

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.126.4

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**ПОИСК  $J/\Psi$  МЕЗОНА В УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
НА ДЕТЕКТОРЕ ATLAS:  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ МАЛОГО КОЛИЧЕСТВА СОБЫТИЙ КОГЕРЕНТНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА ПОИСКА  $J/\Psi$ -МЕЗОНА С ПОМОЩЬЮ ПЕРВИЧНОГО  
АНАЛИЗА ДАННЫХ  $\Upsilon$ -МЕЗОНА**

Научный руководитель:

к.ф-м.н., доц. каф. 23 НИЯУ МИФИ

\_\_\_\_\_ Тимошенко С. Л.

Выполнил:

\_\_\_\_\_ Касаткин Д. Д.

Москва 2020

# Содержание

<b>Введение</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>1 Основная часть</b> . . . . .	<b>6</b>
1.1 Сшивка треков . . . . .	6
1.2 Когерентное и некогерентное образование $J/\psi$ -мезона . . . . .	8
1.3 Исследование малого количества событий когерентного образования $J/\psi$ -мезона . . . . .	10
1.4 Проверка алгоритма поиска $J/\Psi$ -мезона с помощью первичного анализа данных $\Upsilon$ -мезона	12
<b>Заключение</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>Список литературы</b> . . . . .	<b>15</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.

Одни и те же частицы могут рождаться в разных видах взаимодействий. Как пример, можно взять  $J/\psi$ -мезон, состоящий из пары очарованного кварка и очарованного антикварка. При распаде  $B_S^0$ -мезона образуется  $W^+$  бозон, отвечающий за слабое взаимодействие. И в дальнейшем рождается  $J/\psi$ -мезон в этом слабом взаимодействии [1].

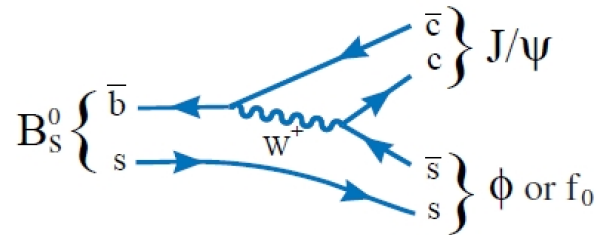


Рисунок 1 — Диаграмма распада  $B_S^0$ -мезона на  $J/\psi$ -мезон и  $\phi$ - или  $f_0$ -мезоны [1]

Но есть и другое взаимодействие, например, электромагнитное, в котором можно увидеть рождение  $J/\psi$ -мезона через гамма-кванты. Это может произойти при близком пролете друг к другу заряженных частиц, имеющих большую кинетическую энергию. Масса частицы, которая будет рождена в электромагнитном взаимодействии, зависит от энергии гамма-кванта. Для того, чтобы повысить энергию гамма-кванта, сталкивают ионы с большим количеством протонов  $Z$ . Такие столкновения называются ультрапериферическими.

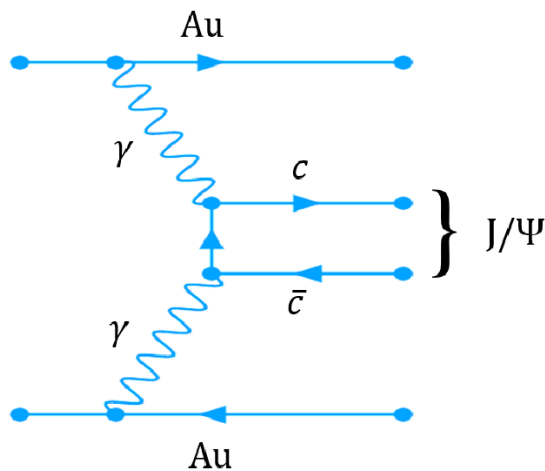


Рисунок 2 — Рождение  $J/\psi$ -мезона через электромагнитный канал

Также существуют центральные и периферические столкновения ионов. В таких столкновениях рождается большое количество частиц по всем трем видам взаимодействий. В ультрапериферических столкновениях частица рождается по электромагнитному или электрослабому каналу.

Можно выделить несколько видов взаимодействий в ультрапериферических столкновениях: померон-гамма взаимодействие, диссоциация частиц при взаимодействии с высокоэнергетичным гамма-квантом, а также образование пар лептон-антилептон или кварк-антикварк. Померон или полюс Померанчука [2] — ведущий полюс Редже, определяющий поведение дифракционных процессов, имеющий квантовые числа вакуума и играющий фундаментальную роль в теории взаимодействий при высоких энергиях.

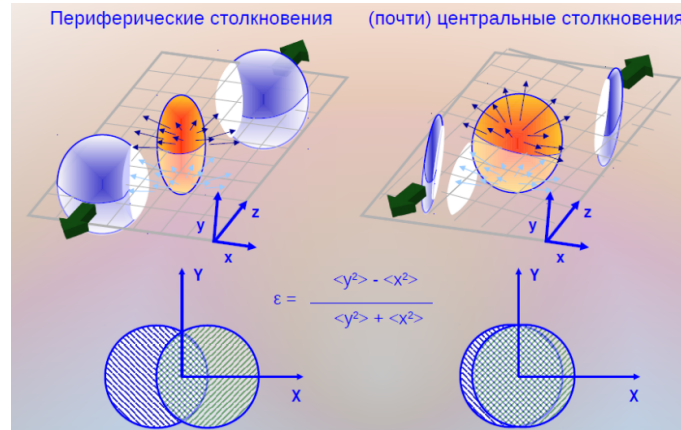


Рисунок 3 — Отличие центральных от периферических столкновений

Ультрапериферические столкновения легких частиц с тяжелыми частицами представляют интерес для изучения. Сильное электромагнитное поле тяжелого иона взаимодействует с дейтроном, и такую реакцию можно расценивать как высокоэнергетичное столкновение. В этом случае наблюдается диссоциация дейтрона, а также сечение такого взаимодействия достаточно высокое [3]. Движущийся с высокой скоростью ион окружен виртуальными гамма-квантами, которые при взаимодействии с гамма-квантами другого иона могут образовать пару частица-античастица. В таких взаимодействиях могут образовываться мезоны, состоящие из пары кварк-антикварк. Более подробно из такого типа частиц изучен  $\rho$ -мезон. Это связано с тем, что  $\rho$ -мезон имеет небольшую массу и рождается чаще, чем более тяжелые мезоны. Но в ультрапериферических взаимодействиях могут рождаться и более тяжелые частицы, например,  $J/\psi$ -мезон, который уже находили на детекторах ALICE и CMS [4; 5].

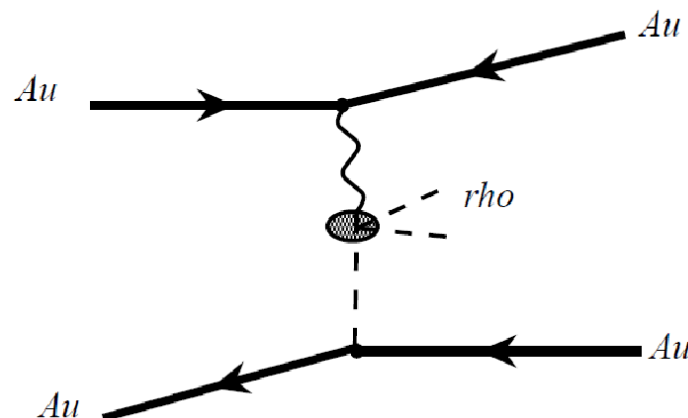


Рисунок 4 — Диаграмма рождения  $\rho$ -мезона в померон-гамма взаимодействии [3]

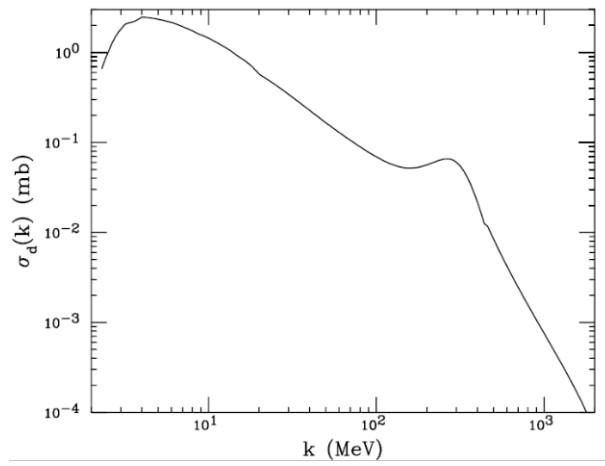


Рисунок 5 — Зависимость сечения фотодиссоциации от энергии гамма-кванта [4]

В данной работе представлен поиск  $J/\psi$ -мезона в ультрапериферических столкновениях на детекторе ATLAS. После проведения «сшивки» треков из трековой системы и треков из мюонной системы была найдена причина малого количества когерентных образований  $J/\psi$ -мезона. Выполнен первичный поиск  $\Upsilon$ -мезона с целью проверки алгоритма поиска векторного  $J/\psi$ -мезона.

## 1 Основная часть

### 1.1 Сшивка треков

Частицы, рождающиеся в ультрапериферических взаимодействиях Pb-Pb, обладают небольшими значениями поперечного импульса и энергии относительно частиц, рождающихся в центральных и периферических столкновениях. Это связано с особенностью ультрапериферических взаимодействий: ядра свинца, пролетающие рядом друг с другом, могут провзаимодействовать с помощью гамма-квантов, при этом вся энергия ядра не преобразуется в энергию рождения новых частиц. В центральных или периферических столкновениях налетающие ядра разрушаются полностью или частично соответственно, но и энергии при этом “закачиваются” в фаербол больше.

Изначально детектирующие системы ATLAS настроены на обнаружение частиц, обладающих достаточно высоким импульсом. Частицы, образованные в ультрапериферических взаимодействиях, будут обладать импульсом в 5-10 раз меньшим, чем в центральных. В этом заключается проблема: детектировать “мягкие” частицы на детекторе ATLAS достаточно сложно.

$J/\psi$ -мезон распадается на два мюона, которые возможно задетектировать и во внутреннем детекторе, и в мюонной камере. Однако, один из мюонов может быть слишком “мягкий”, и мюонная система не обнаружит этот мюон. Во внутреннем детекторе, может содержаться информация об этом мюоне. Но внутренний детектор не идентифицирует частицу, то есть невозможно отличить электрон от мюона в распаде  $J/\psi$ -мезона. В этом случае используется сшивка треков мюонной системы и внутреннего детектора.

Сшивка заключается в отборе событий, в которых есть данные о двух треках во внутреннем детекторе, и данные об одном треке в мюонной системе, при этом величина

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\eta)^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta\phi = \phi_{tr} - \phi_{mu}$ ,  $\Delta\eta = \eta_{tr} - \eta_{mu}$ ,  $\phi_{tr}$  — азимутальный угол трека во внутреннем детекторе,  $\phi_{mu}$  — азимутальный угол трека в мюонной системе,  $\eta_{tr}$  — псевдобыстрота трека во внутреннем детекторе,  $\eta_{mu}$  — псевдобыстрота трека в мюонной системе.

Таблица 1 — Основные моды распада  $J/\psi$ -мезона [6]

Мода распада	Вероятность распада
Адроны	87.7%
$e^+e^-$	5.971%
$\mu^+\mu^-$	5.961%

После сшивки точно будет известно, что из двух частиц будет присутствовать мюон, а другая частица с большой вероятностью тоже будет мюон, если при сложении двух четырехвекторов эффективная масса попадет в окрестность массы  $J/\psi$ -мезона.

Сшивка позволяет отсеять все лишние события, уменьшить погрешность в сравнении со статистикой, полученной из событий внутреннего детектора, который регистрирует помимо мюонов еще электроны и пионы.

Таблица 2 – Сравнение значений эффективной массы и погрешности ее определения

	Значение, ГэВ	Погрешность, ГэВ
Два трека внутреннего детектора ATLAS	3.083	0.091
Сшивка треков мюонной камеры и внутреннего детектора ATLAS	3.101	0.076
Определение массы $J/\psi$ -мезона на ALICE [5]	3.099	0.001

Однако погрешность определения массы  $J/\psi$ -мезона после сшивки все еще составляет десятки МэВ. Это связано с тем, что определенное количество треков мягких частиц не восстанавливается ни в одной системе детектора ATLAS. В дальнейшем анализе необходимо использовать различные системы и другие методы поиска для уменьшения погрешности.

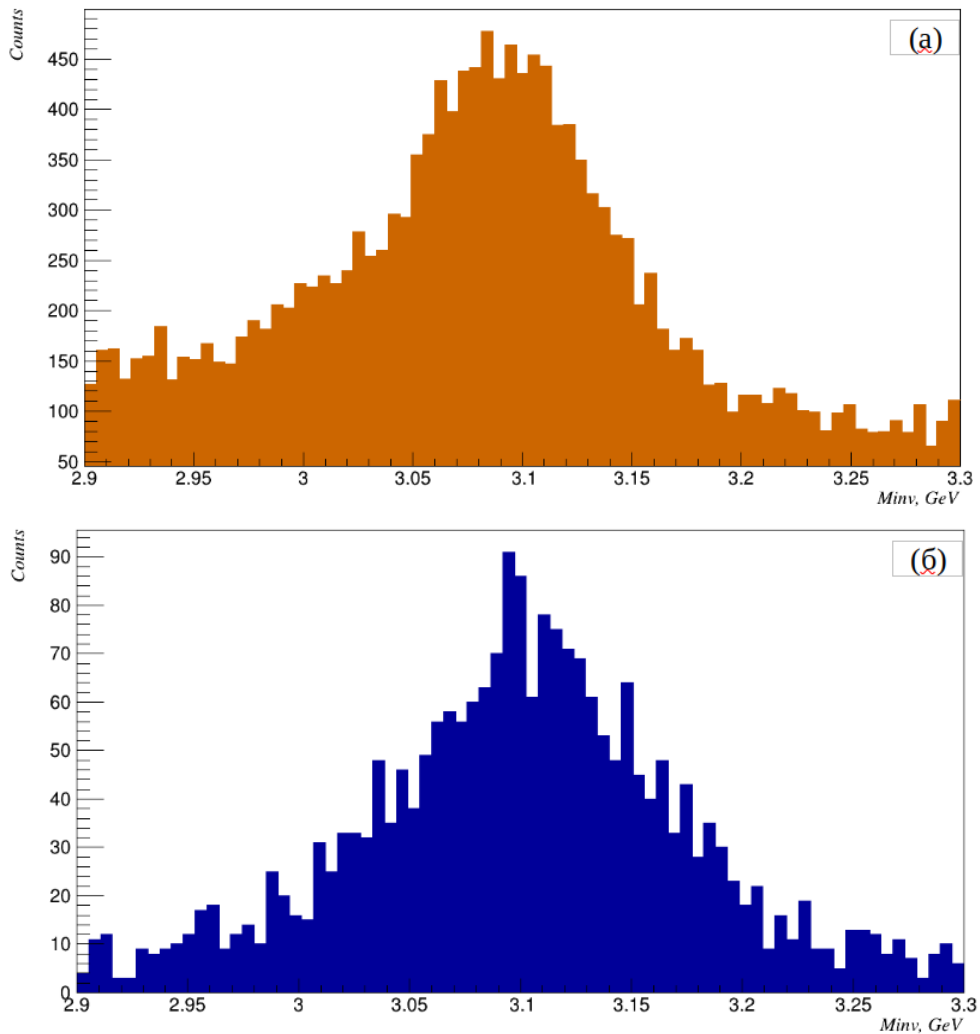


Рисунок 6 — Сравнение эффективных масс: (а) эффективная масса двух треков внутреннего детектора; (б) эффективная масса двух треков (трека в мюонной системе и трека во внутреннем детекторе) после сшивки

## 1.2 Когерентное и некогерентное образование $J/\psi$ -мезона

Ультрапериферические взаимодействия более заметны в столкновениях тяжелых ионов, нежели в протон-протон столкновениях. Энергия гамма-кванта пропорциональна заряду ядра, следовательно, вероятность родиться тяжелой частице в свинец-свинец столкновениях выше в сравнении с протон-протон столкновениями.

Ядра свинца имеют 82 протона и 126 нейтронов, и с любым из этих нуклонов гамма-квант другого пролетающего рядом ядра может провзаимодействовать и родить  $J/\psi$ . В этом случае взаимодействия называют некогерентным. Если же гамма-квант пролетающего рядом ядра взаимодействует со всем ядром как с одной частицей, то взаимодействие называется когерентным [7].

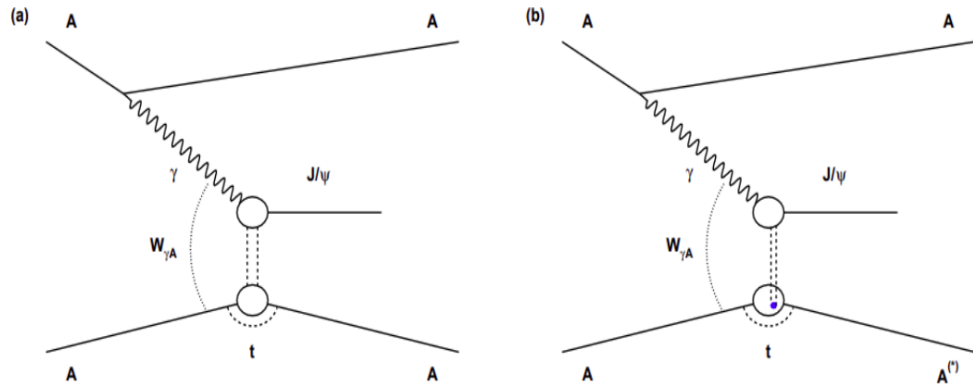


Рисунок 7 — Фотоядерное рождение  $J/\psi$ -мезона в A-A столкновениях: (а) когерентное взаимодействие, (б) некогерентное взаимодействие [7]

Когерентные взаимодействия характеризуются низким поперечным импульсом образовавшегося  $J/\psi$ -мезона. В этом случае импульс, направленный вдоль оси  $z$  также будет невысок. И можно считать, что система находится в системе центра инерции. Это удобно для анализа, так как можно сделать ограничение на угол разлета мюонов в пределах  $150 - 180^\circ$ . Некогерентное образование  $J/\psi$ -мезона будет выходить за область низкого поперечного импульса, и для этого взаимодействия уже нельзя использовать ограничение по углу разлета мюонов [8].

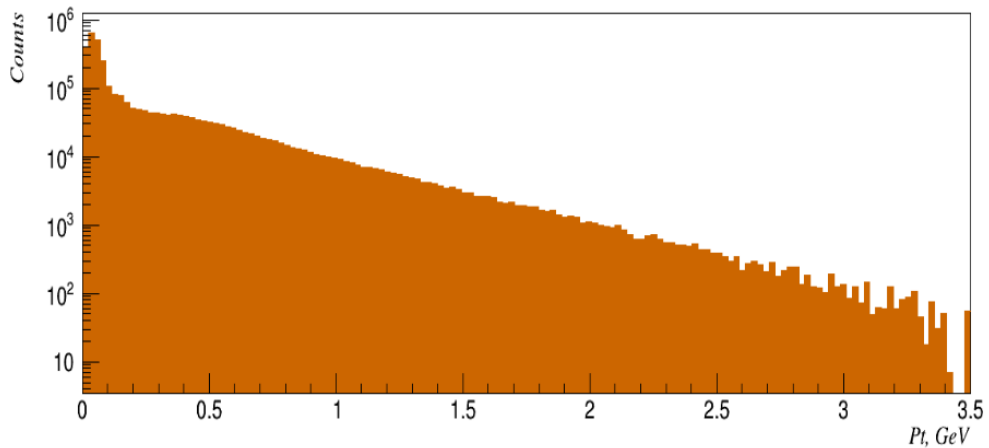


Рисунок 8 — Распределение поперечного импульса двух треков



Сечение когерентного процесса образования  $J/\psi$ -мезона выше, чем сечение некогерентного процесса, однако на детекторе ATLAS наблюдается большее количество событий в пике в некогерентном процессе образования  $J/\psi$ -мезона. Предполагается, что это связано с тем, что системы детектирования не настроены на детектирование мягких частиц, а в некогерентных процессах энергия мюонов может быть выше, чем в когерентных. Ограничение на поперечный импульс  $J/\psi$ -мезона для когерентной и некогерентной областей выбирался меньше 0.15 ГэВ и больше 0.15 ГэВ соответственно. Масса  $J/\psi$ -мезона для когерентной и некогерентной области получилась  $3.084 \pm 0.088$  и  $3.083 \pm 0.093$  соответственно.

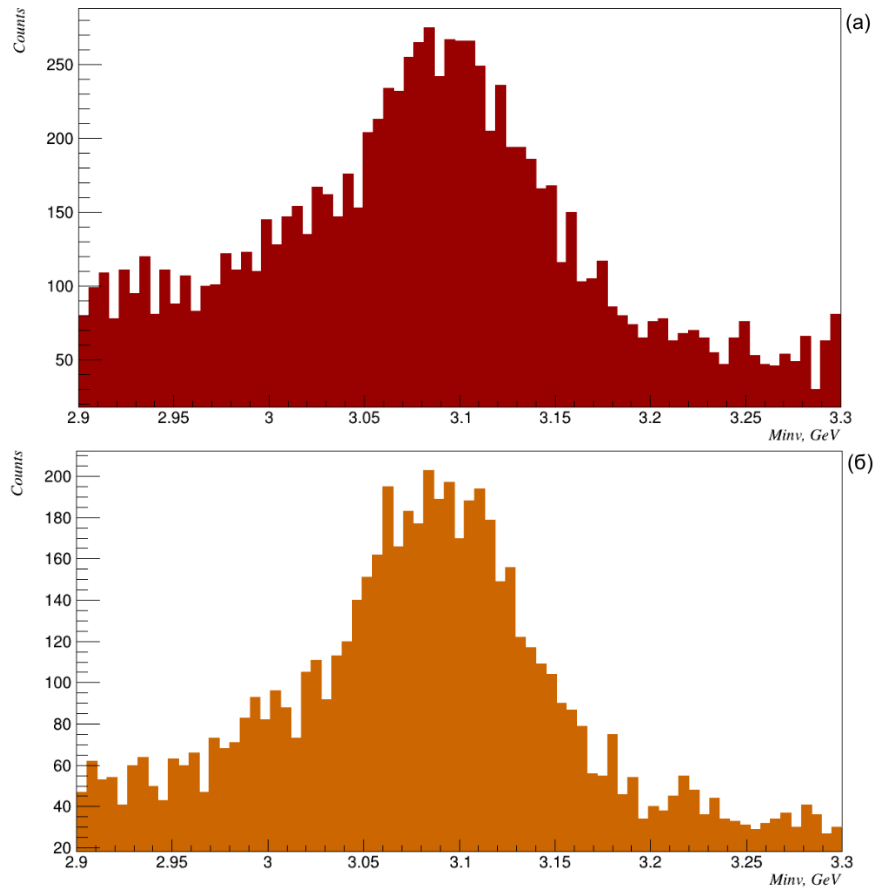


Рисунок 9 — Некогерентное (а) и когерентное (б) образование  $J/\psi$ -мезона

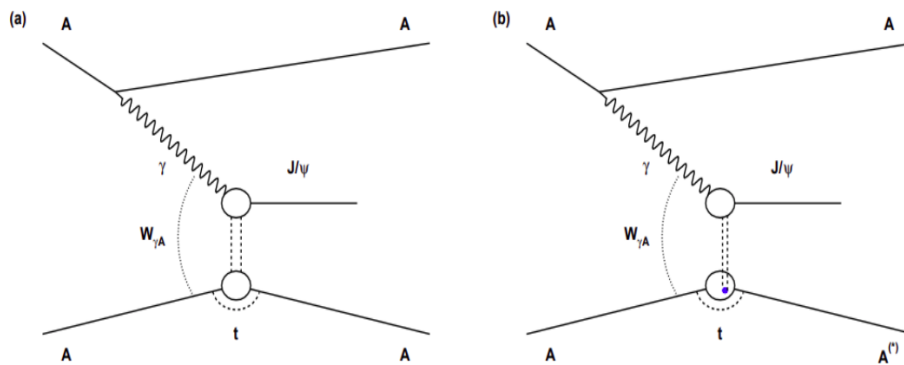


Рисунок 10 — Фотоядерное рождение  $J/\psi$ -мезона в А-А столкновениях: (а) когерентное взаимодействие, (б) некогерентное взаимодействие [7]

### 1.3 Исследование малого количества событий когерентного образования $J/\psi$ -мезона

Выяснилось, что в когерентной области слишком мало событий для проведения анализа. Данные с трекового детектора нельзя использовать, так как после проведения сшивки оказалось, что возможная идентификация мюонов не дает достаточное количество событий. Необходимо рассмотреть рисунок 9, на котором показано распределение поперечного импульса одного трека в мюонной камере.

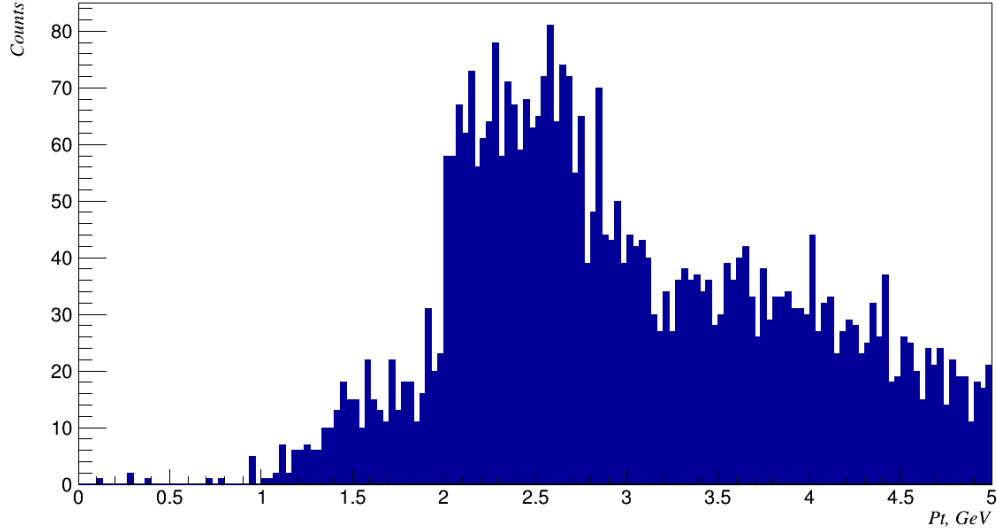


Рисунок 11 — Распределение поперечного импульса трека одного мюона (сумма событий когерентного и некогерентного образования)

Известно, что поперечный импульс мюона, образованного при распаде  $J/\psi$ -мезона, родившегося в ультрапериферических взаимодействиях, будет примерно равен  $\frac{m_{J/\psi}}{2} \approx 1.5$ . Как видно из рисунка 9, есть небольшой пик в области поперечного импульса 1.5 ГэВ. Но таких событий слишком мало в сравнении с событиями, которые начинаются после значения поперечного импульса мюона в 2 ГэВ. Подобную "ступеньку" (резкое повышение событий после отметки 2 ГэВ) можно объяснить тем, что мюонная система детектора ATLAS настроена на поиск жестких частиц, а именно порог установлен на 2 ГэВ.

Для проверки этого утверждения был проведен дополнительный анализ, который заключался в отборе попадающих в область эффективной массы  $J/\psi$ -мезона событий. В этом случае накладывалось ограничение  $2.9 < m_{inv} < 3.3$ , где  $m_{inv}$  — эффективная масса двух треков. Затем сравнивались распределение поперечного импульса с этим ограничением и без этого ограничения. На рисунке 10 представлено распределение поперечного импульса трека одного мюона при максимально возможном ограничении на когерентную область. Сравнивая это распределение с распределением на рисунке 9 можно сказать, что количество событий в когерентной области гораздо меньше, чем общее число событий (когерентных и некогерентных), а также события, попадающие в область эффективной массы  $J/\psi$ -мезона (красный цвет), лежат в области значения 1.5 ГэВ, однако таких событий недостаточно, чтобы проводить дальнейший анализ в когерентной области.

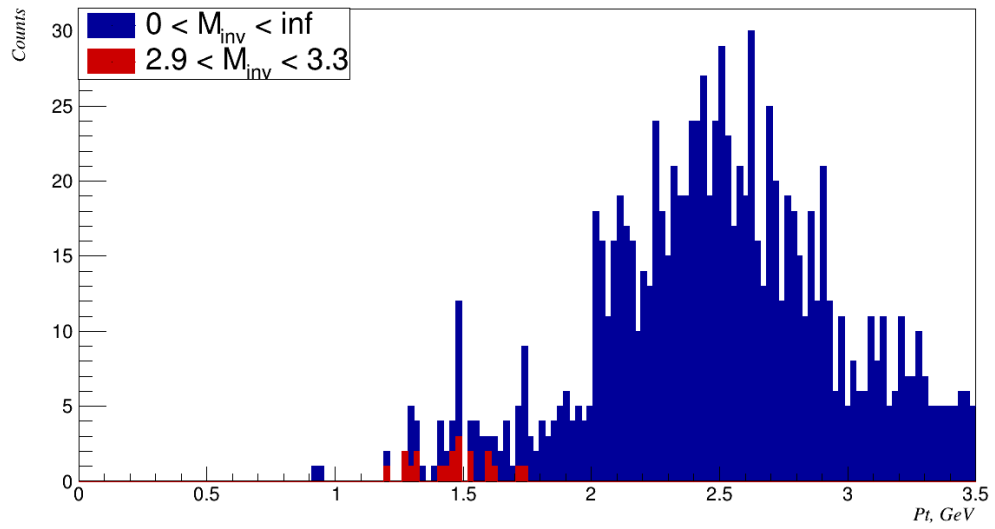


Рисунок 12 — Распределение поперечного импульса трека одного мюона при ограничении на когерентную область ( $pt_{inv} < 0.35$  ГэВ)

#### 1.4 Проверка алгоритма поиска $J/\Psi$ -мезона с помощью первичного анализа данных $\Upsilon$ -мезона

Чтобы сделать проверку алгоритма, применяемого для поиска  $J/\Psi$ -мезона, необходимо применить тот же алгоритм для поиска другого векторного мезона. Для этого был выбран  $\Upsilon$ -мезон. Основные моды распада  $\Upsilon$ -мезона представлены в таблице 3.

Таблица 3 — Основные моды распада  $\Upsilon$ -мезона [6]

Мода распада	Вероятность распада
Адроны	92.24%
$e^+e^-$	2.38%
$\mu^+\mu^-$	2.48%
$\tau^+\tau^-$	2.60%

$\Upsilon$ -мезон очень схож по каналам распадов с  $J/\Psi$ -мезоном, что позволяет применить тот же алгоритм для поиска. Для первичного анализа устанавливались следующие ограничения:

- 1) ограничение на 2 мюона в событии;
- 2) ограничение на эффективную массу треков двух мюонов в интервалах от 8 до 12 ГэВ.

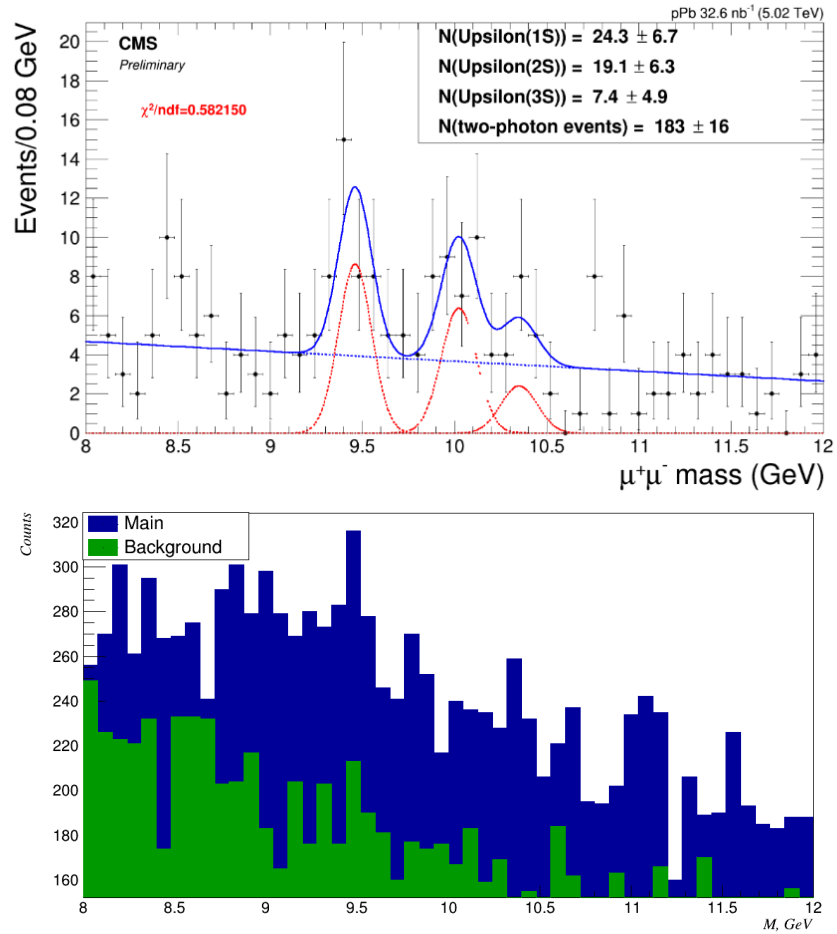


Рисунок 13 — Сравнение гистограммы из исследования [9] и полученные данными из первичного анализа

На рисунке 11 показан приведен результат поиска  $\Upsilon$ -мезона CMS-коллекции в протон-свинцовых столкновениях и данные первичного поиска. Видно, что при сравнении гистограммы из исследования коллекции CMS и данных первичного поиска можно выделить пики 1S, 2S, 3S состояния  $\Upsilon$ -мезона на гистограмме первичного поиска, а также количество событий достаточно для последующей обработки. Следовательно, можно утверждать, что алгоритм применим и к поиску  $J/\Psi$ -мезона.

## Заключение

В данной работе было показано, что поиск  $J/\Psi$ -мезона на детекторе ATLAS возможен, но только не в когерентной области. Это связано с малым числом событий в когерентной области. Чтобы отобрать необходимые события, их должно быть достаточно много. Этому условию соответствует некогерентная область образования  $J/\Psi$ -мезона. Алгоритм поиска не является причиной малого количества событий, что было показано на первичном отборе событий образования  $\Upsilon$ -мезона. Найденное же ранее значение массы  $J/\Psi$ -мезона во внутреннем детекторе имеет большую погрешность относительно значений, полученном на ALICE.

Существуют перспективы по изучению некогерентного образования  $J/\Psi$ -мезона, так как такие работы на детекторе ATLAS не проводились. Наибольший интерес представляет не улучшение известных параметров, а возможность применить новые методы поиска и задействовать дополнительные системы детектора ATLAS.

## Список литературы

1. *LHCb Collaboration*. First observation of  $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$  decays // *Physics Letters B*. — 2011. — Apr. — Vol. 698, no. 2. — P. 115–122. — arXiv: 1102.0206.
2. *Gribov V. N., Pomeranchuk I. Y.* Complex Angular Momenta and the Relation Between the Cross Sections of Various Processes at High Energies // *Phys. Rev. Lett.* — 1962. — Apr. — Vol. 8, issue 8. — P. 343–345.
3. *Klein S., Vogt R.* Deuteron Photodissociation in Ultraperipheral Relativistic Heavy-Ion on Deuteron Collisions // *Phys. Rev. C*. — 2003. — Mar. — Vol. 68, nucl-ex/0303013. — 017902. 10 p.
4. Coherent  $J/\psi$  photoproduction in ultra-peripheral PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the CMS experiment / V. Khachatryan [et al.] // *Phys. Lett. B*. — 2017. — Vol. 772. — P. 489–511. — arXiv: 1605.06966 [nucl-ex].
5. Energy dependence of exclusive  $J/\psi$  photoproduction off protons in ultra-peripheral p–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV / S. Acharya [et al.] // *Eur. Phys. J. C*. — 2019. — Vol. 79, no. 5. — P. 402. — arXiv: 1809.03235 [nucl-ex].
6. Review of Particle Physics / M. Tanabashi [et al.] // *Phys. Rev. D*. — 2018. — Vol. 98, no. 3. — P. 030001.
7. *Cepila J., Contreras J. G., Krelina M.* Coherent and incoherent  $J/\psi$  photonuclear production in an energy-dependent hot-spot model // *Phys. Rev. C*. — 2018. — Feb. — Vol. 97, issue 2. — P. 024901.
8. Coherent  $J/\psi$  photoproduction in ultra-peripheral Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV / B. Abelev [et al.] // *Phys. Lett. B*. — 2013. — Vol. 718. — P. 1273–1283. — arXiv: 1209.3715 [nucl-ex].
9. *Chudasama R., Dutta D.* Exclusive Photoproduction of Upsilon in pPb collisions with the CMS // *PoS*. — 2017. — Vol. ICPAQGP2015. — P. 042. — arXiv: 1607.00786 [hep-ex].