

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

УДК 539

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Изучение образования четырехчастичных событий в  
ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов в условиях  
эксперимента ATLAS

Руководитель НИР,  
к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ С.Л. Тимошенко

Студент

\_\_\_\_\_ О.Д. Гавва

Москва 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение .....</b>                                                                                             | <b>3</b>  |
| 1 Физика ультрапериферических столкновений тяжелых ионов.....                                                     | 5         |
| 2 Экспериментальная установка ATLAS.....                                                                          | 7         |
| 3 Программное обеспечение ATLAS.....                                                                              | 11        |
| 4 Поиск четырехчастичных событий с образованием пар векторных мезонов<br>в ультрапериферийных столкновениях ..... | 12        |
| <b>Заключение.....</b>                                                                                            | <b>18</b> |
| <b>Список используемых источников.....</b>                                                                        | <b>19</b> |

## Введение

Одной из быстро развивающихся областей науки можно считать физику элементарных частиц, которая основывается на Стандартной модели (СМ). Как известно, эта теоретическая модель описывает электромагнитное, сильное и слабое взаимодействие всех элементарных частиц. Практически все эксперименты по физике частиц согласуются со Стандартной моделью, поэтому сейчас многие научные группы занимаются поисками явлений, которые выходят за рамки СМ.

Для изучения свойств элементарных частиц используются ускорители, способные разогнать, например, адроны до скорости, близкой к скорости света. При высоких энергиях столкновения становятся неупругими, появляется необходимость учитывать релятивистские эффекты, а также повышается значимость коллективных взаимодействий.

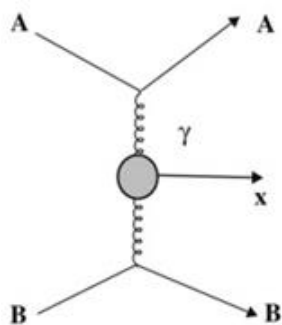
Для исследования кварк-глюонной материи предпочтительнее использовать в качестве сталкивающихся частиц не адроны, а ядра, так как повышается плотность и радиус горячей области взаимодействующих частиц. Принято выделять центральные столкновения — характеризуются наибольшим перекрытием сталкивающихся ядер, периферические — определяются прицельным параметром  $b > 1$  фм, а также ультрапериферические — отличаются не только прицельным параметром  $b > R_A + R_B$ , где  $R_A$  и  $R_B$  — радиусы сталкивающихся ядер, но и исключением сильного взаимодействия, то есть только фотон-фотонные, фотон-померонные и померон-померонные взаимодействия.

В ультрапериферических взаимодействиях могут рождаться векторные мезоны:  $\rho$ ,  $J/\psi$  и другие; электронные и мюонные пары, а также возможно изучение других процессов, не связанных с рождением частиц.

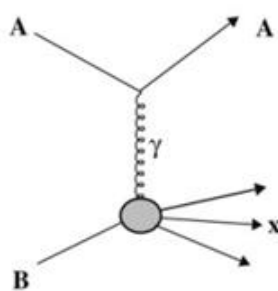
Целью данной работы является изучение и поиск четырехчастичных событий с образованием пар векторных мезонов, таких как  $\rho^0\rho^0$ ,  $\rho^0\omega$ ,  $\rho^0\phi$  в ультрапериферических столкновениях ядер на детекторе ATLAS.

# 1 Физика ультрапериферических столкновений тяжелых ионов

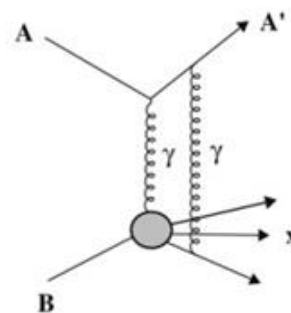
Движущиеся высокозарядные ионы несут сильные электромагнитные поля, которые действуют как поле фотонов. В столкновениях при больших ударных параметрах адронные взаимодействия невозможны, и ионы взаимодействуют через фотон-ионные и фотон-фотонные столкновения, известные как ультрапериферические столкновения (УПС). Кроме того, возможны также фотоядерные столкновения, когда один излучаемый фотон взаимодействует с составной частью другого ядра. Эти два процесса проиллюстрированы на рисунке 1.1 и 1.2. На этих диаграммах ядро, испускающее фотон, остается неповрежденным после столкновения. Тем не менее, это возможно, чтобы получить ультрапериферическое взаимодействие, в которых один или оба ядра распадаются. Распад может произойти в результате обмена дополнительным фотоном, как показано на рисунке 1.3. При расчетах ультрапериферических столкновений обычно требуется, чтобы прицельный параметр удара был больше суммы двух ядерных радиусов,  $b > R_A + R_B$ . Строго говоря, ультрапериферическое электромагнитное взаимодействие может происходить одновременно с адронным столкновением. Однако, поскольку в таких столкновениях невозможно разделить адронную и электромагнитную компоненты, адронные компоненты исключаются сокращением параметра удара.



1.1



1.2



1.3

Рисунок 1: Схематическое представление 1.1 - электромагнитного взаимодействия, при котором фотоны, испускаемые ионами, взаимодействуют друг с другом, 1.2 - фотонно–ядерной реакции, при которой фотон, испускаемый ионом, взаимодействует с другим ядром, 1.3 - фотоядерной реакции с распадом ядра вследствие фотонного обмена.

Адронные коллайдеры, такие как Релятивистский Коллайдер Тяжелых Ионов (RHIC), Теватрон и Большой Адронный Коллайдер (LHC) производят фотоядерные и двухфотонные взаимодействия при светимостях и энергиях, превышающих те, которые доступны в других местах. LHC достигает энергии  $\gamma p$  в десять раз больше, чем Адронно-Электронный Кольцевой Ускоритель (HERA). Уже изучены такие разнообразные реакции, как образование антиводорода, фотообразование  $\rho^0$ , превращение свинца в висмут и возбуждение коллективных ядерных резонансов. На LHC ультрапериферические столкновения могут изучать многие виды “новой физики”.

## 2 Экспериментальная установка ATLAS

Эксперимент ATLAS (ATLAS — A Toroidal LHC ApparatuS) - один из четырех крупных экспериментов на Большом Адронном Коллайдере (LHC) в CERN. Это универсальный эксперимент по физике элементарных частиц, с крупнейшим детектором частиц, когда-либо созданных. ATLAS имеет цилиндрическую форму 46 м в длину, 25 м в диаметре и находится на глубине 100 м под землей. Сам детектор ATLAS весит 7000 тонн.

Сам детектор представляет собой многослойный инструмент, предназначенный для идентификации частиц и определения их характеристик. Он состоит из нескольких различных подсистем обнаружения, расположенных слоями вокруг точки столкновения для регистрации траектории, импульса и энергии частиц, что позволяет их индивидуально идентифицировать и измерять. Огромная магнитная система искривляет траектории заряженных частиц, так что их импульсы можно измерить с максимальной точностью.

Эксперимент ATLAS включает в себя внутренний детектор (ВД), систему калориметров, мюонный спектрометр (МС), магнитную и триггерную системы, изображенные на рисунке 2.

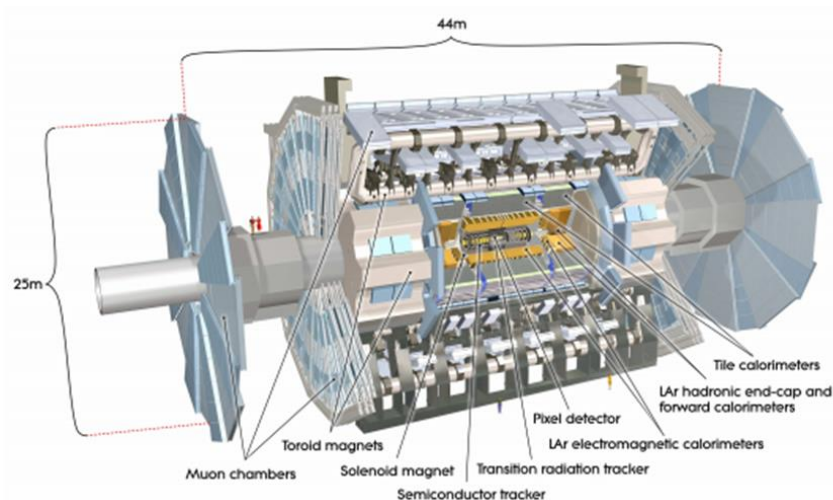


Рисунок 2: Детектор ATLAS

Внутренний детектор измеряет направление, импульс и заряд электрически заряженных частиц, образующихся при каждом протон-протонном столкновении. Это первая часть ATLAS, в которой можно увидеть продукты распада столкновений. Он состоит из трех различных систем датчиков, погруженных в магнитное поле, параллельное оси луча. Основными компонентами внутреннего детектора являются: пиксельный детектор (Pixel), полупроводниковый трекер (SCT), а так же устройство отслеживания переходного излучения (TRT). Пиксельный детектор состоит из трех концентрических цилиндрических слоев и двух торцевых крышках по три диска в каждом и, в общем, содержит 80 миллионов пикселей (80 миллионов каналов). Это обеспечивает три точки измерения параметров частицы. Полупроводниковый трекер состоит из 4 концентрических цилиндрических слоя и 9 плоских дисков в каждом торце, состоящих из кремния. Считывающие полосы через каждые 80 мкм на кремнии позволяют регистрировать положение заряженных частиц с точностью до 17 мкм на слой (в направлении, поперечном полосам). С помощью SCT обеспечивается восемь измерений параметров частицы. Базовым элементом детектора отслеживания переходного излучения является пропорциональная дрейфовая трубка (соломинка) диаметром 4 мм, в центре которой позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 0.03 мм. Благодаря TRT предоставляется дополнительная информация о типе частицы, пролетевшей через детектор.

Основными калориметрами на эксперименте ATLAS являются адронный и электромагнитный калориметры. Электромагнитные калориметры измеряют энергию электронов и фотонов, когда они взаимодействуют с веществом. Адронные калориметры измеряют энергию адронов (частиц, содержащих кварки, такие как протоны и нейтроны), когда они взаимодействуют с атомными ядрами.

Мюоны - это частицы, которые обычно проходят через внутренний детектор и калориметр незамеченными, для их обнаружения используют мюонный калориметр. Он восстанавливает импульс и треки пролетающих мюонов с максимально возможным разрешением. МС состоит из четырёх подсистем, использующих разные технологии: контролируемые дрейфовые трубки, камеры с катодной лентой, камеры с резистивной пластиной и камеры с тонким зазором. Эти подсистемы погружены в магнитное поле, генерируемое тремя тороидами.

Для измерения импульсов создана специальная система магнитов, создающая электромагнитное поле, которое искривляет траектории заряженных частиц вокруг различных слоев детекторных систем. Основными секциями магнитной системы являются: центральный соленоидный магнит, тороид в виде цилиндра и тороид с торцевой крышкой.

ATLAS предназначен для наблюдения до 1,7 миллиарда протон-протонных столкновений в секунду с общим объемом данных более 60 миллионов мегабайт в секунду. Однако только некоторые из этих событий будут содержать интересные характеристики, которые могут привести к новым открытиям. Чтобы сократить поток данных до управляемых уровней, ATLAS использует специализированную триггерную систему выбора событий.

Триггер первого уровня работает на подмножестве информации от калориметра и мюонных детекторов. Решение о сохранении данных о событии принимается меньше чем за 2.5 мкс после того, как событие происходит, затем извлекается из конвейерных буферов хранения. Триггер второго уровня уточняет анализ аппаратного триггера первого уровня. Он проводит очень подробный анализ либо путем выполнения общего исследования всего события для выбранных слоев детектора, либо путем использования данных в более мелких и изолированных областях детектора.

Около 1000 событий в секунду выбираются таким анализом и полностью объединяются в запись события. Эти события передаются в систему данных для автономного анализа.

### 3 Программное обеспечение ATLAS

Данные с детектора ATLAS калибруются, реконструируются и автоматически распределяются по всему миру системой управления данными ATLAS. Затем производственная система ATLAS фильтрует эти события и выбирает те, которые необходимы для определенного типа анализа. Это позволяет сократить набор данных до удобного размера для тех, кто проводит анализ на своем ноутбуке. Для того чтобы все участники эксперимента ATLAS имели равные возможности доступа ко всем данным, сотрудники ATLAS разработали удобное программное обеспечение. Программное обеспечение используется для хранения, обработки и анализа огромных объемов данных. Для ознакомления и последующей работы создано специальное руководство по программному обеспечению ATLAS.

Это руководство представляет собой полное введение для новых пользователей программного обеспечения ATLAS. В нем рассматривается настройка учетной записи и Grid сертификата, обучает новых участников эксперимента работе с анализом данных при помощи удаленного доступа. Также мы можем ознакомиться с некоторыми типичными инструментами анализа, используемыми для анализа xAOD в рамках EventLoop или Athena с системой сборки cmake. С помощью данного руководства мы сможем создать свой алгоритм для создания кода анализа данных ATLAS.

## 4 Поиск четырехчастичных событий с образованием пар векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях

Для анализа образования пар векторных мезонов необходимо осуществить поиск четырехчастичных событий. Существует несколько каналов распада пар векторных мезонов:

$$1) \rho^0 \phi \rightarrow \rho K_L K_S \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$$

$$2) \rho^0 \omega \rightarrow (\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$$

$$3) \rho^0 \rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$$

На данном этапе работы производится анализ одного сэмпла с эксперимента 2018 года на детекторе ATLAS, полученного при ультрапериферических столкновениях тяжелых ядер свинца с энергией 5.02 ТэВ/нуклон.

В ходе работы были построены гистограммы по распределению количества мюонов в событии, согласно рисунку 3, и распределению количества треков в событии, согласно рисунку 4. Из полученных гистограмм видно, что в данных присутствуют события из четырех треков частиц, которые образуются во время распада пары векторных мезонов. Для последующего изучения нам необходимо рассматривать условие для треков и мюонов только с первыми четырьмя бинами.

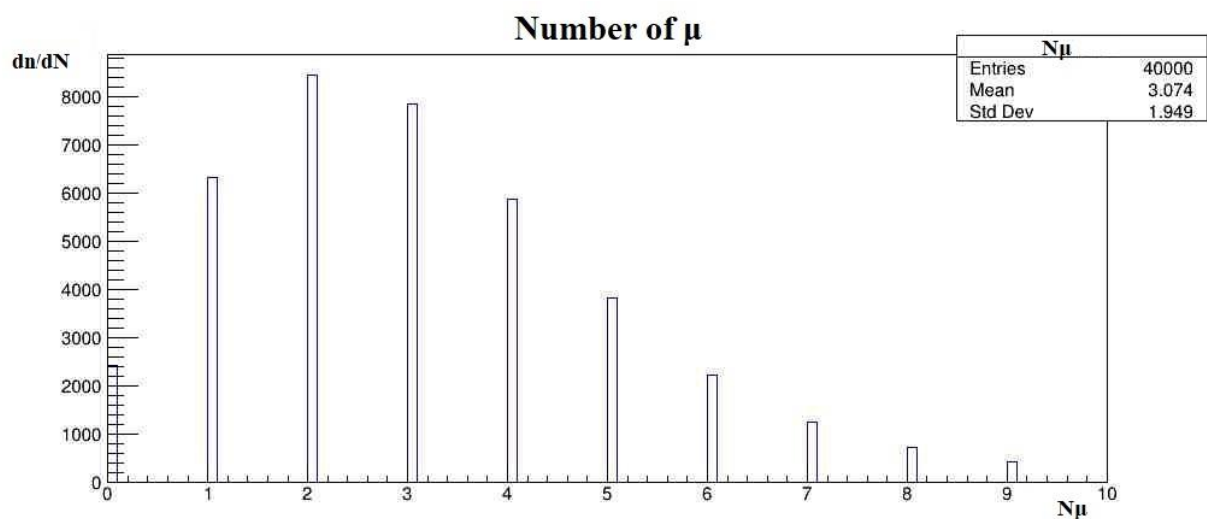


Рисунок 3: распределение количества мюонов в событии

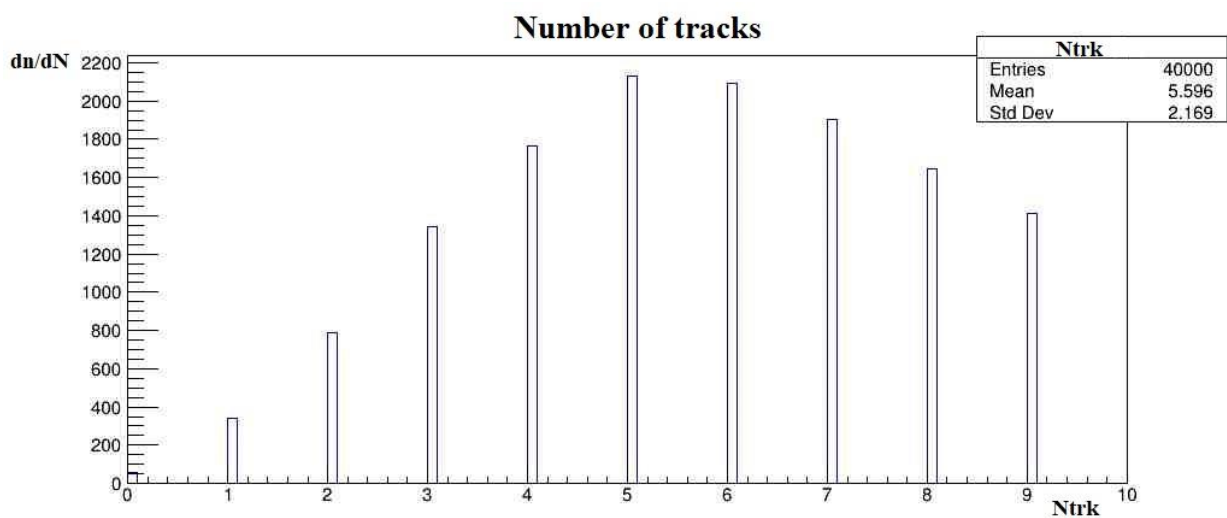


Рисунок 4: распределение количества треков в событии

Так же для дальнейшего изучения и анализа были получены гистограммы для распределения по псевдобыстроте  $\eta$ , по азимутальному углу  $\phi$  и поперечному импульсу  $p_t$  одного трека внутреннего детектора, согласно рисункам 5,6,7 соответственно.

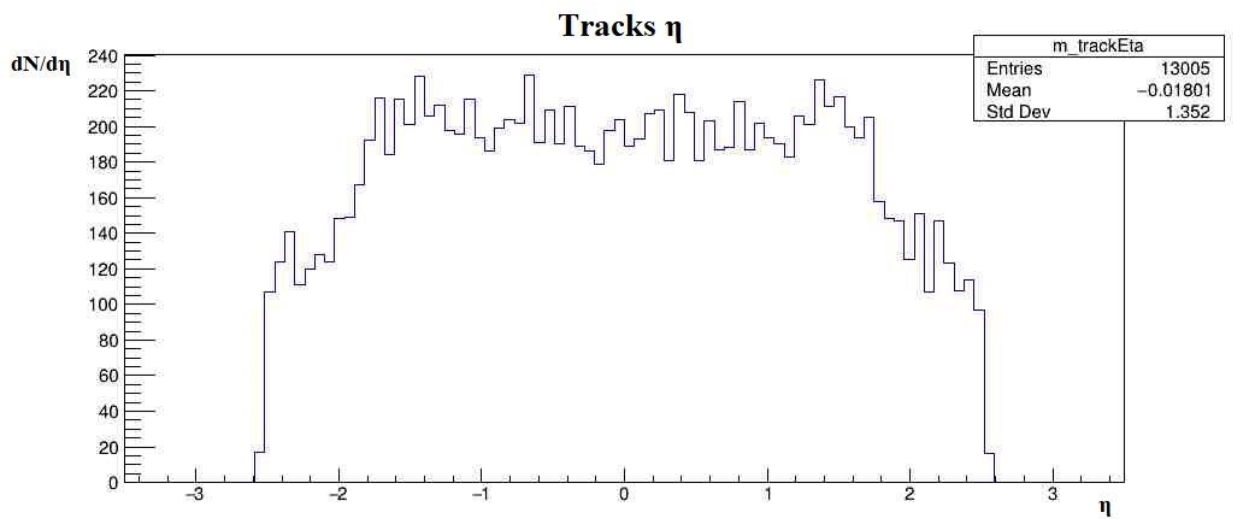


Рисунок 5: распределение по псевдобыстроте  $\eta$  одного трека внутреннего детектора

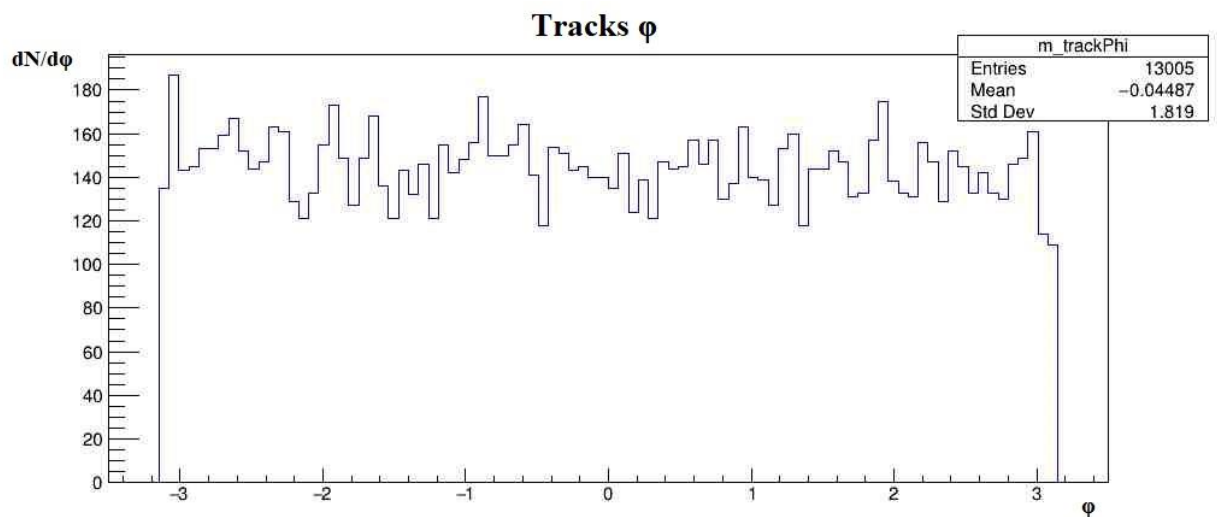


Рисунок 6: распределение по азимутальному углу  $\phi$  одного трека внутреннего детектора

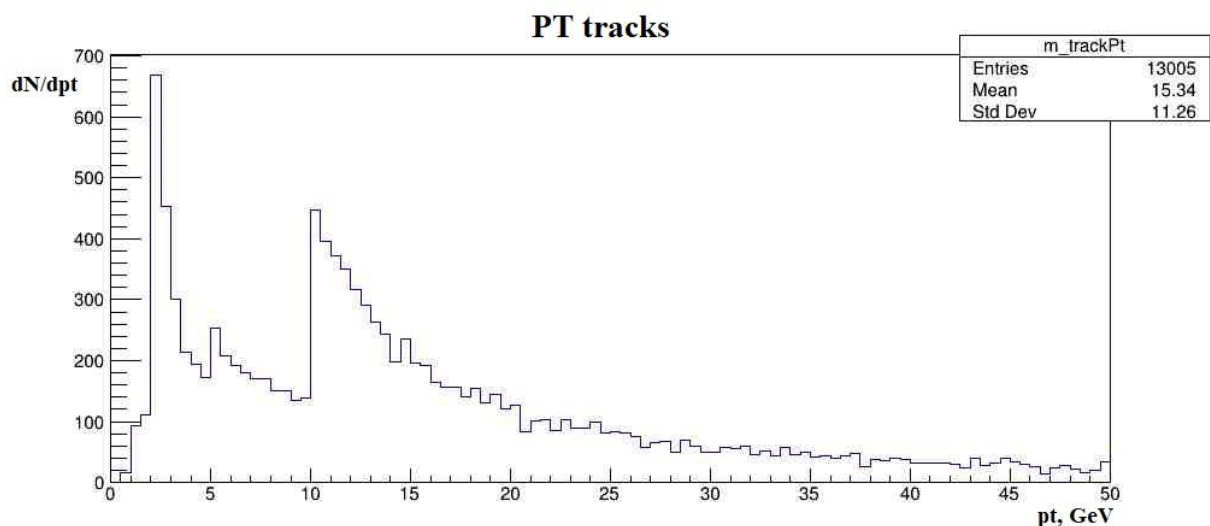


Рисунок 7: распределение по поперечному импульсу  $p_t$  одного трека  
внутреннего детектора

Аналогично были получены гистограммы и для одного трека мюонной системы: для распределения по псевдобыстроте  $\eta$ , по азимутальному углу  $\phi$  и поперечному импульсу  $p_t$ , согласно рисункам 8,9,10 соответственно.

В дальнейшем необходимо убедиться, что полученные гистограммы принадлежат к ультрапериферическим событиям, для этого нужно учесть триггер, ограничения на треки, построить необходимые распределения для системы четырех частиц. В ультрапериферических взаимодействиях распределение по поперечному импульсу  $p_t$  имеет характерный вид, это пик в области малых значений (около 150 МэВ), так как первые частицы образуются с малыми поперечными импульсами.

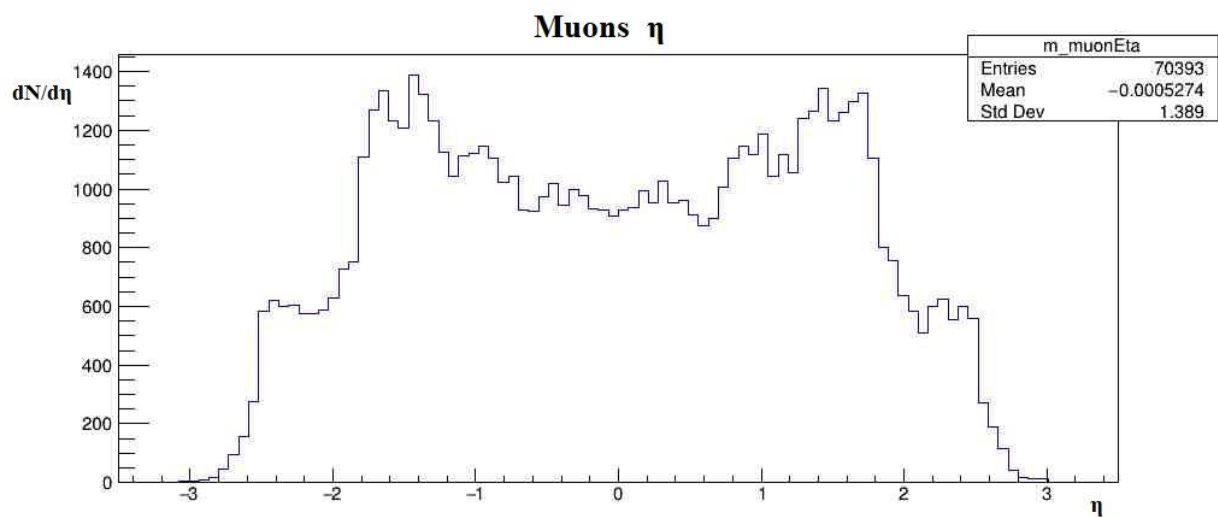


Рисунок 8: распределение по псевдобыстроте  $\eta$  одного трека мюонного детектора

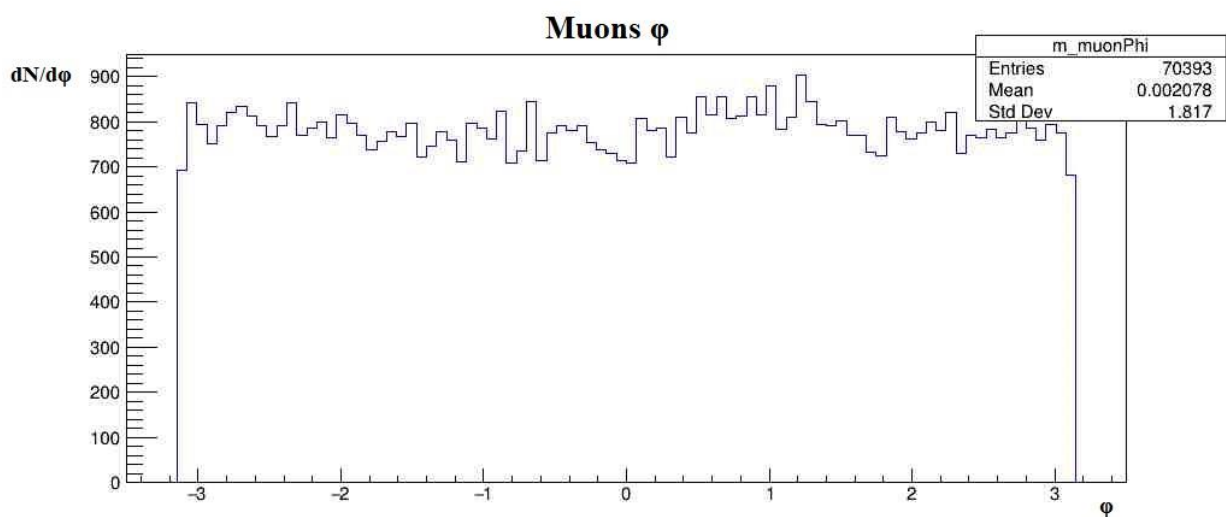


Рисунок 9: распределение по азимутальному углу  $\phi$  одного трека мюонного детектора

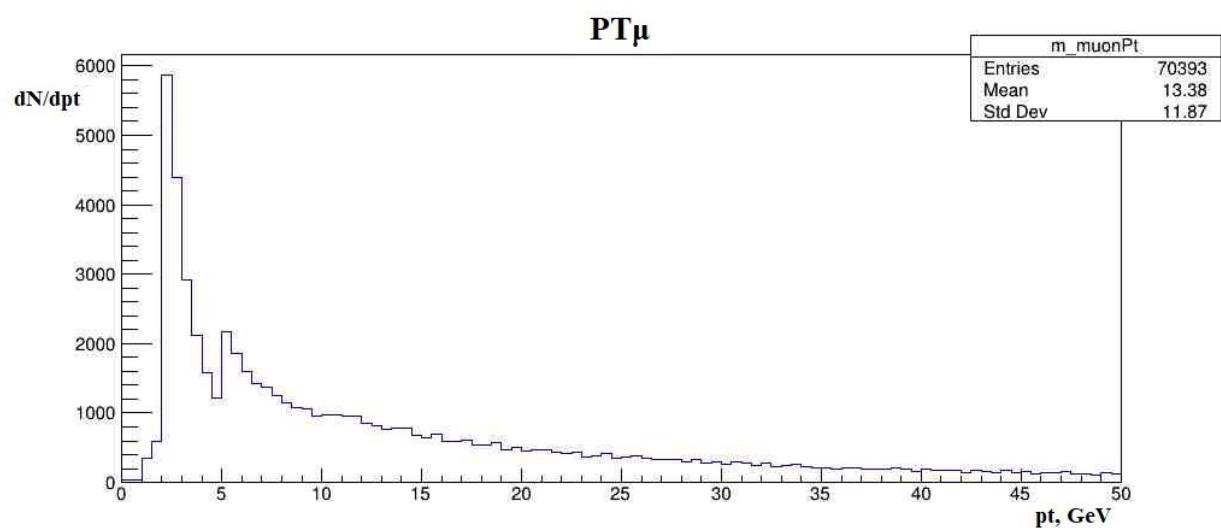


Рисунок 10: распределение по поперечному импульсу  $pt$  одного трека  
мюонного детектора

## Заключение

В данной работе была изучена литература о физике ультрапериферических столкновениях частиц, так же были изучены основные элементы установки ATLAS, которые необходимы для работы эксперимента, были получены навыки работы с программным обеспечением ATLAS. Во время работы с программным обеспечением были освоены основные элементы платформы анализа данных Root. Был начат разрабатываться код для последующего изучения и анализа четырехчастичных событий в ультрапериферических столкновениях.

Во время работы были получены распределения количества мюонов и треков в четырехчастичных событиях. Были получены гистограммы для событий из четырех треков частиц. Полученные распределения по псевдобыстроте  $\eta$ , азимутальному углу  $\phi$  и характерному распределению поперечному импульса  $p_T$  частиц в дальнейшем будут использованы по восстановлению инвариантной массы частиц, с помощью которой можно будет получить более подробную информацию о полученных частицах в ультрапериферических взаимодействиях.

Дальнейшая работа состоит из развития кода для анализа четырехчастичных событий, поиска и идентификации сигналов от образования пар векторных мезонов. В дальнейшем изучении необходимо будет включить в анализ триггер, а также учитывать наложение кинематических ограничений, ограничения на треки, построить необходимые распределения для системы четырех частиц.

## **Список используемых источников**

1. Carlos A. Bertulani, Spencer R. Klein and Joakim Nystrand «Physics of Ultra-Peripheral Nuclear Collisions» (2005), arXiv:0502005v2 [nucl-ex]
2. A.J. Baltza , G. Baurb , D. d'Enterriac , L. Frankfurtd , F. Gelise , V. Guzeyf,w, K. Henckeng,h,1 , Yu. Kharlovi , M. Klasenj , S.R. Kleink , V. Nikulinl , J. Nystrandm, I.A. Pshenichnovn,o , S. Sadovskyi , E. Scapparonep , J. Segerq , M. Strikmanr , M. Tverskoyl , R. Vogtk , S.N. Whitea , U.A. Wiedemannu , P. Yepesv, M. Zhalov «The physics of ultraperipheral collisions at the LHC» (2007), arXiv:0706.3356 [nucl-ex]
3. ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 (2008) S08003
4. Rhodes C. J. Large Hadron Collider (LHC) // Science Progress. — 2013