

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

УДК 53.072

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка программ реконструкции нейтральных π -мезонов для
электромагнитного калориметра эксперимента MPD/NICA

Руководитель НИР,

к.ф.-м.н.

СНС НИЦ Курчатовский институт

Студент

_____ Д.С. Блау

_____ А.А. Каюков

Москва 2020

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 2 |
| 1 Ускоритель NICA | 3 |
| 2 MPD | 4 |
| 3 ECal | 5 |
| 4 MpdRoot | 6 |
| 5 Реконструкция треков | 7 |
| 6 Наложение критериев | 8 |
| 6.1 Критерий фотонной идентификации | 8 |
| 6.2 Критерий на дисперсию кластера | 10 |
| 6.3 Критерий на время пролета частицы | 13 |
| 7 Применение всех критериев одновременно | 15 |
| 8 Фитирование | 16 |
| 9 Результаты | 17 |
| 10 Заключение | 18 |
| Список использованных источников | 19 |

Введение

Целью данной работы является разработка и оптимизация программ реконструкции нейтральных π – мезонов для электромагнитного калориметра ECal.

Главное назначение электромагнитного калориметра – измерение энергии электронов и фотонов, рожденных в столкновениях тяжелых ионов. Благодаря высокому временному разрешению калориметр позволит получить хорошую чистоту электронного и фотонного спектров. Кроме того, детектор фотонов будет служить для измерения полного потока энергии, который в немалой степени отражает начальные условия в столкновениях тяжелых ионов на установке NICA. Первостепенной задачей калориметра ECal в MPD является измерения спектров π^0 мезонов, рождающихся в больших количествах в ядро-ядерных столкновениях. Это позволит проверить предсказания КХД, а также дать возможность в дальнейшем измерить спектры и корреляции прямых фотонов. Текущей задачей является разработка критериев идентификации для улучшения сигнала по отношению к фону при измерениях спектров π^0 .

1 Ускоритель NICA

Целью проекта "Комплекс NICA" 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 в области структуры сильновзаимодействующей материи, проявляющихся в реакциях с участием тяжелых ионов, поляризованных адронов и легких ядер. Основными направлениями программы исследований являются[1]:

- Поиск и экспериментальное исследование фазовых переходов и критических явлений в сильновзаимодействующей ядерной материи при экстремальных барионных плотностях;
- Экспериментальное исследование спиновой структуры нуклона и легких ядер;
- Исследование поляризационных эффектов в столкновениях тяжелых ионов и малонуклонных системах;
- Исследование динамики реакций и изучение модификации свойств адронов в ядерной материи;
- Исследование структуры ядер на малых межнуклонных расстояниях, рождения странных гиперонов около порога и поиск гиперядер во взаимодействиях выведенных пучков Нуклоторона с фиксированными мишенями;
- Разработка теоретических моделей исследуемых процессов и теоретическое сопровождение экспериментов;

2 MPD

MPD (Multi Purpose Detector) разрабатывается как спектрометр 4π , способный регистрировать заряженные адроны, электроны и фотоны при столкновениях тяжелых ионов при высокой светимости в диапазоне энергий ($4-11\text{GeV}$) коллайдера NICA. [2] Для достижения этой цели детектор будет содержать точную трехмерную трековую систему (время-проекционную камеру) и систему идентификации частиц (PID), основанную на измерениях времени полета и калориметрии.

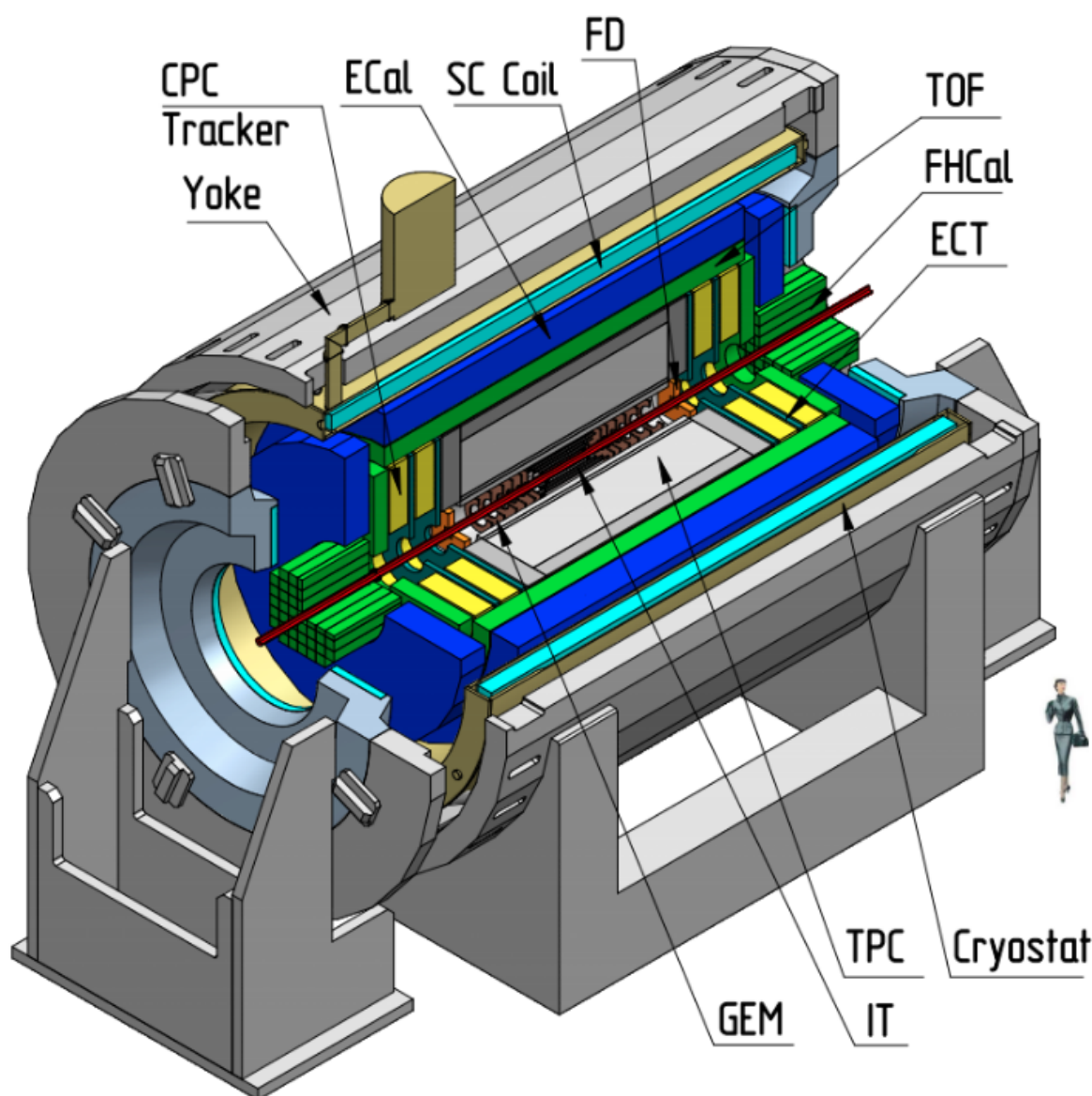


Рисунок 1 – Проект детектора MPD

3 ECal

Электромагнитный калориметр ECal (Electromagnetic Calorimeter) [3] является важным компонентом эксперимента MPD. Модуль электромагнитного калориметра состоит из 16 башен, которые склеены между собой. Геометрия каждого модуля зависит от местоположения Z-координаты модуля относительно точки, в которой сталкиваются пучки тяжелых ионов. Есть 8 типов модулей. Схематический вид детектора ECal и его составных частей показаны на рисунке 2. Каждая башня «шашлык» представляет собой "сэндвич" из сцинтиллятора и свинца, содержащий 220 плиток свинца (толщиной 0,3 мм каждая). Свинцовые плитки чередуются с 220 плитками из пластикового сцинтиллятора (толщиной 1,5 мм каждая). Общая толщина башни составляет около 42 см.

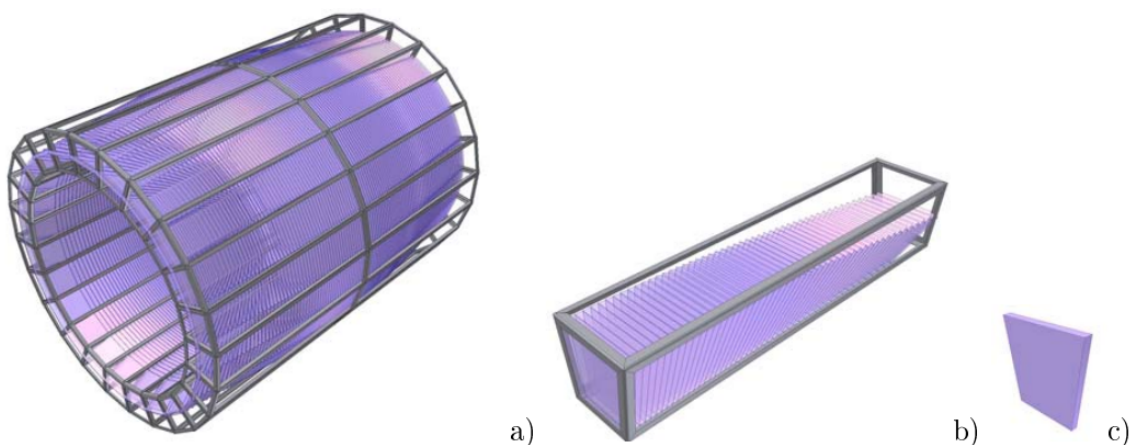


Рисунок 2 – Детектор ECal(a), сектор ECal(b) и базовый элемент детектора ECal.(c)

4 MpdRoot

Программная среда эксперимента MPD(MPDRoot) создается на базе объектно ориентированной оболочки FairRoot и является мощным инструментом для изучения свойств моделируемого детектора, разработки алгоритмов для реконструкции экспериментальных данных и их физического анализа.

В используемой оболочке сигнал отклика детектора моделируется пакетами программ виртуального Монте Карло, позволяющем использовать разные коды для транспорта частиц в среде детектора GEANT3, GEANT4 или Fluka без изменения кода пользователя. Одна и та же оболочка используется как для моделирования так и для последующего физического анализа данных.

Одной из особенностей оболочки 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. Также в оболочке предусмотрен механизм, моделирующий наложение фоновых событий на исследуемое распределение.

5 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 состоит из следующих основных этапов:

- Реконструкция хитов в субдетекторов
- 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 метода 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.

6 Наложение критериев

6.1 Критерий фотонной идентификации

Для отбора нейтральных кластеров находились расстояния между реконструированными треками и кластерами в калориметре. За нейтральные кластеры принимались все кластеры, удовлетворяющие неравенству:

$$\frac{(d\varphi - \mu_{d\varphi})^2}{(2 \cdot \sigma_{d\varphi})^2} + \frac{(dz - \mu_{dz})^2}{(2 \cdot \sigma_{dz})^2} > 1, \quad (1)$$

где $d\varphi$ и dz – угол и расстояние между треком и кластером соответственно; $\mu_{d\varphi}$, μ_{dz} , $\sigma_{d\varphi}$ и σ_{dz} – средние значения и стандартные отклонения распределений кластеров по этим величинам.

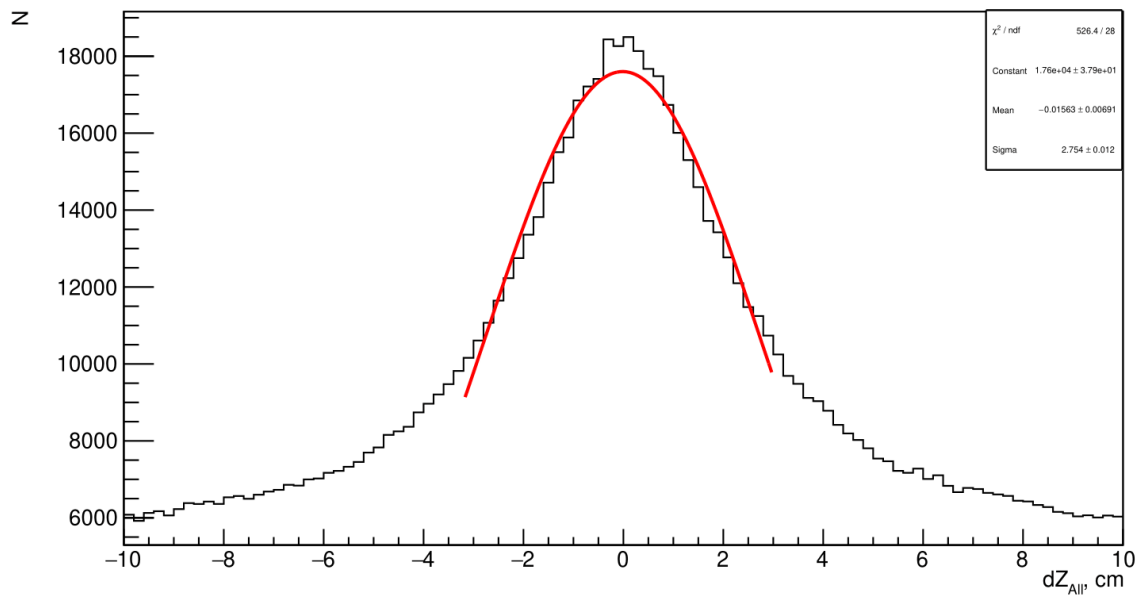


Рисунок 3 – Зависимость числа пар кластеров от dz

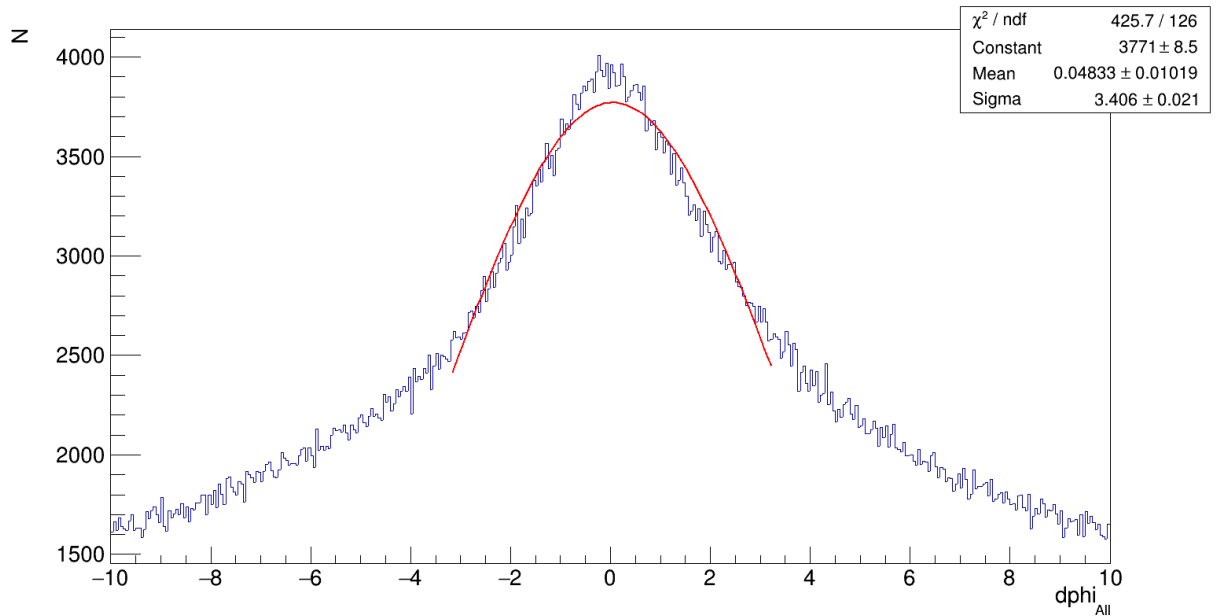


Рисунок 4 – Зависимость числа пар кластеров от $d\varphi$

Полученный критерий накладывался на кластеры и, после отбора пар кластеров, строилось распределение по двухфотонным инвариантным массам.

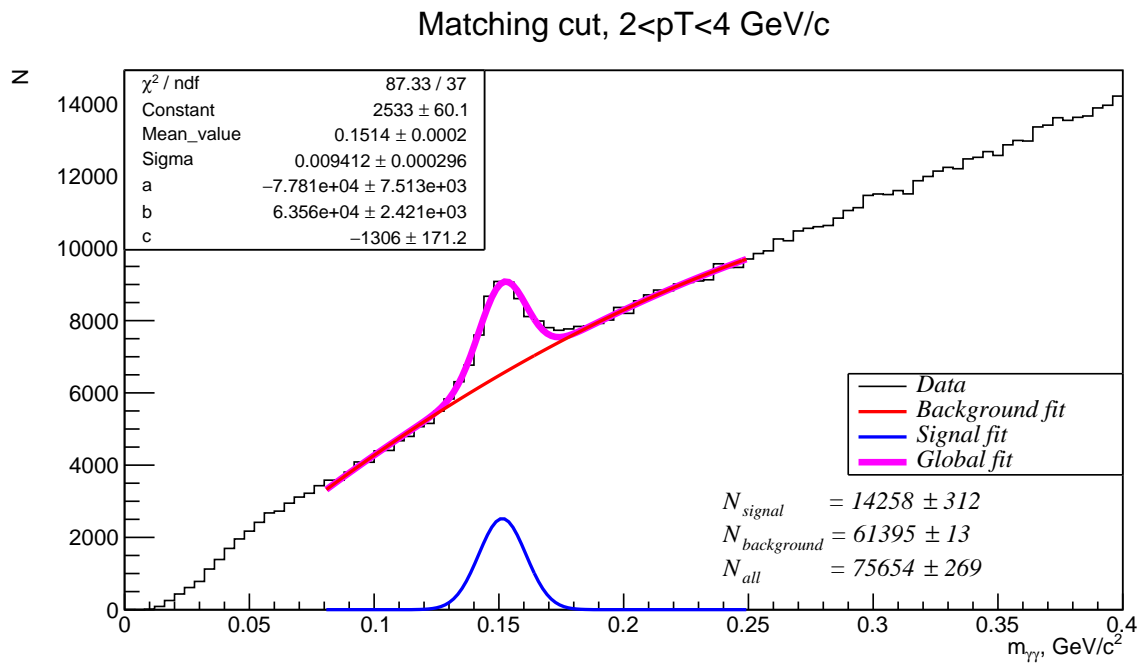


Рисунок 5 – Распределение по инвариантным массам $\gamma\gamma$ при действии критерия фотонной идентификации

6.2 Критерий на дисперсию кластера

Одним из параметров, характеризующих форму кластера, является форма поверхности пересечения конуса, содержащего ливень, с передней плоскостью калориметра. Эта поверхность может быть выражена через ковариационную матрицу:

$$S = \begin{pmatrix} s_{xx} & s_{zx} \\ s_{zx} & s_{zz} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$s_{xx} = \langle (x - \bar{x})^2 \rangle, \quad (3)$$

$$s_{zx} = \langle (x - \bar{x})(z - \bar{z}) \rangle, \quad (4)$$

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 (λ_1 и λ_2) как квадратный корень из собственных векторов ковариационной матрицы.

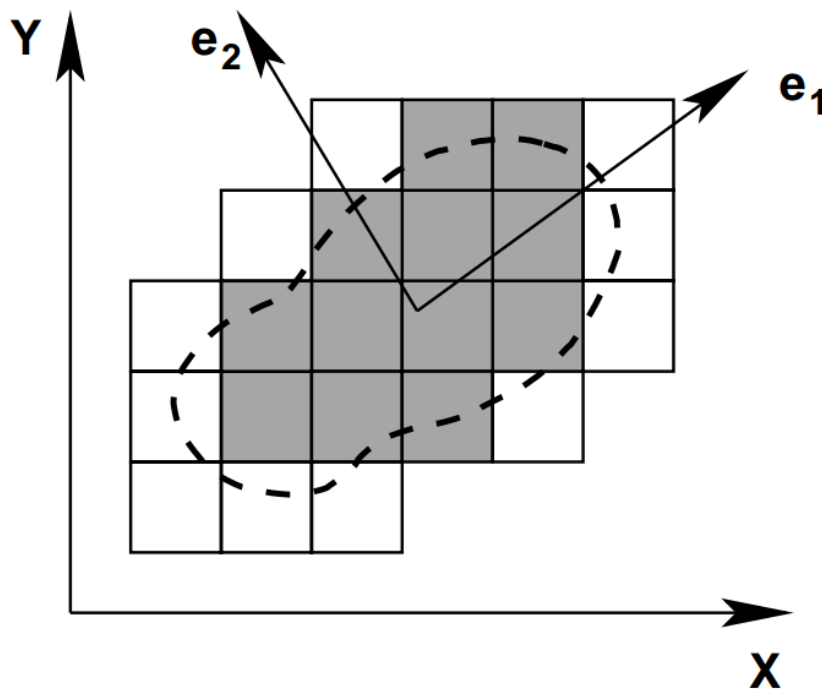


Рисунок 6 – Форма кластера

Построив распределения по λ_1 и λ_2 , можно получить еще один критерий для нейтральных кластеров.

$$\frac{(\lambda_1 - \mu_{\lambda_1})^2}{(2 \cdot \sigma_{\lambda_1})^2} + \frac{(\lambda_2 - \mu_{\lambda_2})^2}{(2 \cdot \sigma_{\lambda_2})^2} < 1, \quad (5)$$

где средние значения и квадратные отклонения были получены из распределений кластеров по λ_1 и λ_2 для γ -квантов, родительской частицей которых является π^0 . [4]

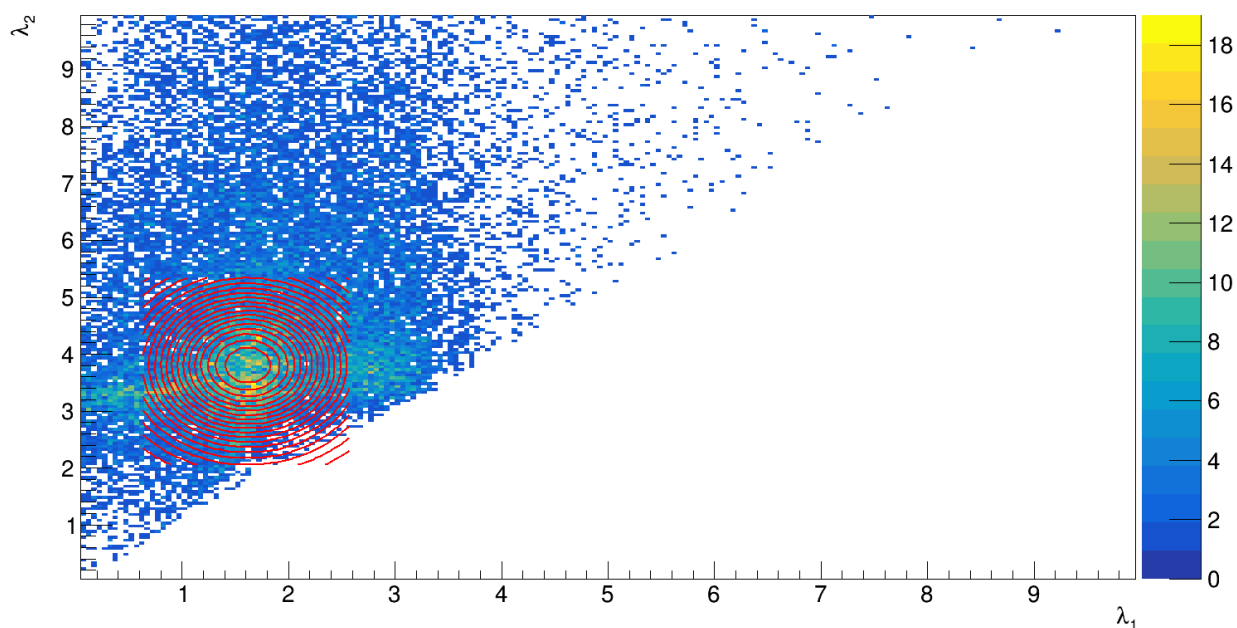


Рисунок 7 – Распределение по λ_1 и λ_2

Распределение по двухфотонным инвариантным массам при наложении критерия представлено на рисунке 8.

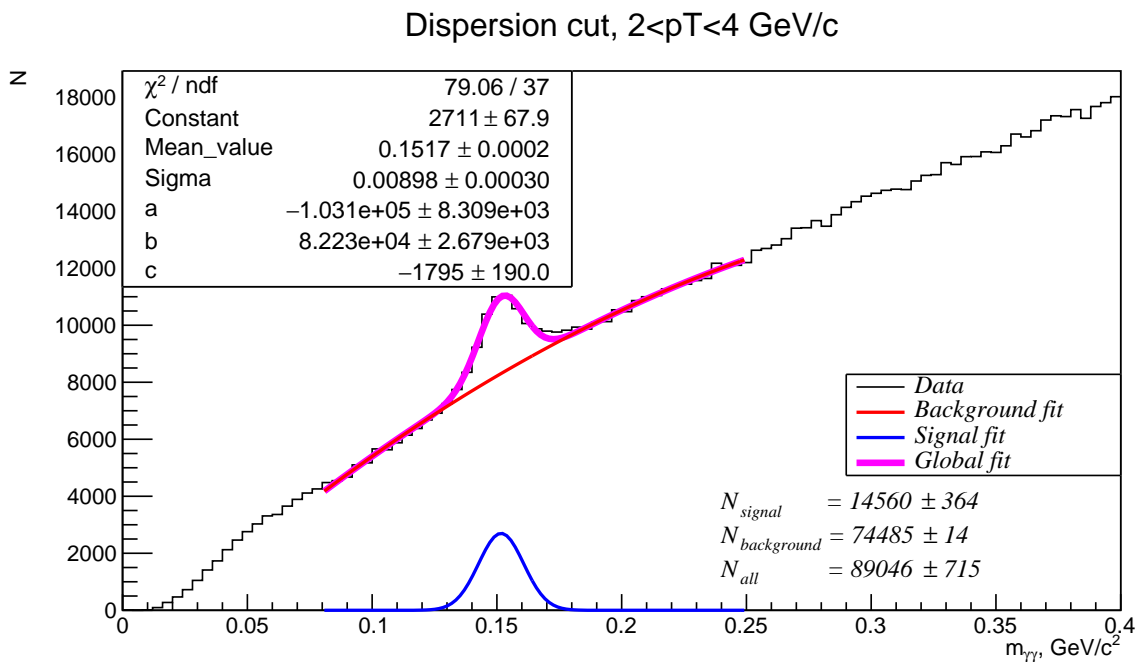


Рисунок 8 – Распределение по инвариантным массам $\gamma\gamma$ при действии критерия на дисперсию кластера

6.3 Критерий на время пролета частицы

Массивные частицы от γ -квантов можно отличить по разнице между замеренным времени пролета частицы через детектор и ожидаемом времени пролета γ -кванта, вылетевшего из той же вершины.

$$\Delta t = t_{clu} - \frac{\Delta r}{c}, \quad (6)$$

где t_{clu} – экспериментально измеренное время появления кластера; Δr – расстояние от кластера до вершины сопоставленного ему трека; c – скорость света. Из формулы видно, что массивные частицы будут иметь большую величину Δt , чем γ -кванты. Итоговым критерием стало:

$$\frac{(\Delta t_1 - \mu_{\Delta t_1})^2}{(2 \cdot \sigma_{\Delta t_1})^2} + \frac{(\Delta t_2 - \mu_{\Delta t_2})^2}{(2 \cdot \sigma_{\Delta t_2})^2} < 1, \quad (7)$$

где индексы 1 и 2 означают первый и второй кластер в паре.

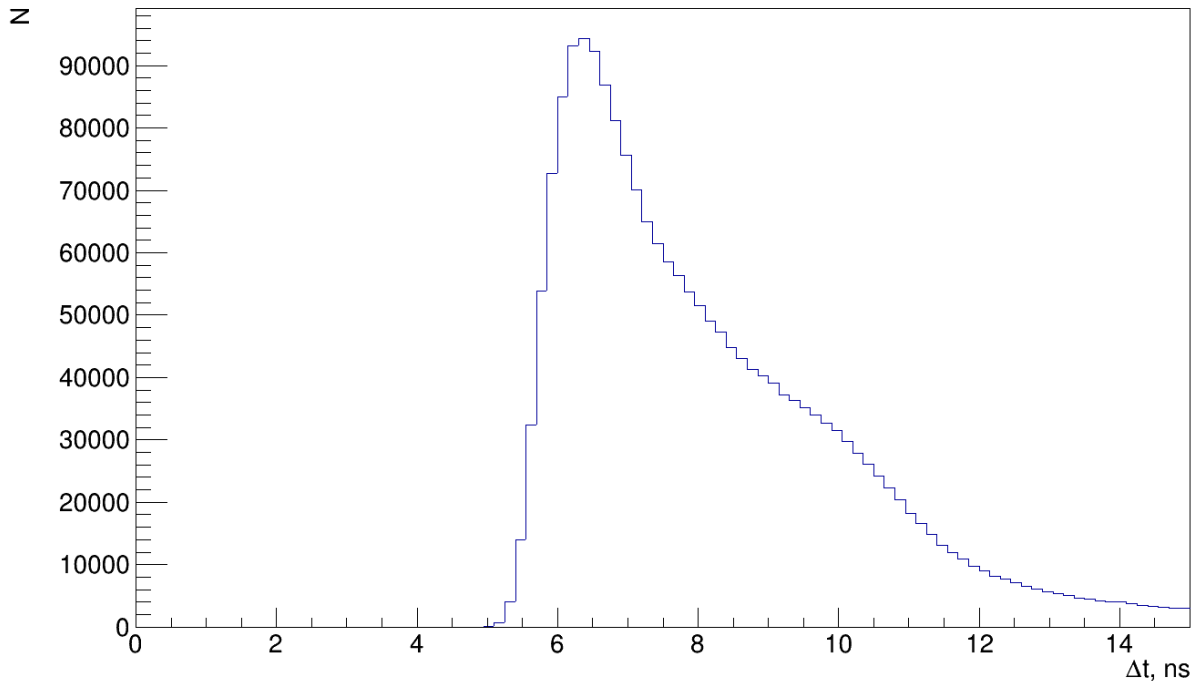


Рисунок 9 – Распределение по Δt для всех кластеров

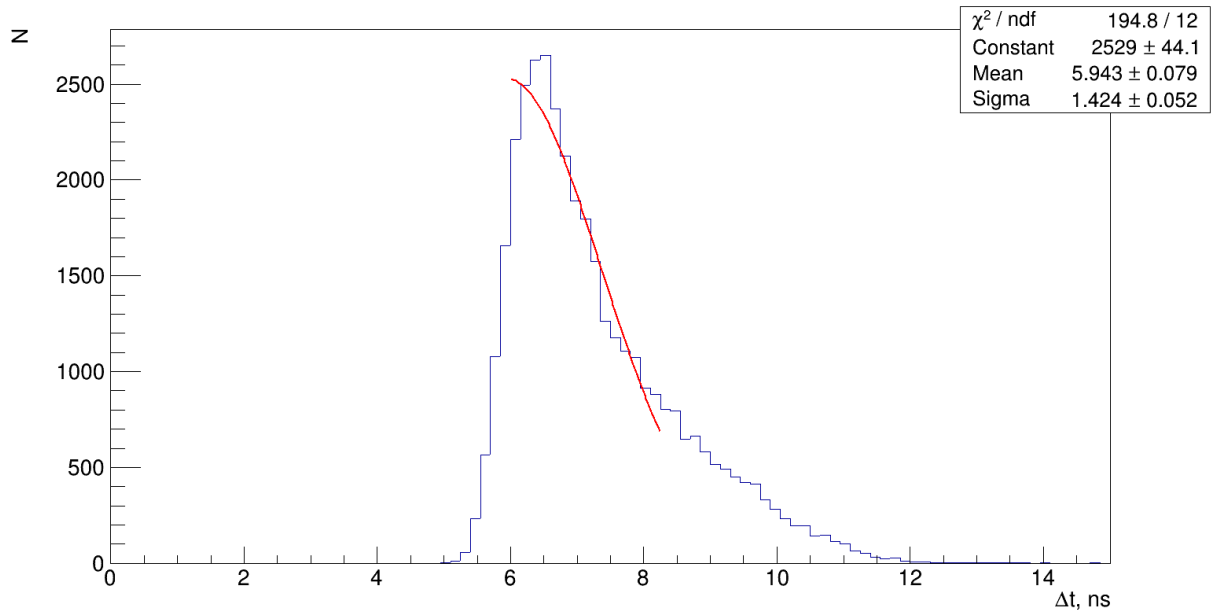


Рисунок 10 – Распределение по Δt для кластеров, родительской частицей которых является π^0

Распределение по двухфотонным инвариантным массам при наложении критерия представлено на Рисунке 11.

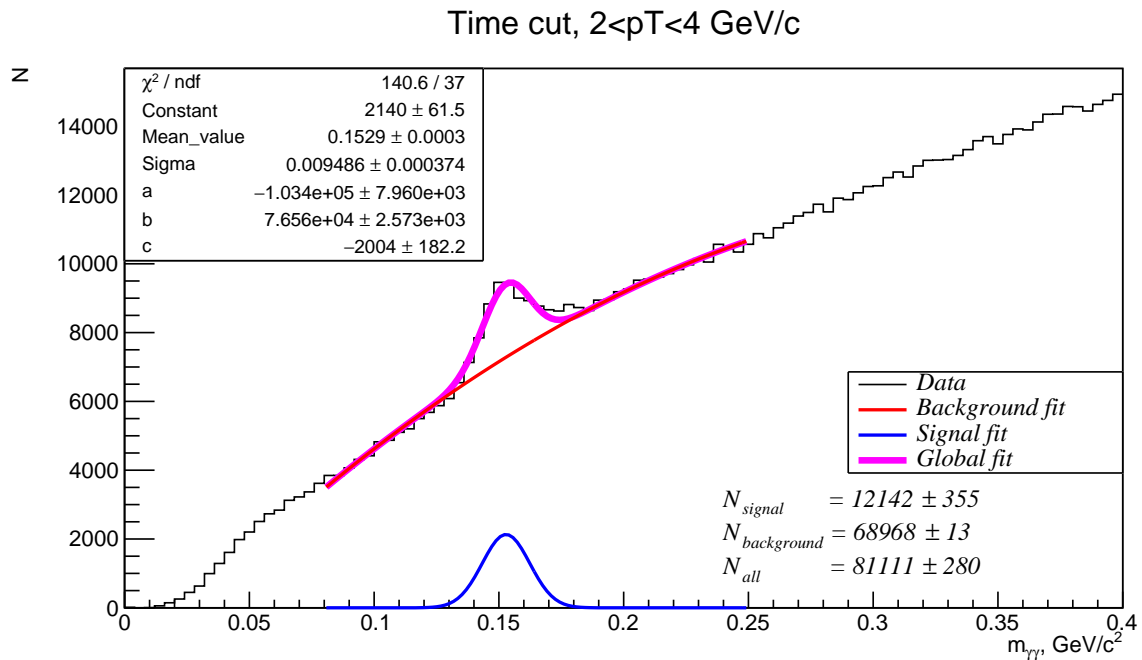


Рисунок 11 – Распределение по инвариантным массам $\gamma\gamma$ при действии критерия на дисперсию кластера

7 Применение всех критериев одновременно

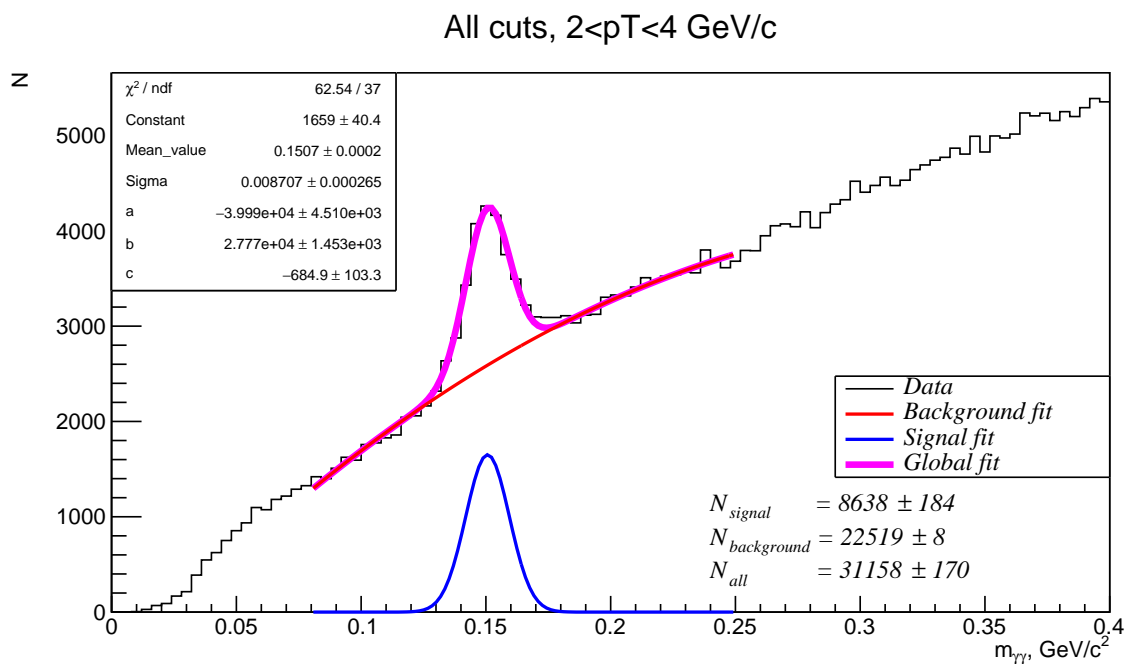


Рисунок 12 – Распределение по инвариантным массам $\gamma\gamma$ при действии всех критериев

8 Фитирование

Полученные распределения инвариантных масс фитировались функцией:

$$F(x) = N(\mu, \sigma^2) + a \cdot x^2 + b \cdot x + c, \quad (8)$$

где

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

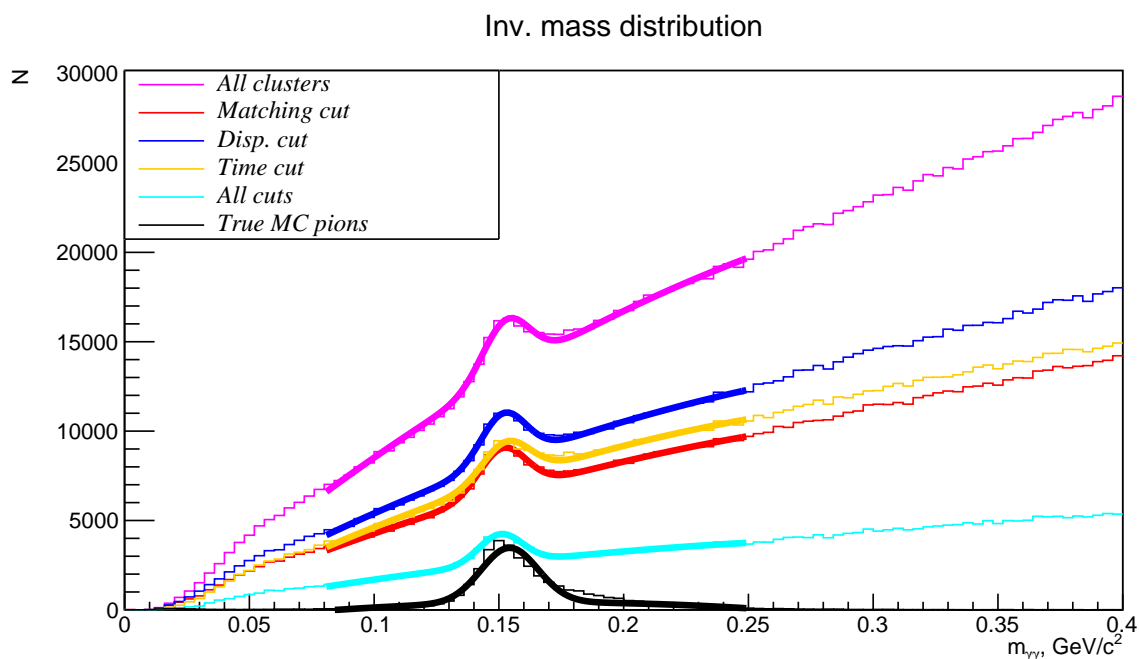


Рисунок 13 – Распределение по инвариантным массам $\gamma\gamma$ во всех случаях

9 Результаты

По результатам фитирования были получены такие величины как число событий в пике(S), число событий в фоне(Bg), эффективность(Eff), относительная величина сигнала к фону $-\frac{S}{S+Bg}$ и significance $-\frac{S}{\sqrt{Bg}}$.

Таблица 1 – Эффективность регистрации и significance при $2 < pT < 4$

| | All | Matching | Dispersion | Time | All cuts |
|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|
| S | 16938±456 | 14258±312 | 14560±364 | 12142±355 | 8638±184 |
| Bg | 122980±17 | 61395±13 | 74485±14 | 68968±13 | 22519±8 |
| S+Bg | 67377±1823 | 35789±790 | 31347±790 | 53831±1584 | 14991±325 |
| S/(S+Bg) | ≈0,25 | ≈0,40 | ≈0,46 | ≈0,23 | ≈0,58 |
| Eff | 1 | 0.67 | 0.69 | 0.73 | 0.36 |
| S/sqrt(Bg) | ≈48,3 | ≈57,5 | ≈53,3 | ≈46,2 | ≈57,6 |

10 Заключение

В рамках этой работы было сгенерировано и реконструировано 4000 событий столкновения Au+Au при энергии 11 ГэВ и центральностях от 0 до 15 фм с помощью модели UrQMD, после чего события были реконструированы в системе обработки данных эксперимента MPD – MPDRoot.

Поскольку в центральных ядро-ядерных событиях пик π^0 -мезонов расположен на многократно превышающем его комбинаторном фоне, было искусственно добавлено по 200 π^0 – мезонов с поперечным импульсом в диапазоне от 0.5 до 2-х ГэВ. Сгенерированных событий было достаточно, чтобы наблюдать пик в диапазоне энергий около массы π^0 .

По полученным данным были определены критерии идентификации нейтральных кластеров и вычислены эффективности и соотношения сигнала к шуму для каждого из них.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Кекелидзе В.Д. Потребников Ю.К. и др. Технический проект объекта «КОМПЛЕКС NICA»: Tech. Rep.: : 2018.
- [2] NICA White Paper. 2014.
- [3] TDR EcAL: Tech. Rep.: : 2018.
- [4] Alice Physics Performance Report. 2005. Т. 2. С. 128–131.