#### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ

#### ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

# НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

#### Институт Ядерной Физики и Технологий

Кафедра №40 "Физика элементарных частиц"

### ОТЧЕТ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ тема:

Анализ данных в эксперименте "ALICE"

Студент Б20-102

Арляпов Е.Р.

Научный руководитель Пересунько Д. Ю.

Москва 2022

# Содержание

1	Введение	3
<b>2</b>	Схема и описание установки ALICE	<b>5</b>
3	<b>Экспериментальная часть</b> 3.1 Ход работы	<b>9</b> 9 10
4	Заключение	16
Ст	Список литературы	

# 1 Введение

Название эксперимента "ALICE"является сокращенным от "A Large Ion Collider Experiment". В настоящее время является основным проектом по изучению кварк-глюонной плазмы путем столкновения тяжелых ионов высоких энергий.

Кварк-глюонная материя представляет собой агрегатное состояние вещества, при котором адроны (класс составных частиц, которые включают в себя мезоны (состоят из кварк-антикварковых пар и имеют целый спин) и барионы (наиболее распространенное чило кварков - три, однако существуют и более тяжелые и нестабильные образования, такие как пентакварки. Имеют полуцелый спин. Наиболее известные представители - протоны и нейтроны)) сближаются ("сплавляются") друг с другом до расстояний, меньших их собственных радиусов, образуя новый макроскопический объект, который состоит из свободных кварков и глюонов (при обычных условиях данные частицы существуют только в связанном состоянии только внутри адронов[1]. Их невозможно выделить отдельно вследствие явления конфаймента).

К основным признакам образования кварк-глюонной плазмы относятся:

• Повышенный выход странных частиц, т.е. тех, в состав которых входят s-кварки. Данные частицы имеют некоторые особенности:

во-первых, во всех реакциях эти частицы рождаются парами. Для примера, приведем рекацию столкновения двух протонов с образованием  $\Lambda$ - и  $K^+$ - гиперонов:

$$p + p \to p + \Lambda + K^+ (1)$$

во-вторых, Аномально высокое время жизни (10<sup>-13</sup> с вместо ожидаемого и характерного для тяжелых частиц $10^{-26}~{\rm c})$ 

Для объяснения данных эффектов было введено новое квантовое число странность. Оно целочисленное и сохраняется при сильном и электромагнитном взаимодействиях, но не сохраняется при слабом. В большинстве реакций со странными частицами, странность не может меняться больше, чем на единицу, однако это правило выполняется не всегда.

- Выход  $J/\Psi$  мезонов, который еще называют чармонием частица, мезон, состоящий из пары очарованный кварк-антикварк.
- Большие потери энергии при столкновении партонов (жестких партонов). Партон является моделью ультрарелятивистского протона, который удобно представлять в виде облака из кварков, антикварков и глюонов. Внутри партона постоянно идут реакции образования и слияния этих частиц, но в результате наступает равновесное состояние.

Стоит отметить, что в первой модели кварк-глюонное состояние сравнивали с газом практически невзаимодействующих свободных кварков и глюонов. Однако в 2010-е от этой интерпретации отказались и по современным представлениям данное агрегатное состояние сравнивается с жидкостью сильно взаимодействующих свободных кварков и глюонов.

Кварк-глюонная материя образуется при плотностях энергии свыше 1 ГэВ/фм<sup>3</sup>, что достигается за счет столкновений ядер тяжелых атомов (в основном Pb-Pb), при этом достигаются температуры порядка триллионов градусов[2]. Столкновение ионов свинца наглядно можно представить следующим образом:



Рис. 1: Изображение столкновения ядер Pb-Pb, сделанное на БАК. Каждая из разлетающихся частиц моделируется в виде линии, цвет которой характеризует энергию, полученную при столкновении.1

Предполагается, что Вселенная в первые доли секунды после своего образования представляла собой состояние, схожее с кварк-глюонной материей. Поэтому, изучив его в достаточной степени, можно будет ответить на ряд вопросов, касающихся происхождения, эволюции и структуры адронной материи, составляющей основу всего вещества во Вселенной.

Целью моей работы является ознакомление с целями и методами эксперимента ALICE, а также обработка данных с детекторов и построение зависимостей вероятности конверсии первичного фотона в координатах цилиндрической и прямоугольной систем и их представление в виде гистограмм в пакете AliRoot.

# 2 Схема и описание установки ALICE

Установка ALICE является одним из четырех основных детекторов на LHC (остальные - ATLAS, CMC, LHCb). Он включает в себя несколько более мелких составных частей (детекотров и калориметров) и его общая схема представлена на следующем рисунке:



Рис. 2: Общая схема детектора ALICE

Из общего вида экспериментальной установки 2 ясно, что для описания положения частиц, разлетающихся при столкновениях тяжелых ядер, удобнее всего пользоваться цилиндрическими координатами  $(r,\phi,z)$ , где за ось z принимается ось столкновений, а координата r указывает расстояние от данной оси, на котором произошла конверсия фотона.

Общие размеры установки ALICE составляют  $16 \times 16 \times 26$  м<sup>3</sup>, а общий вес примерно 10000 т. Основные составляющие - баррель (представляет собой центральную цилиндрическую часть, включающую несколько детекторов) и мюонный спектрометр. В момент столкновения ядра Pb достигают 99,9999% скорости света. При этом температура вещества может достигать 10 трлн градусов (это самая высокая температура в истории, полученная человечеством). Стоит отметить, что получить в точнсти центральные столкновения очень сложно, в большинстве случаев ядра лишь касаются друг друга. Плотность и температура кварк-глюонной плазмы сильнейшим образом зависят от центральности, а потому в разных событиях будут разными. Основные составляющие ALICE:

• ITS - внутренняя трекинговая система. Является наиболее близким к оси столкновений детектором, состоящим из концентрических кремниевых трубок, радиусы которых составляют от 6 до 43 см. Главная его цель - обнаружение короткоживущих частиц (содержащие в основном charm и beauty кварки) и определение их вершин распада с точностью до 100 мкм.



Рис. 3: Детектор ITS

• TPC - Время-проекционная камера. Представляет собой объем, заполненный газом, радиусом около 80 см. При пролете через этот детектор заряженные частицы ионизуют атомы газа. Благодаря сильному электрическому полю (порядка 100 кВ 3) выбитые электроны регестрируются считывающими камерами, которые определяют координаты сигнала, время его прихода и импульсы регестрируемых частиц.



Рис. 4: Детектор ТРС

- TOF детектор времени пролета. Определяет скорость заряженной частицы по измерению времени пролета на заданное расстояние вдоль трека. Если учесть, что импульсы были имерены ранее, то можно получить массы частиц, что означает полное их описание.
- TRD детектор переходного излучения. Регистрирует электроны и позитроны с энергиями более 1 ГэВ. В основе лежит явление переходного излучения (TR-излучение), которое появляется при пересечении границы двух сред быстрыми частицами. При этом возникают фотоны рентгеновского диапазона, которые регестрируются непосредственно за источником излучения.



Рис. 5: Детектор ТRD

• РНОЅ - фотонный спектрометр. Особенностью данного детектора является то, что он обладает большой расширяющей способностью по энергиям и пространственным координатам. Является основным объектом изучения в данной работе. Предназначен прежде всего для регистрации первичных фотонов (т.е тех, которые образовались непосредственно при столкновении изучаемых объектов и долетели до PHOS, не прореагировав с другими детекторами или частицами), которые дают важную информацию об излучениях, энергиях и других характеристиках процессов, возникающих при центральных столкновениях ядер тяжелых элементов, а это в конечном итоге может привести нас к лучшему понимаю того, что представляет из себя кварк-глюонная плазма. Помимо фотонов, PHOS может регестрировать  $\pi^0$  - и  $\eta$  - мезоны высоких энергий (более 25 ГэВ). PHOS представляет собой сегментированную поверхность, расположенную на расстоянии 4.5 м от вершины столкновений, занимающую по азимутальному углу 250°  $<\phi < 320^{\circ}$  и по псевдобыстроте  $|\eta| < 0.125$ , разделенную на 3.5 модуля, каждый из которых содержит 56 × 64 измерительных каналов (неполный модуль включает 56 × 32 каналов) из сцинтиллирующих кристаллов *PbWO*<sub>4</sub> (такой материал выбран для того, чтобы уменьшить мольеровский радиус, т.е. максимально приблизить детектор к оси столкновений, не вызвав при этом искажения в снимаемых данных)[3]. Размер каждого канала 2.25х2.25 мм В данной работе измеряются такие характеристики PHOS, как эффективность реконструкции  $\epsilon$ , вероятность конверсии фотона до PHOS, а также величина, называемая acceptance.



Рис. 6: Калориметр РНОЅ





В реальности ALICE выглядит следующим образом:



Рис. 8: Фотография ALICE

### 3 Экспериментальная часть

### 3.1 Ход работы

Предварительный этап работы состоял в знакомстве с операционной системой Linux Ubuntu и математическим пакетом Root, а также его основными функциями: построением и фитирование одномерных и двумерных гистограмм, чтение деревьев, работа с классами. Далее, с помощью пакета AliRoot был прочитан Root-файл, в котором содержатся данные эксперимента ALICE в сеансе Run2. На этом предварительная часть была закончена.

Первая часть основного этап началась с построения гистограмм, описывающих вероятность конверсии (превращения в электрон-позитронную пару при взаимодействии с материалом детектора) первичного фотона до PHOS в зависимости от различных пространственных переменных (более подробно данные гистограммы будут описаны ниже). Для этого применялись следующие отборы (далее р - указатель на класс AliAODMCParticle):

1) p->GetPdgCode() == 11 - метод, возвращающий PDG-код частицы. Для каждой частицы он индивидуален, причем для частицы и античастицы он имеет противоположный знак. Фотон имеет значение PDG, равное 11;

2) p->GetMother() == 0 - метод, возвращающий номер материнской частицы в данном событии. Значение 0 говорит о том, что изучаемый фотон первичный, то есть рожденный непосредственно при столкновении тяжелых ядер в вершине;

 $3)p->Phi()>(\frac{4\pi}{3}+\frac{\pi}{18}), p->Phi()<(\frac{11\pi}{6}-\frac{\pi}{18})$  - метод, возвращающий азимутальный угол конверсии фотона. Такие ограничения соответствуют угловым размерам PHOS;

4) p->Eta()<0.125, p->Eta()>-0.125 - метод, возвращающий псевдобыстроту частицы. Эти ограничения вызваны также размерами PHOS по полярному углу  $\theta$  (поскольку псевдобыстрота связана с полярным углом как

 $\eta = -ln(tan(\frac{\theta}{2})),$  то пользуются этой величиной);

5) sqrt(p->Xv()\*p->Xv() + p->Yv()\*p->Yv()) < 460 - отбор на модуль радиусавектора (поскольку эксперимент ALICE имеет цилиндрическую геометрию, то при анализе удобно пользоваться именно цилиндрическими координатами). Значение 460 - это расстояние от оси столкновений до PHOS.

Получившиеся гистограммы описывали зависимость числа частиц, прошедших отбор, от соответствующей пространственной координаты. Далее для того чтобы получить именно вероятность, построенные гистограммы нормировались с помощью метода Scale на общее число первичных фотонов, которое принималось равным число рассматриваемых событий (столкновений).

Далее полученные результаты сравнивались с данными, полученными из сеанса Run3 и обработанными с помощью пакета O2Physics.

Основные изменения, произведенные в детекторе ALICE между запусками Run2

(2015-2018) и Run3 (2022-2025), состоят в следующем:

1) Технические характеристики детектора: был заменен материал внутренней трекинговой системы (область внутри детектора ITS на расстоянии до 50 см от центра столкновений), перед одним из модулей PHOS установлен детектор CPV;

2) Характристики сталкиавющихся пучков: полная энергия столкновений увеличилась незначительно (с 13 до 13.6 ТэВ вместо планируемых изначательно 14-ти ТэВ). Наиболее важным результатом является увеличение светимости (т.е. числа взаимодействий пучка с мишенью в единицу времени на единицу площади) почти в два раза;

3) Прием и обработка данных: Run2 осуществлялся триггерный набор, т.е. существовало мертвое время между приемом данных, в течение которого терялась часть информации, поэтому измерения имели достаточно низкий КПД. В Run3 впервые перешли к непрерывному набору данных. В связи с этим обстоятельством пакет AliRoot стал непригоден, и был заменен на O2Physics. Во второй части основного основного этапа была определена такая характеристика PHOS, как эффективность реконструкции  $\epsilon$ . По определению она представляет собой отношение числа фотонов, реконструированных в PHOS, к числу фотонов, сгенерированных в единицу псевдобыстроты и в азимутальный угол  $2\pi$ 

$$\epsilon = \frac{dN^{gen}}{dN^{rec}}$$

С другой стороны, эту же величину можно вычислить как произведение еще одной характеристики PHOS, называемой ассерtance (вероятность того, что первчиный фотон полетит в направлении PHOS) и вероятности реконструкции *P*<sup>rec</sup> (которая состоит из вероятности конверсии фотона до PHOS и вероятности реконструкции фотона в случае, если он долетит до калориметра и попапдет в него).

$$\epsilon = acceptance \times P^{rec}$$

[4]

Для определения  $\epsilon$  детектора PHOS в пакете AliPhysics были построены гистограммы, описывающие спектр реконструированных фотонов и фотонов, сгенерированных в единицу псевдобыстроты, затем найдено их отношение, а полученная зависимость фитирована функцией *pol*0, погрешности определялись с помощью метода sumW2().

#### 3.2 Представление результатов

Итогом работы стало получение следующих распредлений:

Здесь представлены одномерные гистограммы для различных распределений.

Первая (Рис.4) показывает, с какой вероятностью первичный фотон проконвертирует в точке, с координатой Z. Принцип построения следующий: берется некоторый интервал по оси Z и делится на равное количество более мелких отрезков, которые образуют бины гистограммы(в данной гистограмме 400 бинов). Далее отбираются Z-координаты всех вторичных электронов и распре-



Рис. 9: Распределение вероятности по координате z



(a) Вероятность конверсии первич- (b) Интегральная гистограмма расного фотона в зависимости от ра- пределения вероятности конверсии duyca фотона

Рис. 10



(a) Число конверсий в зависимости от угла  $\phi$ 

Рис. 11

деляются по бинам. В конце мы делим количество попавших в каждый бин координат на общее число первинчых фотонов и тем самым получаем вероятность конверсии в данной Z.9 Следующие две гистограммы описывают вероятность конверсии от радиуса (под радиусом здесь следует понимать расстояние от оси столкновений до проекции точки на плоскость OXY, поскольку, как уже было сказано ранее, в ALICE наиболее удобными являются цилиндрические координаты). На Рис.5а представлена диффренциальная гистограмма (принцип ее построения такой же, как и для Z-распределения)13d. На Рис5.6 представлена интегральная гистограмма. Основное ее назначение - наглядно продемонстрировать, с какой вероятностью первичный фотон проконвертирует до точки, имеющей данный радиус R. Данная зависимость имеет практически вертикальную производную в точках, с координатами, близкими к 460 см, что говорит о расположении в этом месте объекта с высокой плотностью. В действительности им является PHOS, где происходит наибольшее число конверсий13е.

Следующие две гистограммы описывают зависимость числа конверсий от угловых координат. Из Рис.6а видно, что максимум числа конверсий лежит в пределах азимутального угла  $\phi \in \left(\frac{2\pi}{3}; 2\pi\right)$ , именно в этих пределах углов расположен PHOS11a. Рис.6б демонстрирует, что максимум распределения по полярному углу  $\theta$  находится в районе  $\frac{\pi}{2}$ . Действительно, генерация основной части фотонов в ALICE происходит в направлении PHOS, противоположном оси OY[5].

Также были построены двумерные гисотграммы. В пакете root они выглядят следующим образом:



(a) Число конверсий в зависимости (b) Число конверсий в зависимости от угла  $\phi$  от угла  $\theta$ 

Рис. 12

Смысл данных гистограмм заключается в следующем: они показывают поверхностное распределение числа конверсий в соответствующей плоскости, а с учетом того, что это число в первую очередь определяется плотностью вещества, данные гистограммы являются фактически проекциями ALICE со всеми составляющими ее частями на выбранную плоскость. Объединяя данные проекции, можно получить объемное изображение всей установки. Можно сказать, что двумерные гистограммы являются некими аналогами рентгенограммы, получаются с помощью одних и тех же методов.

На Рис.7а представлено сечение установки ALICE плоскостью XOY. По данной гистограмме можно безошибочно определить соответсвующие координаты всех детекторов от ITS до PHOS (белый цвет означает, что в данной точке чило конверсий равно нулю и ,соответсвенно, нулевая плотность. Т.е. можно увидеть интервалы между детекторами)13а. На Рис.7б представлена двумерная гистограмма для сечения установки плоскостью ZOY. Поскольку ALICE имеет цилиндрическую геометрию, для ее описания достаточно двух проекций.

Результаты сравнения Run2 и Run3: на Puc.13(а)представлена гистограмма сравнения дифференциальной зависимости вероятности конверсии от радиуса. Как и ожидалось, наибольшие расхождения наблюдаются в районе 0-50 см от вершины столкновений (детектор ITS, материал которого был заменен) и 440-460 см (новый детектор CPV, установленный перед PHOS). Для большей наглядности на Puc.13(с) представлена такая же зависимость в логарифмическом масштабе, а на Puc.13(b) размещен разрез детектора ALICE плоскостью XOY для сравнения истинного положения составляющих детекторного комплекса с результатами, отраженными на гистограммах, а на Puc.13(d) приведена интегральная зависимость вероятности конверсии от радиуса.

На Рис.13(е) показана зависимость вероятности конверсии от азимутального угла  $\phi$ . Пики, расположенные в районе 260°, 280°, 300°, 320° соотвествуют границам модулей PHOS





(a) сравнение дифференциальной зависимости вероятности конверсии в Run2 (b) и Run3 от радиуса пле

(b) сечение детектора ALICE плоскостью XOY





(c) сравнение дифференциаль- (d) *сравнение интегральной зави*ной зависимости в логарифми- *симости вероятности конверсии в* ческом масштабе *Run2 и Run3 от радиуса* 



(e) сравнение зависимости вероятности конверсиии в Run2 и Run3 от полярного угла

Рис. 13

Результатом второй части работы является определение эффективности реконструкции фотона для PHOS, которая представлена на Puc.14. По горизонтальной отложена зависимость от pT (она существует, поскольку вероятность конверсии фотонов до PHOS завсит от спектра фотонов, однако в среднем эффективность должна оставаться постоянной для данного калориметра)



Effecency of reconstruction

Рис. 14: эффективность реконструкции одиночного фотона для РНОS

## 4 Заключение

В ходе работы было осуществлено знакомство с операционной системой Linux, математическим пакетом root и его некоторыми важнейшими функциями, целями и методами эксперимента ALICE, получены первичные навыки анализа данных и зависимости, описывающие вероятности конверсии фотонов в прямоугольных и цилиндрических координатах, которые были графически представлены в виде соответствующих гистограмм, а также проекции установки ALICE в виде двумерных гистограмм. Произведено сравнение результатов сеансов Run2 и Run3, определена одна из характеристик калориметра PHOS - эффективность реконструкции. Полученные результаты проанализированы и установлены соответствующие закономерности.

### Список литературы

- B.A. McLerran and L.D. Freedman. Quark star phenomenology. Phys. Rev. D 16, 1977.
- [2] Шуряк Э. В. Кварк-глюонная плазма. ЖЭТФ 74, 1978.
- [3] Acharya S. Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment. Journal of instrumentation, 2019.
- [4] Gustafsson H.-A. The ALICE experiment at the CERN LHC. Journal of instrumentation, 2008.
- [5] Jowett J. M. The LHC as a nucleus-nucleus collider. Journal of Physics, 2008.