

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В.П. ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



**Гридин Андрей Олегович**

**Изучение рождения пар  $J/\psi$  в эксперименте COMPASS**

Специальность 1.3.15 —  
«Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких  
энергий»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук

Дубна—2023

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
**Гуськов Алексей Вячеславович**

Официальные оппоненты: **Салеев Владимир Анатольевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, профессор кафедры физики

**Булеков Олег Владимирович**,  
кандидат физико-математических наук,  
НИЯУ МИФИ, кафедра №7 Экспериментальной  
ядерной физики и космофизики, доцент

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru>  
С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного  
совета доктор физико-математических  
наук

Г.А. Карамышева

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Квантовая хромодинамика (КХД) — теория сильных взаимодействий, которая описывает процессы, происходящие на больших энергетических масштабах, при которых константа сильного взаимодействия  $\alpha_S$  принимает значения меньше единицы. При  $\alpha_S > 1$  в КХД неприменим пертурбативный подход, амплитуду процесса нельзя разложить в ряд по степеням константы взаимодействия. Это приводит к проблеме описания структуры адронов в КХД — одной из важнейших проблем современной физики элементарных частиц. Для описания процессов взаимодействия адронов используются функции партонных распределений, которые не считаются из первых принципов, а извлекаются из экспериментальных данных. На масштабах, близких к масштабам адронов, применяют факторизационную теорему, согласно которой сечение жесткого взаимодействия адронов А и В может быть представлено в виде свертки функций партонных распределений и сечения жесткого взаимодействия партонов, которое описывается КХД:

$$\sigma_{AB} \sim \sum_{a,b} \int dx_a \int dx_b f_a^A(x_a) f_b^B(x_b) \sigma_{ab}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ab}$  — сечение жесткого взаимодействия партонов  $a$  и  $b$ ,  $f_a^A(x_a)$  и  $f_b^B(x_b)$  — функции партонных распределений.

В современной кварковой модели адроны могут быть описаны, как составные частицы, включающие в себя партоны: глюоны, валентные кварки и морские кварки. Валентные кварки определяют квантовые числа адронов. Глюоны являются переносчиками сильного взаимодействия, а также могут разделяться, и формировать кварк-антикварковые пары (морские кварки) и другие глюоны.

В 1980-ом году в работе [1] выдвинута гипотеза, в которой постулируется существование долгоживущей фоковской компоненты в адроне, содержащей пару  $c$ -кварков. Такие кварки могут появляться в результате непертурбативных взаимодействий глюонов, и несут большую часть импульса адрона. Понимание роли непертурбативных взаимодействий в адронах — один из важнейших вопросов КХД, связанных со структурой адронов. Несмотря на многочисленные попытки поиска проявлений внутреннего очарования адронов, первые указания на существование внутренних очарованных кварков в протоне были получены коллаборацией NNPDF из глобального фита экспериментальных данных лишь в 2022-ом году [2].

Кварковая модель не запрещает существование сложных систем, например, состоящих из четырёх или пяти кварков. Существование тетракварковых состояний, в состав которых входит две пары  $c$ -кварков, было впервые предсказано еще в 1975-ом году [3—5], а экспериментальные указания на существование таких систем появились только в 2020-ых годах [6—8].

Впервые события рождения пар  $J/\psi$  были экспериментально обнаружены коллаборацией NA3 в 1980-х [9; 10]. Экспериментальная установка NA3 представляла собой типичный эксперимент на неподвижной мишени и использовала пионные пучки 150 и 280 ГэВ/с, а также протонный пучок 400 ГэВ/с. Данные NA3 по парному рождению  $J/\psi$  вызвали немалый интерес, и были интерпретированы с точки зрения различных механизмов рождения: одиночное и двойное рассеяние партонов [11—13], проявление внутреннего очарования в пионе [14], рождение пары  $J/\psi$  через промежуточное связанное состояние [15]. В последнее десятилетие события парного рождения  $J/\psi$  наблюдаются и изучаются в коллайдерных экспериментах на LHC [16—19] и Тэватроне [20].

COMPASS – эксперимент на неподвижной мишени, расположенный в ЦЕРН (г. Женева, Швейцария), который использует мюонные (160 ГэВ/с) и адронные (190 ГэВ/с) пучки для изучения спиновой структуры нуклонов и адронной спектроскопии. В физическую программу эксперимента входит изучение спиновой структуры нуклонов через процесс Дрелла-Яна с использованием пионного пучка 190 ГэВ/с. Данные эксперимента COMPASS могут быть использованы для изучения механизмов рождения пар  $J/\psi$  на энергиях  $\sqrt{s} = 18.9$  ГэВ, а также могут разрешить вопросы, связанные с проявлением внутреннего очарования адронов в других экспериментах.

**Целью работы** является изучение механизмов рождения пар  $J/\psi$  мезонов и определение их вклада в сечение рождения пар  $J/\psi$  в условиях эксперимента COMPASS.

В список основных **задач** работы входят:

1. разработка критериев отбора и поиск событий одиночного и парного рождения  $J/\psi$  в данных эксперимента COMPASS;
2. моделирование и изучение акцептанса установки для событий рождения одиночных и парных  $J/\psi$ ;
3. выявление основных источников фоновых событий и систематических погрешностей;
4. оценка сечения рождения парных  $J/\psi$  на различных ядерных мишенях;
5. оценка вклада основных механизмов рождения;
6. оценка статистической и систематической погрешностей измерения.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. определены сечения рождения пар  $J/\psi$  при взаимодействии  $\pi^-$  пучка 190 ГэВ/с с ядерными мишенями ( $\text{NH}_3$ , Al, W) в области  $x_{||\ 2J/\psi} > 0.4$ . Для  $\text{NH}_3$  мишени получены дифференциальные сечения рождения пар  $J/\psi$  в зависимости от кинематических переменных;
2. впервые изучены вклады в сечение различных механизмов рождения пар  $J/\psi$  мезонов на энергиях эксперимента COMPASS. Показано, что экспериментальные данные в пределах ошибок согласуются с моделью одиночного рассеяния партонов. Получено ограничение на верхний предел сечения рождения пар  $J/\psi$  через механизм внутреннего очарования пиона в диапазоне  $x_{||\ 2J/\psi} > 0.4$ :  $\sigma_{2J/\psi}^{IC} / \sigma_{2J/\psi} < 0.24$  (CL = 90%);

3. было показано, что интерпретация результатов NA3 по рождению пар  $J/\psi$  в пион-нуклонных взаимодействиях в рамках доминирования механизма внутреннего очарования пиона неверна.

### **Научная новизна.**

1. Впервые проанализирован вклад различных механизмов в рождение пар  $J/\psi$  в пион-нуклонных взаимодействиях на энергиях  $\sqrt{s} = 18.9$  ГэВ в системе центра масс.
2. Получены исходные данные для изучения ядерных эффектов и А-зависимости процессов, в которых рождается состояние с тяжелой массой.
3. Получен спектр инвариантных масс пар  $J/\psi$ , который позволит проверить различные теоретические модели рождения экзотических состояний, и установить верхний предел на их сечение рождения.

**Практическая значимость:** результаты работы могут быть использованы для изучения внутренней структуры адронов и спектроскопии экзотических адронных состояний, а также для проектирования будущих экспериментов физики частиц (NICA SPD, AFTER@LHC, и т.д.).

**Достоверность** результатов обеспечивается независимой проверкой результатов работы внутри коллаборации COMPASS, а также публикацией результатов работы в рецензируемых журналах.

**Апробация работы:** результаты диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на рабочих совещаниях коллаборации COMPASS, на сессиях Программно-консультативного комитета по физике частиц ОИЯИ, семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, были доложены автором на следующих международных конференциях:

1. 9th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP-2020), Крит, Греция, 4-12 сентября 2020.
2. Quarkonia as Tools 2021 (проходила онлайн, в связи с Covid-19), 22-26 марта 2021.
3. 13th International workshop on Multiple Partonic Interactions at the LHC (MPI@LHC 2022), Мадрид (Испания), 14-18 ноября 2022.
4. International Workshop on Hadron Structure and Spectroscopy 2023, Прага, Чехия, 25-28 июня 2023.

**Личный вклад:** автор диссертации принял непосредственное участие на каждом этапе набора и анализа данных. Автор участвовал в наборе экспериментальных данных 2018-го года, которые использовались в анализе, принимал участие в предварительной обработке набранных данных, внес основной вклад в отбор и анализ событий рождения пар  $J/\psi$  в эксперименте COMPASS. Автором разработаны и реализованы критерии отбора событий, оценено число сигнальных и фоновых событий, выполнено Монте-Карло моделирование изучаемого процесса, изучен отклик установки, установлены источники систематических

ошибок, и определены их вклады. Автор принял активное участие в обсуждении результатов анализа внутри коллаборации COMPASS, внёс определяющий вклад в подготовку публикации с результатами анализа.

**Публикации:** основные результаты по теме диссертации изложены в 3 публикациях [1—3] в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus.

**Объем и структура работы:** диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 111 страниц, включая 52 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 112 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулирована цель, и поставлены задачи работы. Также сформулированы положения, выносимые на защиту, и описана научная новизна представляемой работы.

**Первая глава** посвящена проблеме описания структуры адронов. Приведено описание механизмов рождения пар  $J/\psi$  в партонных взаимодействиях, а также через механизм внутреннего очарования адронов. Также выполнен обзор экспериментальных результатов по изучению рождения пар  $J/\psi$  в различных экспериментах, и приводятся примеры применения гипотезы внутреннего очарования адронов в анализе данных.

Впервые события с двумя  $J/\psi$  в конечном состоянии были обнаружены в данных эксперимента NA3 [9; 10]. В работе [14] высказано предположение о том, что все пары  $J/\psi$  в данных NA3 появились через механизм внутреннего очарования пиона. В этом случае пара  $J/\psi$  материализуется благодаря фоковой компоненте пиона  $|d\bar{u}c\bar{c}c\bar{c}\rangle$ .

Во **второй главе** описан спектрометр COMPASS, и его подсистемы.

COMPASS – эксперимент на вторичном пучке протонного суперсинхротрона в ЦЕРН. Целью эксперимента является изучение структуры адронов и адронная спектроскопия с использованием мюонных и адронных пучков высокой интенсивности [21; 22].

Установка COMPASS может быть условно поделена на три части вдоль оси пучка. Первая часть включает в себя детекторы, стоящие до мишени, которые измеряют параметры трека налетающей частицы. Вторая часть – спектрометр больших углов, который включает в себя спектрометрический магнит SM1, окружающие его трековые детекторы и детектор черенковских колец RICH. Последняя часть – спектрометр малых углов, состоит из системы трековых детекторов и магнита SM2.

С целью изучения спиновой структуры нуклонов в процессе Дрелла-Яна в 2015-ом и в 2018-ом году использовался отрицательно заряженный адронный пучок с импульсом 190 ГэВ/с, интенсивность которого достигала  $10^8$  адронов в

секунду. Адронный пучок главным образом состоял из  $\pi^-$ . Также присутствовали добавки от  $K^-$  и  $\bar{p}$ . Во время набора данных пучок поставлялся импульсами длительностью 5 секунд. Среднее значение импульса пучка составляло  $(190.9 \pm 3.2)$  ГэВ/с.

В этой конфигурации установки COMPASS использовалось три различных мишени: поляризованная мишень, состоящая из двух ячеек, заполненных аммиаком, алюминиевая мишень и вольфрамовый поглотитель. Поляризованная мишень состояла из двух цилиндрических поляризованных ячеек, длиной 55 см, диаметром 4 см и зазором 20 см между ячейками. Ячейки были заполнены поляризуемым аммиаком при низкой температуре и помещены в холодильную установку. Остальные мишени входили в состав адронного поглотителя. Его задачей являлась полная остановка вторичных пионов и каонов до их распада на мюоны. Адронный поглотитель, сделанный из оксида алюминия, находился внутри рамы из нержавеющей стали. Торцевая часть адронного поглотителя была изготовлена из алюминия и имела общую толщину 36 см. Алюминиевая мишень представляла собой цилиндрический блок длиной 7 см и диаметром 10 см, и использовалась в качестве промежуточной мишени для исследований ядерной зависимости. Вольфрамовая заглушка, расположенная позади алюминиевой мишени, состояла из трёх цилиндрических блоков длиной 80 см, 20 см, 20 см и диаметром 9.5 см, 9 см и 8.5 см соответственно. В анализе данных в качестве мишени обычно использовались только первые 10 см вольфрама из-за поглощения пучка и перерасеяния вторичных частиц.

Система триггеров установки COMPASS включала в себя несколько триггеров одиночных мюонов. Димюонные триггеры составлялись на основе триггеров одиночных мюонов.

В **третьей главе** исследуется чувствительность установки COMPASS к механизму внутреннего очарования пиона, и возможность эксперимента COMPASS разделять механизмы рождения пар с использованием распределения доли продольного импульса пары  $x_{|| 2J/\psi} = p_{L 2J/\psi}/p_{beam}$ .

Основные механизмы, дающие вклад в рождение пар  $J/\psi$  на энергиях эксперимента: одиночное и двойное партон-партонное рассеяние (SPS и DPS). Также пары  $J/\psi$  могут образовываться благодаря проявлению внутреннего очарования пиона (IC). Для каждого из механизмов рождения приведены оценки сечения рождения пар  $J/\psi$  в условиях эксперимента COMPASS, и распределения наблюдаемой  $x_{|| 2J/\psi}$ . Так, сечение рождения пар  $J/\psi$  через механизм SPS при энергии пионного пучка 190 ГэВ/с составляет 12-29 пб на нуклон [23], а соответствующее распределение доли продольного импульса пары  $J/\psi$  показано на рисунке 1. Вклад механизма двойного партон-партонного рассеяния ожидается малым, и составляет менее 1 пб/нуклон [23], что составляет порядка 10% от вклада одиночного рассеяния партонов [24]. В случае проявления внутреннего очарования пиона, пара  $J/\psi$  материализуется благодаря фоковской компоненте пиона  $|d\bar{u}c\bar{c}c\bar{c}\rangle$ . Вклад внутреннего очарования пиона в рождение пар  $J/\psi$  был

оценен из работы [14], и составляет 19.8-47.7 пб/нуклон. Большой диапазон сечения рождения пар  $J/\psi$  связан с неопределенностью значений вероятностей рождения фоковских состояний с внутренними  $c\bar{c}$  и  $c\bar{c}c\bar{c}$  кварками. Соответствующее распределение доли продольного импульса пары показано на рисунке 2.

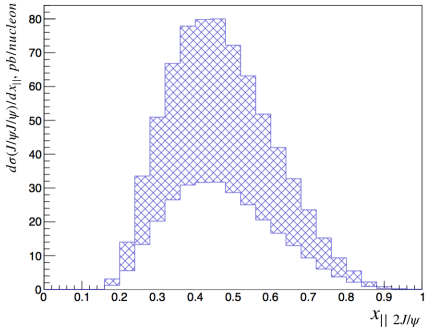


Рис. 1 — Предсказание распределения доли продольного импульса для SPS механизма рождения пар  $J/\psi$ . Заштрихованная область соответствует неопределенности оценки сечения  $\sigma_{2J/\psi}^{SPS} \approx (12-29)$  пб/нуклон.

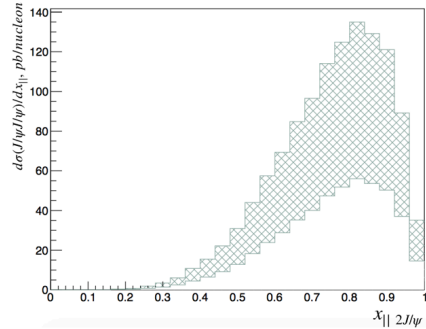


Рис. 2 — Предсказание распределения доли продольного импульса для IC механизма рождения пар  $J/\psi$ . Заштрихованная область соответствует неопределенности оценки сечения  $\sigma_{2J/\psi}^{IC} \approx (19.8-47.7)$  пб/нуклон.

Поскольку средние значения доли продольного импульса, уносимого парой  $J/\psi$ , существенно отличаются в случае рождения пары через SPS и IC становится возможным использовать наблюдаемую  $x_{|| 2J/\psi}$  для разделения вкладов этих механизмов. В данных эксперимента COMPASS ожидалось до 50 событий рождения пар  $J/\psi$ . Для оценки чувствительности эксперимента COMPASS к вкладу IC в рождение пар  $J/\psi$  использовалась Монте-Карло симуляция, в которой события генерировались для  $NH_3$  мишени согласно механизму SPS. Акцептанс установки в диапазоне  $0.4 < x_{|| 2J/\psi} < 1$  предполагался плоским. Для оценки разделительной способности использовался тест отношения правдоподобия. В случае статистики 50 событий, верхний предел на относительный вклад механизма IC в диапазоне  $x_{|| 2J/\psi} > 0.4$  может быть установлен на уровне 29% (CL=90%). Как пример, результат одного Монте-Карло моделирования показан на рисунке 3. Красная кривая на рисунке соответствует распределению SPS, синяя линия показывает вклад IC, соответствующий верхнему пределу. В случае, если все пары  $J/\psi$  действительно рождаются через механизм IC, эксперимент COMPASS определит этот вклад. Но вклад IC на уровне нескольких процентов заметен не будет, поскольку в этом случае он будет неотличим от вклада SPS.

Также обсуждается возможность одновременного рождения пары  $J/\psi$  через SPS и IC. В этом случае одна  $J/\psi$  рождается через IC, а другая через SPS.



Показано, что такой механизм рождения будет подавлен, и сечение рождения пар  $J/\psi$  будет мало по сравнению с сечением рождения пар  $J/\psi$  через механизм внутреннего очарования адронов.

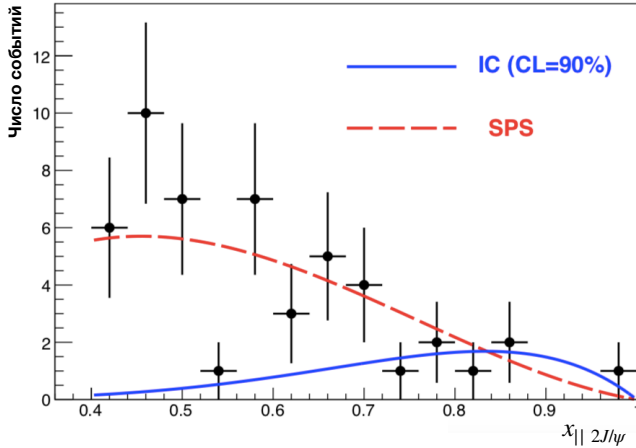


Рис. 3 — Распределение  $x_{||} 2J/\psi$ , сгенерированное методом Монте-Карло для статистики в 50 событий рождения пар  $J/\psi$ . Распределение SPS показано красной линией, верхний предел на вклад IC показан синим цветом.

**Четвертая глава** посвящена анализу экспериментальных данных.

Спектр инвариантных масс мюонных пар изучался с целью оценки положения и ширины пика одиночных  $J/\psi$ -мезонов. Параметры пика  $J/\psi$  использовались в дальнейшем при отборе событий рождения пар  $J/\psi$ , а число событий одиночного рождения  $J/\psi$  использовалось при оценке сечения рождения пар  $J/\psi$ . Распределение инвариантной массы отобранных димюонов в диапазоне от 2 до 8 ГэВ/ $c^2$  для  $\text{NH}_3$  мишени показано на рисунке 4. В спектре масс четко виден пик  $J/\psi$  и вклад  $\psi(2S)$ . Распределение комбинаторного фона падает с увеличением массы димюонов. Число отобранных инклюзивно одиночных  $J/\psi$  в каждой мишени оценивалось из аппроксимации инвариантной массы димюонов суммой двух распределений Гаусса, описывающих пики резонансов  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$ , и слагаемого  $c_1 e^{c_2 M_{\mu\mu}} + c_3 M_{\mu\mu}^{c_4}$ , описывающего фон, где  $c_i$  — свободные параметры. Полученные положения пиков  $M_{J/\psi}$  и гауссовы ширины пиков  $\Delta_{J/\psi}$  представлены в таблице 1 для каждой мишени.

Для отбора событий рождения пар  $J/\psi$  были использованы следующие критерии отбора. Минимум четыре трека в событии должны были пройти более 30 радиационных длин. Такие треки предполагались мюонными. В событии должен был сработать один из димюонных триггеров. Были отобраны первичные

Таблица 1 — Масса и гауссова ширина пика, а также число одиночных  $J/\psi$  в каждой мишени эксперимента COMPASS.

	NH <sub>3</sub>	Al	W
$M_{J/\psi}$ (ГэВ/ $c^2$ )	$3.141 \pm 0.09$	$3.138 \pm 0.010$	$3.078 \pm 0.09$
$\Delta_{J/\psi}$ (ГэВ/ $c^2$ )	$0.182 \pm 0.08$	$0.202 \pm 0.09$	$0.299 \pm 0.011$
$N_{J/\psi}/10^6$	6.23	0.46	2.51

вершины с четырьмя выходящими мюонными треками. В событиях, в которых была возможность выбрать более чем одну вершину, выбиралась вершина с наименьшим  $\chi^2/ndf$ . Применялось соответствующее требование на заряды мюонных треков: после распада пары  $J/\psi$  на мюоны ожидалось наличие двух положительно заряженных и двух отрицательно заряженных мюонов. Каждый трек-кандидат в мюоны должен был пройти через всю установку COMPASS. Мюонный трек должен был начинаться до магнита SM1 и заканчиваться после мюонного фильтра. Каждый мюонный трек должен был иметь  $\chi^2/ndf < 10$ . Это стандартный отбор на качество реконструкции трека, использующийся в эксперименте. Использовался отбор по импульсу отрицательно заряженного мюона  $p_{\mu^-} > 100$  ГэВ/ $c$  и по углу вылета  $\theta_{\mu^-} > 12$  мрад. Применение данного отбора к событиям с двумя мюонами в конечном состоянии исключает отрицательно заряженные мюоны из распада адронов пучка. Была проведена проверка попадания мюонных треков в геометрический аксептанс триггеров. Для событий с четырьмя мюонами в конечном состоянии проверялось, что минимум два мюонных трека любых зарядов пересекают активные области сработавших димюонных триггеров. Сумма импульсов мюонов должна была быть меньше 190 ГэВ/ $c$ . Этот отбор необходим для выполнения закона сохранения энергии, а также для исключения отрицательно заряженных мюонов с очень большим импульсом, родившихся в распаде пионного пучка. Чтобы убрать потенциальный комбинаторный фон и подозрительные, несовместимые по времени мюонные треки, был применен отбор на качество реконструкции времени треков  $\chi^2/ndf =$

$\frac{1}{4} \sum_{i=1}^{i=4} \frac{t_i^2}{\sigma_{t_i}^2} < 5$ , где  $t_i$  время мюонного трека, измеренное относительно времени триггера, и  $\sigma_{t_i}$  ошибка реконструкции времени трека. Для отбора событий с парами  $J/\psi$  в разных мишенях применялись отборы по  $Z$ -координате первичной вершины. Были использованы следующие диапазоны:  $-303 \text{ см} < Z_{NH_3} < -157 \text{ см}$ ,  $-33 \text{ см} < Z_W < -20 \text{ см}$ ,  $-66 \text{ см} < Z_{Al}^{2015} < -54 \text{ см}$ ,  $-76.5 \text{ см} < Z_{Al}^{2018} < -63.5 \text{ см}$ . Все диапазоны учитывают разрешение  $Z$ -координаты вершины, полученное из Монте-Карло моделирования рождения пар  $J/\psi$ . События с двумя  $J/\psi$  отбирались отбором по массам комбинаций димюонов. Из четырех мюонов в конечном состоянии  $(\mu_1^+ \mu_2^+ \mu_1^- \mu_2^-)$  составлялись комбинации димюонных пар, и считалась их инвариантная масса:  $m_1 = M_{\mu_1^+ \mu_1^-}$  и  $m_2 = M_{\mu_2^+ \mu_2^-}$  или  $m_1 = M_{\mu_1^+ \mu_2^-}$  и  $m_2 = M_{\mu_2^+ \mu_1^-}$ . Рисунок 5 иллюстрирует инвариантные массы пар димюонов

$m_1$  и  $m_2$  (две пары димюонов на событие) в  $\text{NH}_3$  мишени. Примененный отбор по массам показан красным кругом. Радиус круга на рисунке соответствует  $2\Delta_{J/\psi}$ , где  $\Delta_{J/\psi}$  – ожидаемая ширина пика  $J/\psi$  в мишени, а положение круга определяется массой  $M_{J/\psi}$ . Две комбинации пар  $J/\psi$  могут быть собраны из четырех мюонов. События, в которых обе комбинации пар  $J/\psi$  удовлетворяли всем критериям отбора, отбрасывались. На каждую отобранную  $J/\psi$  в паре ставился отбор  $x_F J/\psi = 2p_L^*/\sqrt{s} > 0$ , где продольный импульс  $p_L^*$  считался в системе центра масс. Число событий одиночного и парного рождения  $J/\psi$  оценивалось в одинаковой кинематической области.

В результате применения всех отборов осталось 43 события-кандидата с парами  $J/\psi$  в конечном состоянии: 28 событий в аммиачной мишени, 2 события в алюминиевой мишени, и 13 событий в первых 10 см вольфрама.

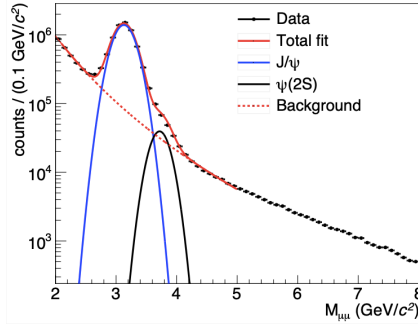


Рис. 4 — Распределение инвариантной массы димюонов для  $\text{NH}_3$  мишени.

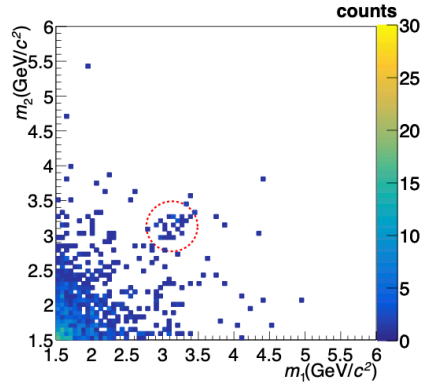


Рис. 5 — Распределение инвариантных масс димюонов в  $\text{NH}_3$  мишени. Красным кругом показан отбор по массам димюонных пар.

Для оценки числа событий комбинаторного фона для каждого события вычислялось значение  $R = \sqrt{(m_1 - M_{J/\psi})^2 + (m_2 - M_{J/\psi})^2}$ , где  $m_1$  и  $m_2$  – это инвариантные массы пар мюонов. Число  $R$  определяет линейное расстояние от точки  $(m_1, m_2)$  на массовой плоскости димюонов (рисунок 5) до ожидаемой массы  $J/\psi$ . Полученное распределение значений  $R$  для  $\text{NH}_3$  мишени показано на рисунке 6 черным цветом. Размер бина был специально выбран равным  $2\Delta_{J/\psi}$ , где  $\Delta_{J/\psi}$  – это гауссова ширина пика одиночных  $J/\psi$ . Таким образом, все выбранные кандидаты в пары  $J/\psi$  попадали в первый бин. Из Монте-Карло моделирования было найдено, что большая доля пар  $J/\psi$  попадает и во второй бин. Доля этих событий показана на рисунке 6 синим цветом. Число фоновых событий в первом бине оценивалось из аппроксимации распределения

экспоненциальной функцией  $f = c_1 e^{c_2 R}$ , где  $c_1$  и  $c_2$  свободные параметры. Аппроксимация показана на рисунке 6 красным цветом и выполнялась в диапазонах от  $4 \Delta_{J/\psi}$  до  $2 \text{ ГэВ}/c^2$ . Число фоновых событий оценивалось из экстраполяции экспоненциальной кривой в точку  $R = 0$ , и вычисления интеграла функции в первом бине. Полученные числа фоновых и сигнальных событий в каждой мишени показаны в таблице 2.

Вклады от других источников фона (фон от наложения взаимодействий и от распада пары  $B$ -мезонов) были оценены аналитически, и оказались пренебрежимо малыми.

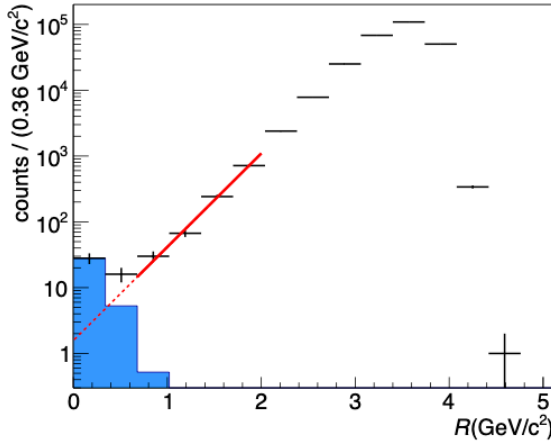


Рис. 6 — Распределение значений  $R$ , полученное для реальных данных в  $\text{NH}_3$  мишени (показано черным цветом) и Монте-Карло событий (показано синим цветом). Описание данных экспоненциальной функцией показано красной сплошной линией, пунктирной линией показана экстраполяция функции в область первого бина.

Для оценки отношения сечений рождения одиночных и парных  $J/\psi$  использовалось следующее выражение:

$$\frac{\sigma_{J/\psi J/\psi}}{\sigma_{J/\psi}} = \frac{1}{BR(J/\psi \rightarrow \mu\mu)} \cdot \frac{N_{J/\psi J/\psi}}{A_{J/\psi J/\psi}} \cdot \frac{A_{J/\psi}}{N_{J/\psi}}. \quad (2)$$

В этой формуле используются средние значения акцептансов для одиночных и парных  $J/\psi$  ( $A_{J/\psi}$  и  $A_{J/\psi J/\psi}$  соответственно). Средние акцептансы были посчитаны в кинематической области  $x_F J/\psi = 2p_L^* J/\psi / \sqrt{s} > 0$ , с учетом числа одиночных  $J/\psi$  в данных 2015 и 2018 годов. В таблице 2 представлены средние акцептансы установки для одиночных и парных  $J/\psi$ , используемые для оценки сечения. Поскольку акцептансы вычисляются с использованием Монте-Карло

Таблица 2 — Число событий одиночного и парного рождения  $J/\psi$  (отобранные, фоновые и сигнальные события), значения акцептанса одиночных и парных  $J/\psi$  и сечение рождения пар  $J/\psi$  на мишенях эксперимента COMPASS (первое число - центральное значение, второе и третье – статистическая и систематическая ошибка).

	NH <sub>3</sub>	Al	W
$N_{J/\psi}/10^6$	6.23	0.46	2.51
$N_{2J/\psi}$ (отобрано)	28	2	13
$N_{2J/\psi}$ (фон)	$2.9 \pm 0.5$	$1.4 \pm 0.4$	$8.2 \pm 2.0$
$N_{2J/\psi}$ (сигнальные)	$25.1 \pm 0.5$	$0.6 \pm 0.4$	$4.5 \pm 2.0$
$A_{2J/\psi}$	0.129	0.051	0.050
$A_{J/\psi}$	0.194	0.074	0.066
$\sigma_{2J/\psi}$	$10.7 \pm 2.3 \pm 3.2$	$3.6 \pm 8.2 \pm 1.4$	$3.3 \pm 3.0 \pm 1.8$

данных, то эти величины учитывают эффективности детекторов и эффективности триггеров экспериментальной установки. Для оценки абсолютных значений сечений рождения пар  $J/\psi$  было использовано сечение рождения одиночных  $J/\psi$ , измеренное в эксперименте NA3 с использованием пучка  $\pi^-$  200 ГэВ/с на протонной мишени ( $\sigma_{J/\psi}^p \times BR(J/\psi \rightarrow \mu\mu) = 6.3 \pm 0.8$  нб) и на платиновой мишени ( $\sigma_{J/\psi}^{Pt} \times BR(J/\psi \rightarrow \mu\mu) = 960 \pm 150$  нб) [25]. Первое значение было использовано для оценки сечения рождения пары  $J/\psi$  на NH<sub>3</sub> и Al мишенях, и второе значение использовалось для оценки сечения на вольфрамовой мишени. С использованием значения  $BR(J/\psi \rightarrow \mu\mu) = 0.05961 \pm 0,00033$  [26] для событий в NH<sub>3</sub> мишени было оценено:

$$\sigma_{J/\psi J/\psi} / \sigma_{J/\psi} = (1.02 \pm 0.22_{stat} \pm 0.27_{syst}) \cdot 10^{-4}. \quad (3)$$

Результаты оценки сечения рождения пар  $J/\psi$  на мишенях эксперимента COMPASS представлены в таблице 2, и показаны красным цветом на рисунке 7. Для сравнения синим цветом показаны результаты оценки сечения на платиновой мишени, опубликованные коллаборацией NA3 [9]. Был сделан вывод о том, что с учетом статистических и систематических ошибок ядерных эффектов в рождении пар  $J/\psi$  на рисунке 7 не наблюдается.

Основной вклад в систематическую погрешность вносят нижеследующие источники.

- Неопределенность  $\sigma_{J/\psi}$ : была взята из измерения  $\sigma_{J/\psi}$  в эксперименте NA3 [25].
- Ошибки, связанные с откликом детектора на события одиночного и парного рождения  $J/\psi$ . Они учитывают неопределенность эффективностей

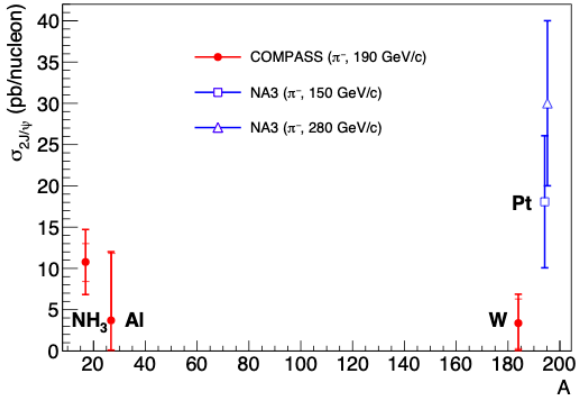


Рис. 7 — Сечение рождения пар  $J/\psi$ , измеренное на мишенях экспериментов COMPASS (показано красным цветом) и NA3 (показано синим цветом).

триггерных годоскопов и двумерных эффективностей детекторов. Дополнительно, ошибка акцептанса одиночных  $J/\psi$  включает неопределенность выбора PDF. Неопределенность акцептанса парного рождения  $J/\psi$  также учитывает неопределенность отношения  $\frac{q\bar{q} \rightarrow 2J/\psi}{g\bar{g} \rightarrow 2J/\psi}$ .

- Погрешность метода оценки комбинаторного фона: оценена с помощью численного Монте-Карло генератора, строившего двумерные распределения масс димюнных пар.
- Неопределенность числа  $J/\psi$ : одномерное распределение инвариантных масс пар мюонов (рис. 4) описывалось разными аналитическими функциями (модифицированная функция Гаусса, асимметричная функция Crystall Ball и функция Цаллиса). Из аппроксимации данных этими функциями были получены одинаковые значения  $M_{J/\psi}$  и  $\Delta_{J/\psi}$ , но число событий одиночных  $J/\psi$  в данных эксперимента COMPASS немного отличалось.

Из-за большого числа фоновых событий в алюминиевой и вольфрамовой мишенях дальнейшая работа проводилась с событиями, отобранными в мишени из аммиака.

На рисунке 8 (а) показано дифференциальное сечение рождения пар  $J/\psi$  как функции  $M_{2J/\psi}$  для NH<sub>3</sub> мишени. В распределении инвариантной массы пар  $J/\psi$  нет четко видимого статистически значимого сигнала от возможных экзотических состояний  $|c\bar{c}c\bar{c}\rangle$ , открытых в LHCb [6]. Отобранные события не попадают в область масс, в которой ожидаются  $\eta_b$  и  $\chi_{b0,1,2}$  ( $M_{\eta_b}, M_{\chi_{b0,1,2}} > 9 \text{ ГэВ}/c^2$ ).

Рисунок 8 (б) иллюстрирует дифференциальное сечение по поперечному импульсу. Отобранные события достигают значений  $p_{T\ 2J/\psi} = 3.5 \text{ ГэВ}/c$  и среднее значение составляет  $p_{T\ 2J/\psi} = 1.3 \text{ ГэВ}/c$ .

На рисунке 8 (в) показано дифференциальное сечение в зависимости от переменной  $|\Delta x_{||}| = |x_{|| J/\psi_1} - x_{|| J/\psi_2}|$ , где доля продольного импульса  $x_{|| J/\psi}$  считалась для каждой  $J/\psi$  в выбранной паре. Полученное распределение хорошо согласуется с выводами о малом вкладе рождения пар  $J/\psi$  одновременно через механизмы SPS и IC. В этом случае наблюдалась бы существенная разница в долях продольного импульса, уносимыми одиночными  $J/\psi$  из пары.

Все распределения на рисунке 8 показаны без вычета фоновых событий. Распределения, соответствующие комбинаторному фону, показаны черными пунктирными кривыми. Разница между экспериментальными данными и кривой фона соответствует оцененному сечению рождения пар  $J/\psi$ . Красными пунктирными линиями показаны предсказания модели одиночного партон-партонного рассеяния, а красной сплошной линией показан результат аппроксимации данных, которая проводилась методом максимального правдоподобия. Пустые бины показаны серым цветом, и учитывались в аппроксимации.

Дифференциальное сечение рождения пар  $J/\psi$  в зависимости от  $x_{|| 2J/\psi}$  (рис. 8 (г)) было аппроксимировано суммой кривых, описывающих распределения  $x_{|| 2J/\psi}$  для механизмов SPS и IC. Аппроксимирующая функция, показанная на рисунке 8 (г) красной сплошной линией, имела два свободных параметра, соответствующих амплитудам вкладов SPS и IC, и учитывала вклад фоновых событий. Неопределенность вклада внутреннего очарования пиона шириной  $1\sigma$  показана синим цветом. Из рисунка 8 (г) видно, что данные эксперимента COMPASS лучше согласуются с механизмом SPS, чем с IC. Данные эксперимента позволяют установить верхний предел на сечение рождения пары  $J/\psi$  через механизм IC. Для установки верхнего предела был использован алгоритм, описанный в работах [27; 28]. Верхний предел на относительный вклад механизма внутреннего очарования пиона к интегральному сечению рождения пар  $J/\psi$  составил 0.24 (CL=90%). Было также проверено, что в случае рождения резонанса  $X(6900)$  в эксперименте COMPASS отношение между вкладами от SPS и IC механизмов качественно не меняется.

Полученный результат можно сравнить с предположением, что все события парного рождения  $J/\psi$  в эксперименте NA3 [9] должны появляться только благодаря механизму внутреннего очарования пиона [14]. Поскольку экспериментальные установки NA3 и COMPASS представляли собой типичные эксперименты на неподвижной мишени с полным поглощением пучка, и использовали пионные пучки близких энергий, это предположение можно применить и к рождению пар  $J/\psi$  в эксперименте COMPASS. Из данных эксперимента COMPASS видно, что если механизм внутреннего очарования пиона существует, то его вклад описывает только небольшую часть экспериментальных данных. Основной вклад в сечение рождения пар  $J/\psi$  вносит механизм SPS. При этом, при интерпретации экспериментальных данных необходимо учитывать акцептанс установки, который имеет схожую форму для COMPASS и NA3. Интерпретация данных NA3 моделью внутреннего очарования пиона [14] была сделана без учета этой поправки.

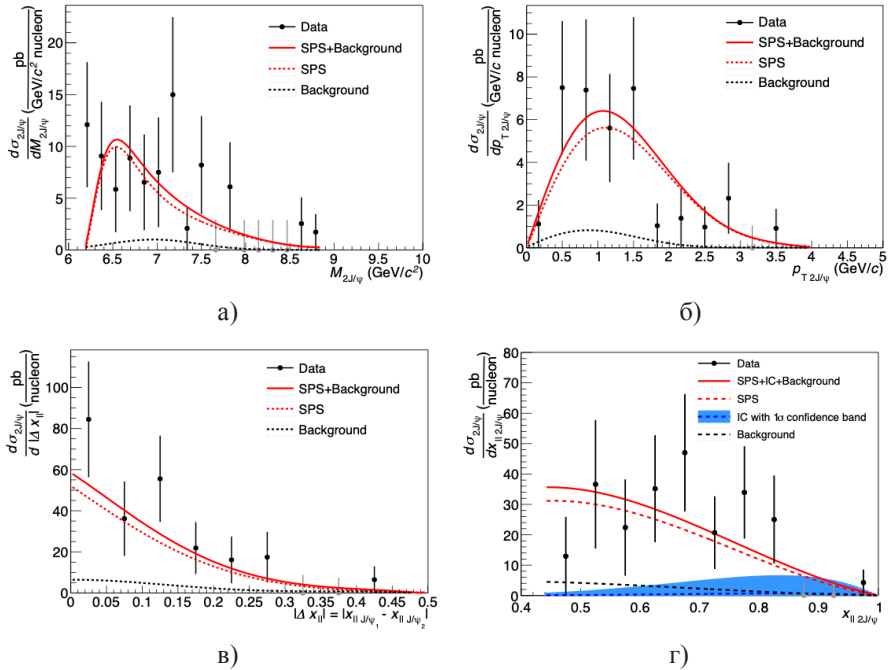


Рис. 8 — Дифференциальные сечения рождения пар  $J/\psi$  в  $\text{NH}_3$  мишени как функции  $M_{J/\psi}$  (а),  $p_{T 2J/\psi}$  (б),  $|\Delta x_{||}|$  (в) и  $x_{|| 2J/\psi}$  (г).

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем.

1. Измерены полные сечения рождения пар  $J/\psi$  в пион-нуклонных взаимодействиях на различных ядерных мишенях ( $\text{NH}_3$ , Al, W) эксперимента COMPASS. Получены дифференциальные сечения рождения пар в зависимости от кинематических переменных:  $x_{|| 2J/\psi}$ ,  $\Delta x_{|| 2J/\psi}$ ,  $p_{T 2J/\psi}$ .
2. Дифференциальное сечение рождения пар  $J/\psi$  в зависимости от  $x_{|| 2J/\psi}$  было использовано для оценки вкладов различных механизмов рождения. Показано, что экспериментальные данные не противоречат тому, что все события появились в результате одиночного рассеяния партонов. В работе сделан вывод о том, что использование только модели внутреннего очарования адронов для описания экспериментальных данных NA3 неоправдано, и механизм одиночного партонного рассеяния может давать существенный вклад в экспериментальные данные.
3. Был установлен верхний предел на сечение рождения пар  $J/\psi$  через механизм внутреннего очарования пиона по отношению к интегральному сечению рождения пар в области  $x_{|| 2J/\psi} > 0.4$ :  $\sigma_{2J/\psi}^{IC} / \sigma_{2J/\psi} < 0.24$  (CL=90%).



4. Получено распределение дифференциального сечения рождения пар  $J/\psi$  как функции инвариантной массы пары  $J/\psi$ . Полученное распределение не содержит явных сигналов экзотических резонансов, открытых в LHCb.
5. Получены исходные данные для изучения ядерных эффектов и  $A$ -зависимости процессов, в которых рождается состояние с тяжелой массой. Свидетельств наличия ядерных эффектов в рождении пар  $J/\psi$  не было обнаружено.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Phenomenological study for the search of evidence for intrinsic charm at the COMPASS experiment / A. Gridin [и др.] // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2020. — Т. 17, № 6. — С. 826—833. — arXiv: [1901.01712](https://arxiv.org/abs/1901.01712) [hep-ph].
2. *Andrei, G.* Study of double  $J/\psi$  production mechanisms at COMPASS / G. Andrei // Int. J. Mod. Phys. A. — 2022. — Т. 37, № 33. — С. 2240002.
3. Double  $J/\psi$  production in pion-nucleon scattering at COMPASS / G. D. Alexeev [и др.] // Phys. Lett. B. — 2023. — Т. 838. — С. 137702. — arXiv: [2204.01817](https://arxiv.org/abs/2204.01817) [hep-ex].

## Список литературы

1. The Intrinsic Charm of the Proton / S. Brodsky [и др.] // Phys. Lett. B. — 1980. — Т. 93. — С. 451—455.
2. Evidence for intrinsic charm quarks in the proton / R. D. Ball [и др.] // Nature. — 2022. — Т. 608, № 7923. — С. 483—487. — arXiv: [2208.08372](https://arxiv.org/abs/2208.08372) [hep-ph].
3. *Iwasaki, Y.* A Possible Model for New Resonances-Exotics and Hidden Charm / Y. Iwasaki // Prog. Theor. Phys. — 1975. — Т. 54. — С. 492.
4. *Iwasaki, Y.* Is a State  $c$  anti- $c$   $c$  anti- $c$  Found at 6.0-GeV? / Y. Iwasaki // Phys. Rev. Lett. — 1976. — Т. 36. — С. 1266.
5. *Iwasaki, Y.* How to Find  $\eta(c)$  and a Possible State Charm anti-Charm Charm anti-Charm / Y. Iwasaki // Phys. Rev. D. — 1977. — Т. 16. — С. 220.
6. Observation of structure in the  $J/\psi$ -pair mass spectrum / R. Aaij [и др.] // Sci. Bull. — 2020. — Т. 65, № 23. — С. 1983—1993. — arXiv: [2006.16957](https://arxiv.org/abs/2006.16957) [hep-ex].
7. *Zhang, J.* Recent CMS results on exotic resonances / J. Zhang, K. Yi // PoS. — 2022. — Ноябрь. — Т. ICHEP2022. — С. 775. — arXiv: [2212.00504](https://arxiv.org/abs/2212.00504) [hep-ex].
8. *Xu, Y.* ATLAS Results on Exotic Hadronic Resonances / Y. Xu // Acta Phys. Polon. Supp. — 2023. — Т. 16, № 3. — С. 21. — arXiv: [2209.12173](https://arxiv.org/abs/2209.12173) [hep-ex].

9. Evidence for  $\psi\psi$  Production in  $\pi^-$  Interactions at 150 GeV/c and 280 GeV/c / J. Badier [и др.] // Phys. Lett. B. — 1982. — Т. 114. — С. 457—460.
10.  $\psi\psi$  Production and Limits on Beauty Meson Production From 400 GeV/c Protons / J. Badier [и др.] // Phys. Lett. B / под ред. J. Tran Thanh Van. — 1985. — Т. 158. — С. 401—408.
11. Ecclestone, R. E. Production of  $\psi\psi$  in Pion - Nucleon Interactions by Quark - Anti-quark Annihilation / R. E. Ecclestone, D. M. Scott // Phys. Lett. B. — 1983. — Т. 120. — С. 237—239.
12. Humpert, B.  $\psi\psi$  production at collider energies / B. Humpert, P. Mery // Z. Phys. C. — 1983. — Т. 20. — С. 83.
13. Halzen, F. Evidence for Multiple Parton Interactions From the Observation of Multi - Muon Events in Drell-Yan Experiments / F. Halzen, P. Hoyer, W. Stirling // Phys. Lett. B. — 1987. — Т. 188. — С. 375—378.
14. Vogt, R. Intrinsic charm contribution to double quarkonium hadroproduction / R. Vogt, S. Brodsky // Phys. Lett. B. — 1995. — Т. 349. — С. 569—575.
15. Li, B.-A.  $J/\psi$  Pair Production in Hadronic Collisions / B.-A. Li, K.-F. Liu // Phys. Rev. D. — 1984. — Т. 29. — С. 426.
16. Measurement of the prompt  $J/\psi$  pair production cross-section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector / M. Aaboud [и др.] // Eur. Phys. J. C. — 2017. — Т. 77, № 2. — С. 76.
17. Observation of  $J/\psi$  pair production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV / R. Aaij [и др.] // Phys. Lett. B. — 2012. — Т. 707. — С. 52—59.
18. Measurement of the  $J/\psi$  pair production cross-section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV / R. Aaij [и др.] // JHEP. — 2017. — Т. 06. — С. 047. — arXiv: [1612.07451](https://arxiv.org/abs/1612.07451) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)]. — [Erratum: JHEP 10, 068 (2017)].
19. Measurement of Prompt  $J/\psi$  Pair Production in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV / V. Khachatryan [и др.] // JHEP. — 2014. — Т. 09. — С. 094.
20. Observation and Studies of Double  $J/\psi$  Production at the Tevatron / V. M. Abazov [и др.] // Phys. Rev. D. — 2014. — Т. 90, № 11. — С. 111101.
21. COMPASS: A Proposal for a Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy / G. Vaum [и др.]. — 1996. — Март.
22. Гуськов, А. В. Изучение структуры и свойств мезонов через их взаимодействие с виртуальными фотонами в эксперименте COMPASS : дис. ... д-ра / Гуськов Алексей Вячеславович. — Дубна, 2018.
23. Koshkarev, S. Phenomenological analysis of the possible impact of Double Parton Scattering in double  $J/\psi$  production at the COMPASS detector using the CERN  $\pi^-$  beam at 190 GeV/c / S. Koshkarev // 18th Workshop on High Energy Spin Physics. — 09.2019. — arXiv: [1909.06195](https://arxiv.org/abs/1909.06195) [[hep-ph](https://arxiv.org/archive/hep)].

24. *Lansberg, J.-P.* Double-quarkonium production at a fixed-target experiment at the LHC (AFTER@LHC) / J.-P. Lansberg, H.-S. Shao // Nucl. Phys. B. — 2015. — T. 900. — C. 273–294.
25. Experimental  $J/\psi$  Hadronic Production from 150 GeV/c to 280 GeV/c / J. Badier [и др.] // Z. Phys. C. — 1983. — T. 20. — C. 101.
26. Review of Particle Physics / P. A. Zyla [и др.] // PTEP. — 2020. — T. 2020, № 8. — C. 083C01.
27. Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics / G. Cowan [и др.] // Eur. Phys. J. C. — 2011. — T. 71. — C. 1554. — arXiv: [1007.1727](https://arxiv.org/abs/1007.1727) [[physics.data-an](https://arxiv.org/abs/1007.1727)]. — [Erratum: Eur.Phys.J.C 73, 2501 (2013)].
28. *Feldman, G. J.* A Unified approach to the classical statistical analysis of small signals / G. J. Feldman, R. D. Cousins // Phys. Rev. D. — 1998. — T. 57. — C. 3873–3889. — arXiv: [physics/9711021](https://arxiv.org/abs/physics/9711021).

*Гридин Андрей Олегович*

Изучение рождения пар  $J/\psi$  в эксперименте COMPASS

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_