

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

УДК 539.126

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
РЕКОНСТРУКЦИЯ $\chi_{c1}(3872)$ МЕЗОНА В
РАСПАДАХ НА 2 МЮОНА И 2
ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНА

Научный руководитель

к.ф.-м.н.

_____ И. В. Елецких

Студент

_____ Е. В. Васильева

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Теоретическая часть	4
1.1 Частица $\chi_{c1}(3872)$	4
2 Практическая часть	6
3 Заключение	10

ВВЕДЕНИЕ

Впервые частица $\chi_{c1}(3872)$ была обнаружена в 2003 году экспериментом Belle на электрон-позитронном коллайдере KEKB в Японии. Ее обнаружили в спектре масс $J/\psi\pi^+\pi^-$ от $B \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-K^+$ распада. Затем, эта частица также изучалась в столкновениях e^+e^- такими экспериментами, как BaBar, BESIII, в протон-антипротон столкновениях в CDF и D0, в протоно-протон (p^+p^+) столкновениях в экспериментах ATLAS, CMS и LHCb; в протон-ион столкновениях в эксперименте LHCb; и в свинец-свинец столкновениях в эксперименте CMS.^[1]

В эксперименте CDF было определено, что единственными возможными квантовыми числами для $\chi_{c1}(3872)$ являются $J^{PC} = 1^{++}$ и 2^{-+} . На Большом адронном коллайдере (БАК) частица исследовалась в эксперименте LHCb, который окончательно подтвердил, что квантовое число для $\chi_{c1}(3872)$ это 1^{++} .^[2]

Таким образом, **целью** данной научно-исследовательской работы является реконструкция $\chi_{c1}(3872)$ мезона в распадах на 2 мюона и 2 заряженных пиона.

Также, можно выделить следующие задачи **задачи**:

- Ознакомиться с теоретической информацией о частице $\chi_{c1}(3872)$.
- Написать собственную программу, которая будет создавать распределение системы из 4 частиц (двух мюонов и двух пи-мезонов) на основе известных данных, полученных на эксперимента ATLAS
- Получить на гистограмме распределения пик, который и будет свидетельствовать о существовании $\chi_{c1}(3872)$
- Рассчитать количество событий, отвечающих $\chi_{c1}(3872)$ на гистограмме.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Частица $\chi_{c1}(3872)$

Как уже было сказано выше, существование так называемого "экзотического" мезона, не укладывающегося в традиционную модель $q\bar{q}$ мезонов, было подтверждено множеством исследований: Belle, CDF, D0, BaBar, LHCb и CMS.

Близость массы состояний $\chi_{c1}(3872)$ к порогу $D^0\bar{D}^{*0}$, достаточно узкая ширина (порядка 1 МэВ^[3]) и квантовые числа $J^{PC} = 1^{++}$ позволяют предположить, что $\chi_{c1}(3872)$ является молекулярным состоянием, в котором $D^0\bar{D}^{*0}$ и \bar{D}^0D^{*0} слабо связаны и пространственно разделены. Тем не менее, ожидаемая вероятность образования такого молекулярного состояния в высокоэнергетических столкновениях слишком мала, чтобы объяснить наблюдаемое количество частиц $\chi_{c1}(3872)$. При этом его измеренные характеристики, такие как поперечный импульс и спектры быстроты, совпадают с таковыми для обычных состояний чармония.

Другие гипотезы предполагают, что $\chi_{c1}(3872)$ может быть чармонием $\chi_{c1}(2P)$, гибридным состоянием или тетракварком. Кроме того, сильное нарушение изоспина говорит о небольшой вероятности того, что это состояние является чистым чармонием.

Анализ формы линии $\chi_{c1}(3872)$ в распадах на $J/\psi\pi^+\pi^-$ и $D^0\bar{D}^{*0}$, а также их совместное изучение позволяют получить информацию о низкоэнергетических параметрах рассеяния, таких как длина рассеяния и эффективный радиус взаимодействия. Эти данные могут помочь в исследовании внутренней структуры $\chi_{c1}(3872)$, но текущая точность экспериментов недостаточна для окончательных выводов. Увеличение объёма данных, повышение разрешения и объединение результатов экспериментов могут улучшить ситуацию.

Особенно значимым аспектом $\chi_{c1}(3872)$ является близость его массы (3782 МэВ) к пороговому значению $D^0\bar{D}^*$:

- Масса $D^0 \simeq 1865$ МэВ
- Масса $\bar{D}^* \simeq 2007$ МэВ
- Суммарная масса $D^0\bar{D}^* \simeq 3872$ МэВ

Именно тот факт, что суммарная масса $D^0\bar{D}^*$ и масса $\chi_{c1}(3872)$ приблизительно равны - частица $\chi_{c1}(3872)$ находится в пределах 200 кэВ от порога образования пары $D^0\bar{D}^*$ - привел к появлению одного из предположений о природе данной частицы, а именно к предположению о том, что частица $\chi_{c1}(3872)$ является адронной молекулой, состоящей из двух D-мезонов, связанных слабым взаимодействием.

Эта гипотеза структуры $\chi_{c1}(3872)$ на данный момент является наиболее правдоподобной^[4].

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для анализа были взяты данные с эксперимента ATLAS с энергией 13 ТэВ. Среди этих данных были отобраны два мюона - возможные кандидаты на создание J/ψ , а их треки были перефитированны так, чтобы их инвариантная масса точно совпадала с массой J/ψ . К ним подобраны два адронных трека. В результате была получена система из 4 частиц: двух мюонов и двух пионов - которая в дальнейшем и использовалась для анализа.

Сперва было построено распределение инвариантной массы отдельно для двух мезонов, чтобы убедиться, что их масса действительно равна массе J/ψ .

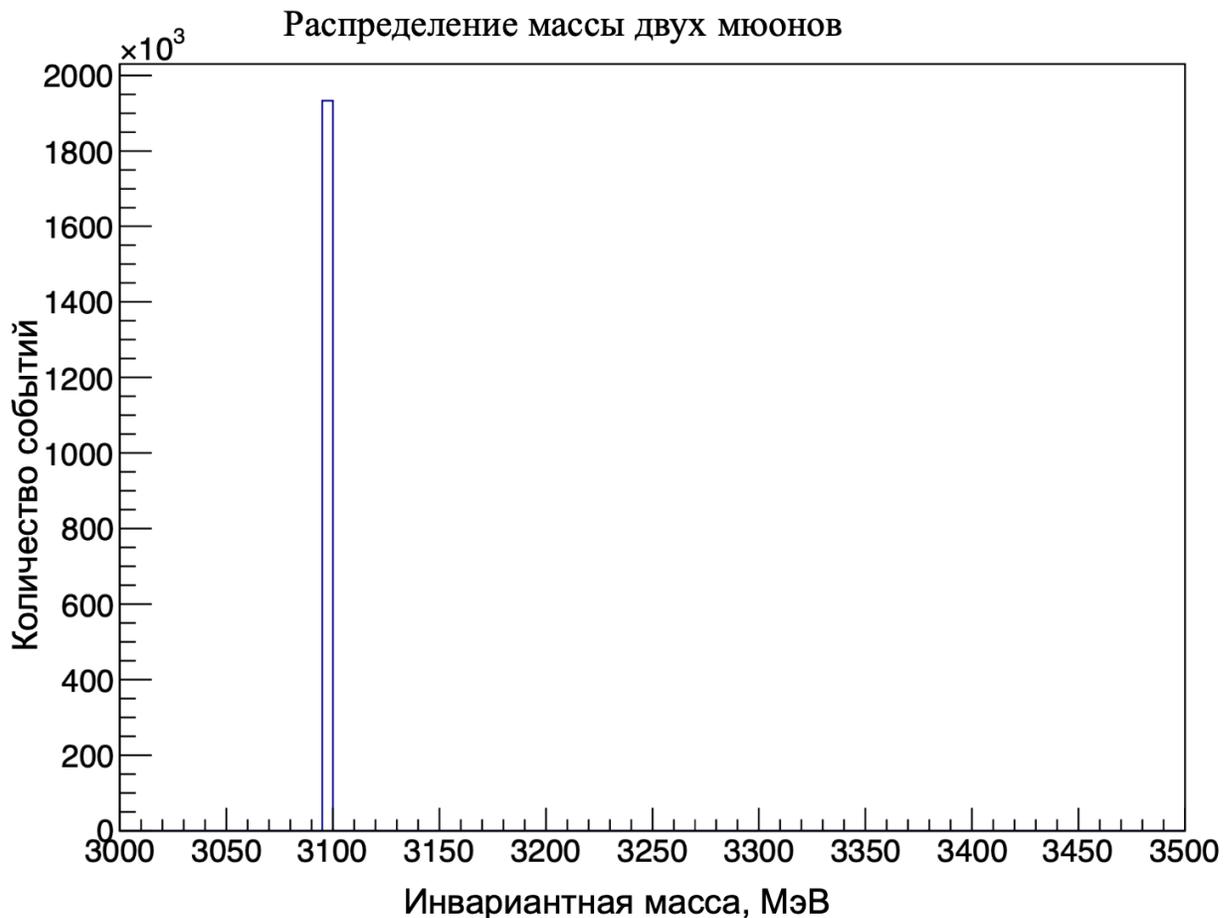


Рисунок 1 — Распределение инвариантной массы двух мюонов

По полученному распределению можно увидеть, что инвариантная масса двух мюонов лежит между 3090 и 3100 МэВ, что соответствует массе $J/\psi = 3096.916 \pm 0.011$ МэВ^[1].

Затем строилось распределение инвариантной массы для системы всех 4 частиц.



Рисунок 2 — Распределение инвариантной массы системы из четырех частиц: двух мюонов и двух пионов

На полученном распределении отчетливо видно два пика: один в промежутке от 3650 до 3750 МэВ и второй в промежутке от 3800 до 3900 МэВ. В данной работе рассматривается именно второй промежуток, а пик, наблюдаемый на нем - и есть $\chi_{c1}(3872)$.

После получения распределения его необходимо отфитировать, то есть

найти такие параметры функции, которые будут наилучшим образом описывать полученное распределение.

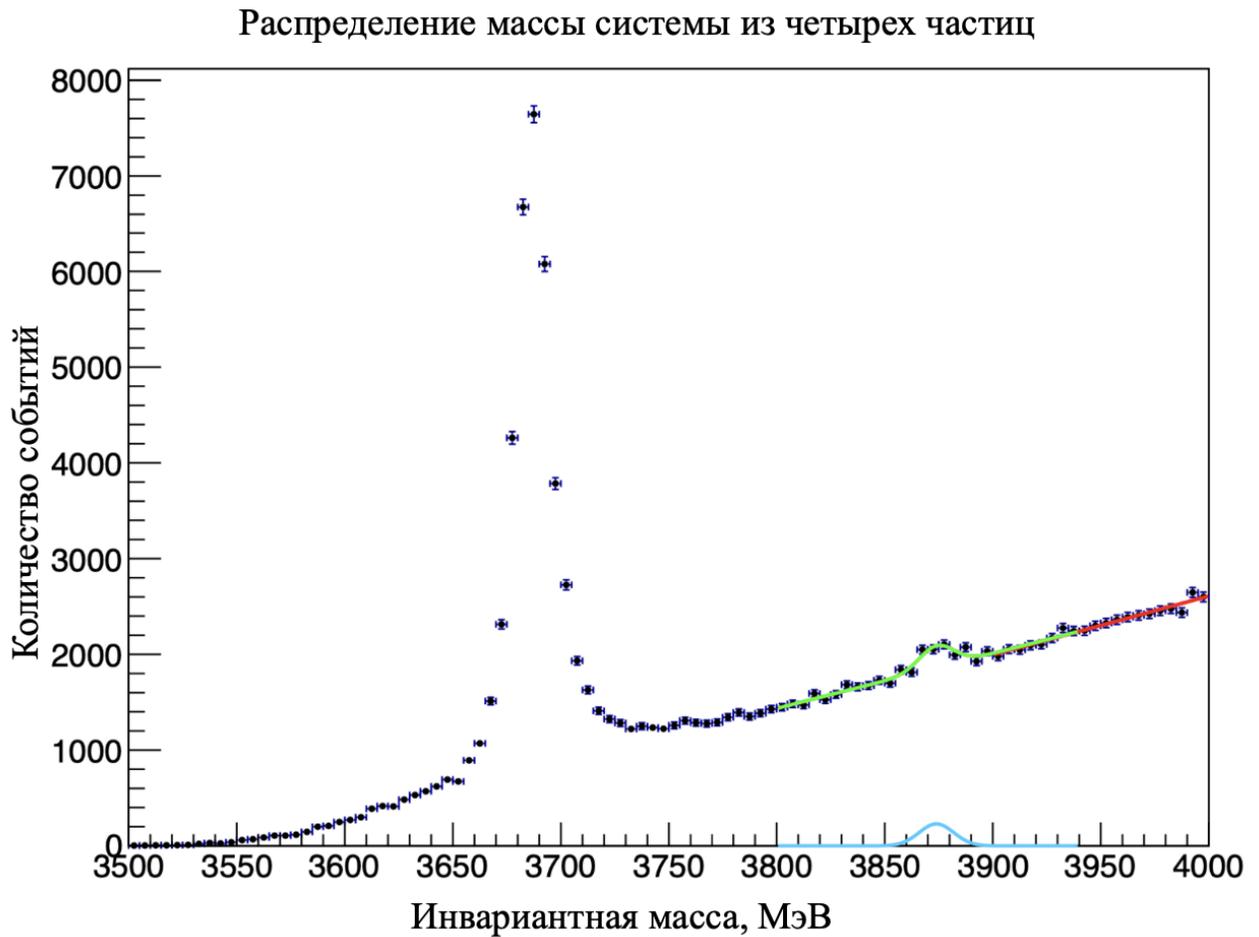


Рисунок 3 — Фитированное распределение инвариантной массы системы из четырех частиц: двух мюонов и двух пионов

В данном случае фит пика был задан гауссианом, а фон - полиномом 1 степени. Наиболее важными в данном случае являются параметры гауссиана, полученные в результате фитирования. Их можно представить следующим образом:

Таблица 1 — Параметры фитирования сигнала гауссианом.

Масса	3872.94 ± 1.33327
Ширина	7.98396 ± 1.37001
Амплитуда	229.522 ± 33.621

Затем необходимо найти количество событий, отвечающее $\chi_{c1}(3872)$. Для этого нужно посчитать Гауссов интеграл на том интервале, на котором строился гауссиан.

$$N = A \int_{3800}^{3900} \exp\left(-0.5 \frac{(x - \mu)^2}{\sigma^2}\right) dx \quad (1)$$

Где μ - масса (центр распределения), σ - ширина (стандартное отклонение), A - амплитуда.

$$N = 229.522 \int_{3800}^{3900} \exp\left(-0.5 \frac{(x - 3872.94)^2}{\left(\frac{7.98396}{5.0}\right)^2}\right) dx \quad (2)$$

Вычисляя данный интеграл, получаем, что количество событий, отвечающих $\chi_{c1}(3872)$: $N = 919 \pm 207$.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проводилась реконструкция $\chi_{c1}(3872)$ мезона в распадах на 2 мюона и 2 заряженных пиона.

Сперва изучалась теоретическая информация о мезоне $\chi_{c1}(3872)$. Этот, так называемый, "экзотический" мезон, квантовое число которого $J^{PC} = 1^{++}$. На данный момент, наиболее правдоподобная гипотеза структуры $\chi_{c1}(3872)$ - это адронная молекула, состоящая из $D^0\bar{D}^*$ мезонов.

Затем, анализировались данные с эксперимента ATLAS, среди которых были отобраны два мюона (кандидаты J/ψ), к ним подобраны два адронных трека (пионы). Сначала было построено распределение инвариантных масс двух мюонов, чтобы убедиться, что отобранные мюоны - действительно кандидаты J/ψ . И уже после этого строилось распределение инвариантной массы системы всех четырех частиц, которое в дальнейшем было отфитировано функцией гаусса.

Далее для этой функции гаусса были получены параметры:

$$\text{Масса} = (3872.94 \pm 1.33327)$$

$$\text{Ширина} = (7.98396 \pm 1.37001)$$

$$\text{Амплитуда} = (229.522 \pm 33.621)$$

Таким образомлучилось определить инвариантную массу для $\chi_{c1}(3872)$:

$$\text{Масса} = (3872.9 \pm 1.3) \text{ МэВ}$$

Последнее значение данных для массы $\chi_{c1}(3872)$, приведенные Particle Data Group, составляет $(3871,64 \pm 0,06) \text{ МэВ}^{[5]}$. Так, полученное в данной работе значение совпадает с этим значением в пределах погрешности.

Также, с помощью интеграла гаусса, было рассчитано количество собы-

тий, отвечающих $\chi_{c1}(3872)$:

$$N = 919 \pm 207.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Measurements of $\psi(2S)$ and $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector / M. Aaboud [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2017. — Янв. — Т. 2017, № 1. — ISSN 1029-8479. — DOI: 10.1007/jhep01(2017)117.
2. Probing the nature of the $\chi_{c1}(3872)$ state using radiative decays / R. Aaij [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2024. — Ноябрь. — Т. 2024, № 2. — ISSN 1029-8479. — DOI: 10.1007/jhep11(2024)121.
3. Study of the lineshape of the $\chi_{c1}(3872)$ state / R. Aaij [и др.] // Physical Review D. — 2020. — Ноябрь. — Т. 102, № 3. — ISSN 2470-0029. — DOI: 10.1103/physrevd.102.092005.
4. Review of Particle Physics / S. Navas [и др.] // Physical Review D. — 2024. — Август. — Т. 110, № 3. — ISSN 2470-0029. — DOI: 10.1103/physrevd.110.030001.
5. A model-independent analysis of the isospin breaking in the $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ and $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^0\pi^-$ decays / J. M. Dias [и др.] // arXiv. — 2024. — DOI: 10.48550/ARXIV.2409.13245.