;  $\Delta r$  – расстояние от кластера до вершины сопоставленного ему трека;  $c$  – скорость света. Из формулы видно, что массивные частицы будут иметь большую величину  $\Delta t$ , чем  $\gamma$ -кванты.

Прежде чем получить распределение времени пролета частицы от центра взаимодействия до кластера, была получена функциональная зависимость временного разрешения модуля калориметра от энергии по результатам ранее проведенных пучковых испытаний, попавшей в него частицы (рисунок 5.13).

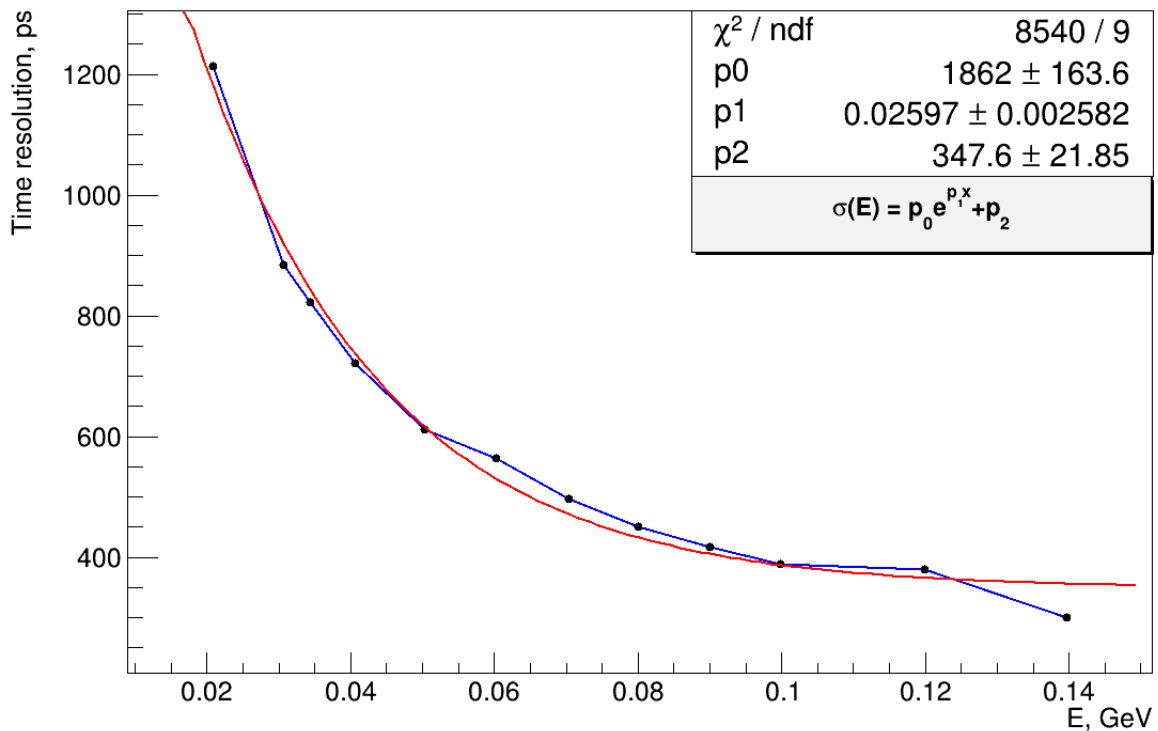


Рисунок 5.13 — Зависимость временного разрешения от энергии кластера

По полученной зависимости проводилось размытие время-пролетного распределения для всех кластеров (рис. 5.14) и для кластеров рожденных  $\pi^0$ .

Распределение для кластеров от  $\pi^0$  фитировалось функцией Гаусса (рис. 5.15), на основании которой был сформулирован критерий на вре-

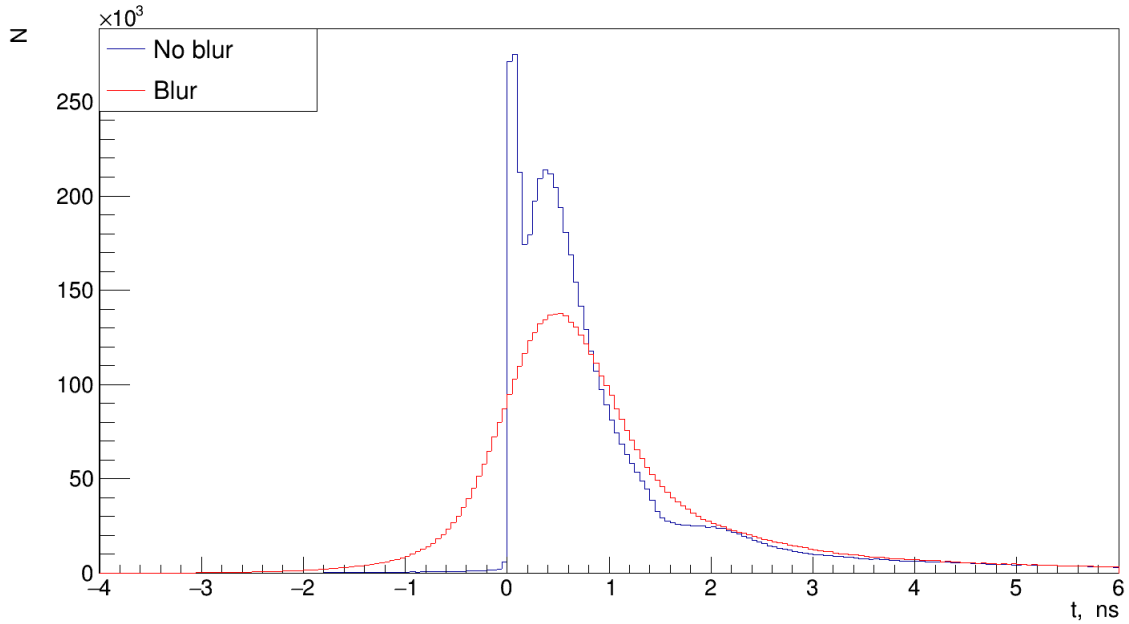


Рисунок 5.14 — Распределение по времени пролета для всех кластеров.

мя пролета частицы: одновременно для каждого кластера в паре должно выполняться соотношение 5.8.

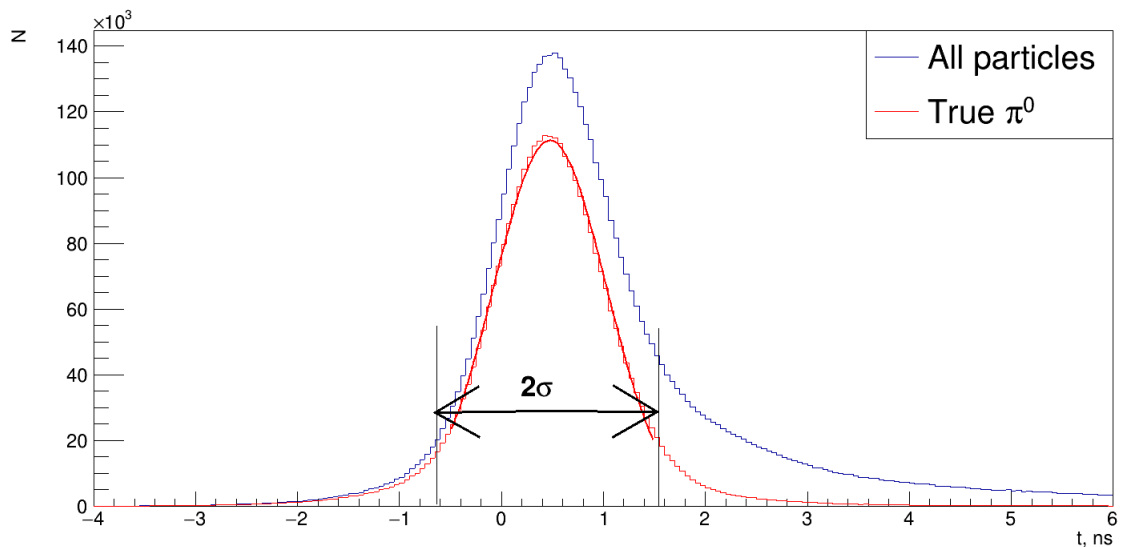


Рисунок 5.15 — Распределение по времени пролета для всех кластеров.

$$\frac{(t - \mu_t)^2}{(1 \cdot \sigma_t)^2} < 2, \quad (5.8)$$

По полученному критерию были заполнены и зафигурованы гистограммы двухфотонной инвариантной массы пар кластеров для диапазонов  $\mu_t$ , обозначенных в прошлом параграфе. Распределения для некоторых

диапазонов показаны на рис. 5.16 и рис. 5.17.

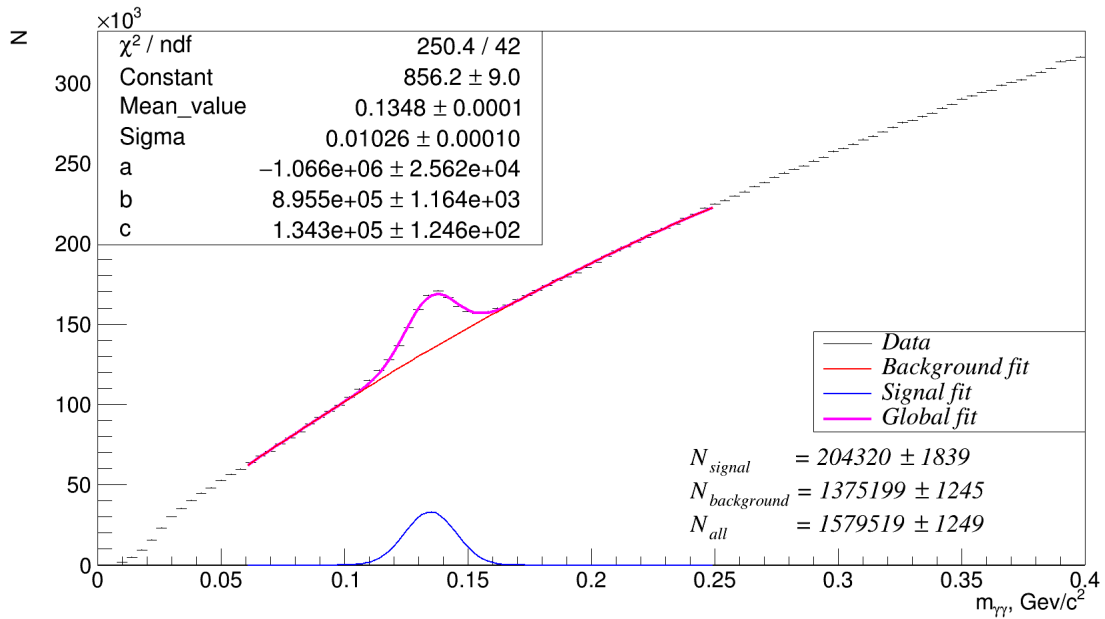


Рисунок 5.16 — Распределение двухфотонных инвариантных масс пар кластеров под действием критерия на время пролета ( $1.25 < p_t < 1.50$  ГэВ).

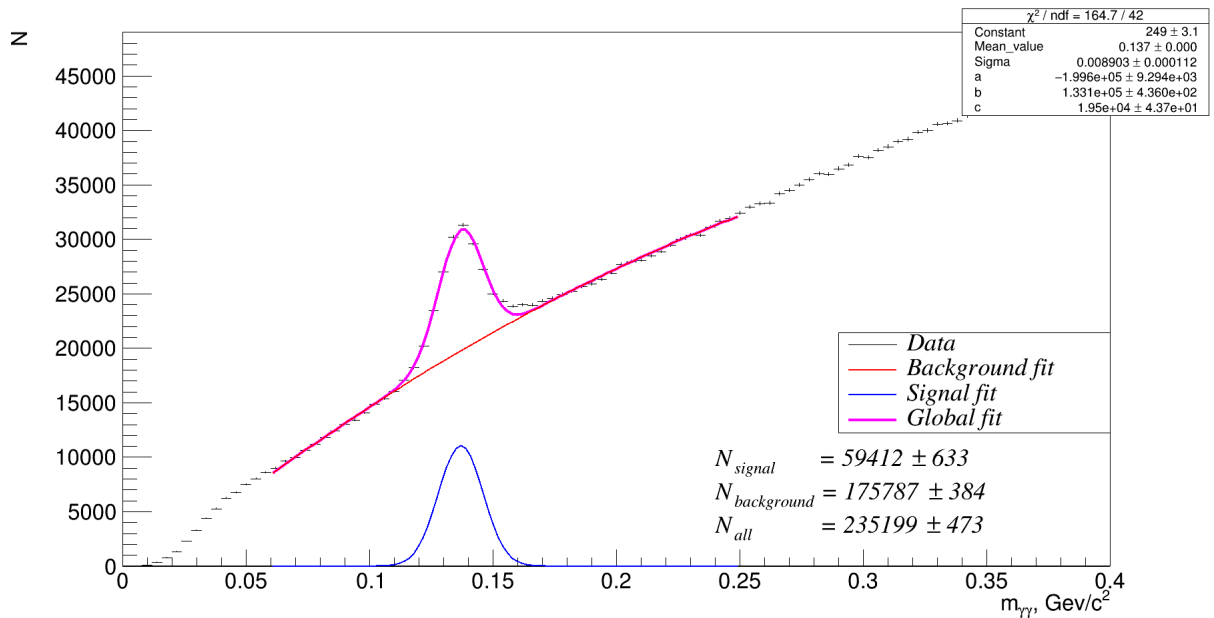


Рисунок 5.17 — Распределение двухфотонных инвариантных масс пар кластеров под действием критерия на время пролета ( $1.75 < p_t < 2.00$  ГэВ).

# 6. РЕЗУЛЬТАТЫ НАЛОЖЕНИЯ КРИТЕРИЕВ

## 6.1. ФИТИРОВАНИЕ

Полученные распределения инвариантных масс фитировались функцией:

$$F(x) = N(\mu, \sigma^2) + a \cdot x^2 + b \cdot x + c, \quad (6.1)$$

где

- $N(\mu, \sigma^2)$  – функция Гаусса, параметрами которой являлись среднее значение, стандартное отклонение и нормировочный коэффициент. Данной функции сопоставляется пик, отвечающий массе  $\pi^0$ ;
- $a \cdot x^2 + b \cdot x + c$  – полином второй степени с параметрами  $a, b$  и  $c$  отвечающий за комбинаторный фон.

## 6.2. ПРИМЕНЕНИЕ ВСЕХ КРИТЕРИЕВ

Для каждого диапазона поперечного импульса применялись как каждый из критериев по отдельности, так и все одновременно. На рис. 6.1 и рис. 6.2 представлены распределения двухфотонных инвариантных масс для некоторых диапазонов поперечного импульса.

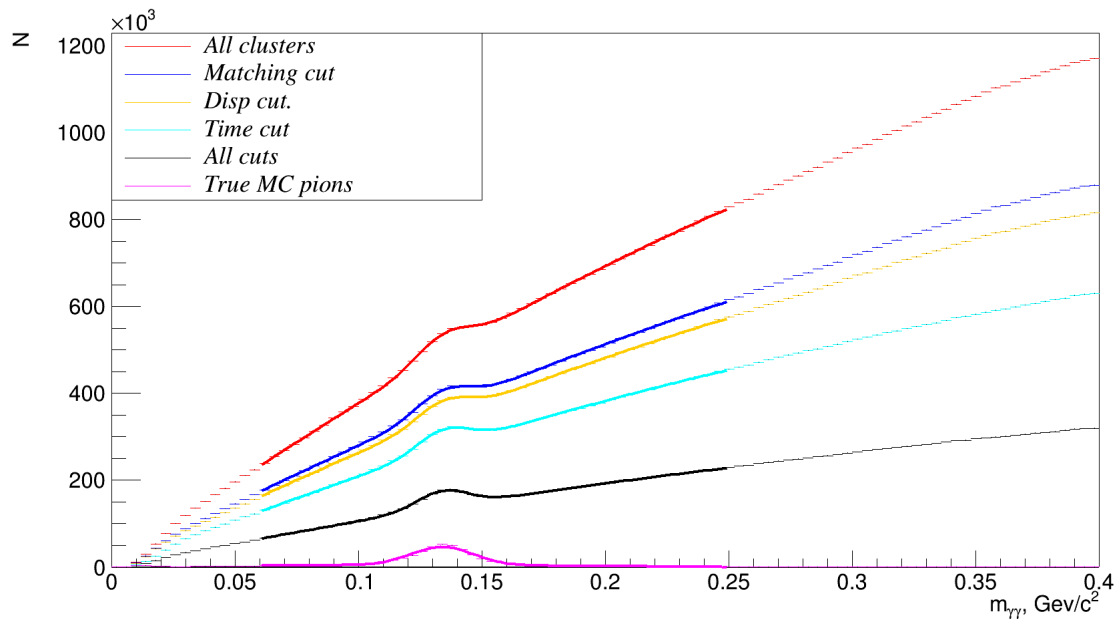


Рисунок 6.1 — Распределение двухфотонных инвариантных масс под действием различных критериев ( $1.00 < p_t < 1.25$  ГэВ).

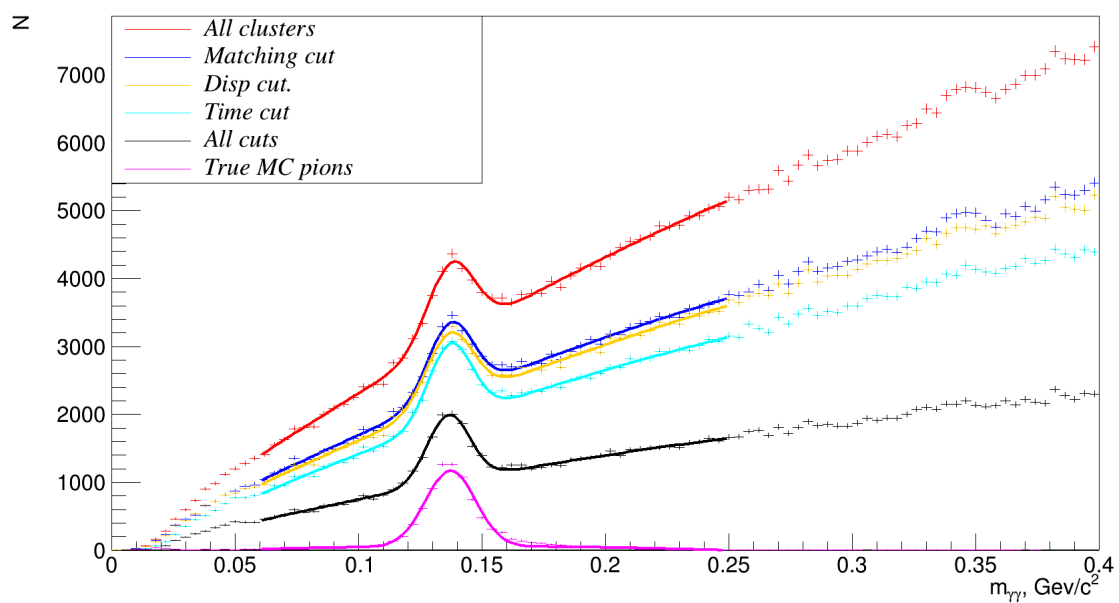


Рисунок 6.2 — Распределение двухфотонных инвариантных масс под действием различных критериев ( $1.75 < p_t < 2.00$  ГэВ).

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проделанной работы были разработаны критерии выявления нейтральных кластеров для восстановления спектра нейтральных  $\pi$ -мезонов. Были посчитаны эффективности и отношение сигнала к шуму, которые представлены в таблицах 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1 — Эффективности критериев

Pt, ГэВ	Veto	Time	Disp	Both cuts
(0.75-1.00)	0.76	0.71	0.68	0.60
(1.00-1.25)	0.73	0.73	0.66	0.62
(1.25-1.50)	0.75	0.75	0.68	0.65
(1.50-1.75)	0.78	0.79	0.72	0.68
(1.75-2.00)	0.81	0.82	0.76	0.71

Таблица 7.2 — Отношение сигнала к фону

Pt, ГэВ	All	Veto	Time	Disp	Both cuts
(0.75-1.00)	0.032	0.044	0.057	0.042	0.11
(1.00-1.25)	0.054	0.070	0.095	0.069	0.17
(1.25-1.50)	0.086	0.111	0.149	0.110	0.25
(1.50-1.75)	0.136	0.178	0.229	0.176	0.387
(1.75-2.00)	0.209	0.281	0.338	0.277	0.583

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Техническая спецификация(паспорт) объекта «Комплекс NICA» : тех. отч. — 2018. — с. 128—131.
2. Многоцелевой Детектор – MPD : тех. отч.
3. Topical issue on Exploring Strongly Interacting Matter at High Densities - NICA White Paper / D. Blaschke [и др.] // Eur. Phys. J. — 2016.
4. Ускорительно-накопительный комплекс NICA – база фундаментальных исследований и инновационных разработок. — 2012.
5. NICA/MPD Electromagnetic Calorimeter based on Multipixel Avalanche Photodetector / I. Tyapkin [и др.]. — 2016.
6. Projective geometry for the NICA/MPD Electromagnetic Calorimeter, Journal of Instrumentation / S. Basylev [и др.]. — 2017.
7. Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model / M. Bleicher [и др.] // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 1999. — т. 25, № 9. — с. 1859—1896. — ISSN 1361-6471.
8. Network and computing infrastructure for the NICA complex at JINR.тех. отч. / A. Dolbilov [и др.]. — 2018.
9. ALICE technical design report of the photon spectrometer (PHOS) / G. Dellacasa [и др.]. — 1999.