

На правах рукописи



Гуськов Алексей Вячеславович

**ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ  
МЕЗОНОВ ЧЕРЕЗ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
С ВИРТУАЛЬНЫМИ ФОТОНАМИ В  
ЭКСПЕРИМЕНТЕ COMPASS**

Специальность 01.04.16 —  
«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Дубна — 2019

Работа выполнена в Объединённом институте ядерных исследований

Официальные оппоненты: **Шварц Борис Альбертович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО  
РАН, главный научный сотрудник.

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

**Мочалов Василий Вадимович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Институт физики высоких энергий имени А. А.  
Логанова Национального исследовательского цен-  
тра "Курчатовский институт", ведущий научный  
сотрудник.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной фи-  
зики имени Д. В. Скобельцина Московского госу-  
дарственного университета имени М. В. Ломоно-  
сова.

Защита состоится «        » \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_ часов на заседании дис-  
сертационного совета Д720.001.03 на базе Лаборатории ядерных проблем им.  
В.П. Джеллепова Объединённого института ядерных исследований по адресу:  
Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в библиотеке Объединен-  
ного института ядерных исследований и на сайте [http://wwinfo.jinr.ru/  
announce\\_disser.htm](http://wwinfo.jinr.ru/announce_disser.htm).

Автореферат разослан «        » \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д720.001.03, д-р физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_ Карамышева

Галина Анатольевна

## Общая характеристика работы

Актуальность темы. По астрофизическим и космологическим данным на долю видимой барионной материи, свойства которой определяются сильным и электромагнитным взаимодействиями, приходится около 5% массы Вселенной. На фоне двух других компонент, тёмной материи и тёмной энергии, барионная материя кажется хорошо изученным объектом. На самом же деле, несмотря на значительные успехи квантовой хромодинамики в описании взаимодействия кварков и глюонов в рамках пертурбативного подхода, вопрос о том, почему адроны и ядра именно такие, какими мы их видим, остаётся открытым. Описание на основе базовых принципов КХД фундаментальных свойств адронов, таких как их массы, спины, партонные распределения, формфакторы, поляризуемости, и т. д. является одной из главных нерешённых проблем квантовой хромодинамики. Конфайнмент кварков и глюонов в адронах, а также рост бегущей константы сильного взаимодействия  $\alpha_s$  с уменьшением характерного масштаба энергии взаимодействия не позволяют непосредственно использовать для этого пертурбативный подход, хорошо себя зарекомендовавший при высоких энергиях. В настоящее время для количественного описания спектра адронов, их статических свойств и их взаимодействий при малых энергиях используются различного рода феноменологические модели. Примером одной из наиболее успешных таких моделей может служить киральная теория возмущений, в которой ключевое место занимают пионы и каоны, играя роль голдстоуновских бозонов. Определённые успехи достигнуты в вычислениях на решётках. Сравнение предсказаний моделей и теоретических вычислений для наблюдаемых величин с результатами измерений является важным тестом состоятельности и границ применимости используемых подходов. При этом, конечной целью исследований в данном направлении, как теоретических, так и экспериментальных, является получение описания спектров, структуры и свойств адронов из первых принципов КХД.

Электрическая и магнитная поляризуемости являются фундаментальными характеристиками адронов как сложных КХД систем и, наряду с электрическим и магнитным формфакторами, определяют проявление их внутренней структуры в электромагнитных взаимодействиях. Поляризуемости пионов и каонов как легчайших КХД-систем играют особо важную роль во

всех теоретических моделях. Имевшиеся до недавнего времени экспериментальные данные по поляризуемостям заряженного пиона, полученные различными методами, значимо отличались между собой. Кроме того, имелось существенное расхождение основных экспериментальных результатов с точными предсказаниями киральной теории возмущений, что вызывало вопросы как к методикам измерения, так и к самой киральной теории.

В представленной работе изложены результаты нового прецизионного измерения поляризуемостей заряженного пиона в реакции радиационного рассеяния пиона в кулоновском поле ядерной мишени, ставящего точку в данном вопросе. Обоснована также возможность использования того же метода для первого в мире измерения поляризуемостей заряженного каона.

КХД не налагает прямого запрета на существование связанных сильным взаимодействием состояний, отличных от образованных тремя кварками или парой кварк-антикварк. Однако, до недавнего времени не существовало убедительных и бесспорных экспериментальных свидетельств в пользу мультикварковых состояний. Ситуация изменилась лишь в последние пятнадцать лет в связи с открытием "экзотических" адронов, содержащих тяжёлые кварки, таких как  $X(3872)$ ,  $Z_c^+(3900)$ ,  $P_c^+(4380)$  и  $P_c^+(4450)$ , чьи свойства и структуру затруднительно интерпретировать в рамках классической кварковой модели адронов. Несмотря на то, что на протяжении последних лет такие чармониеподобные состояния являются предметом пристального внимания экспериментаторов и теоретиков, их природа и свойства до конца не ясны. В настоящее время известно всего несколько эксклюзивных механизмов рождения экзотических чармониев, при этом большая часть открытых чармониеподобных состояний наблюдалась лишь в одном из них. Поэтому уже сам факт наблюдения этих экзотических состояний в новом канале рождения крайне важен для понимания их природы и механизма образования.

В данной работе представлены первые результаты поиска экзотических чармониев в реакциях эксклюзивного лепто(фото)рождения на ядерных мишенях, что является новым инструментом для изучения экзотических чармониев. Фоторождение может быть использовано, например, для непосредственного определения интенсивности взаимодействия экзотических чармониев с фотоном. Кроме того, фоторождение на ядерных мишенях несёт

уникальную информацию о взаимодействии родившегося объекта с ядерной материей, которое зависит от природы природы этого объекта.

Работы по измерению поляризуемостей заряженного пиона и поиску лепто(фото)рождения экзотических чармониев, описываемые в диссертации, выполнены автором в рамках эксперимента COMPASS. COMPASS – современный эксперимент с неподвижной мишенью на вторичном пучке протонного суперсинхротрона в ЦЕРН, в задачи которого входит изучение структуры адронов и адронная спектроскопия с использованием мюонных и адронных пучков высокой интенсивности. Широкий охват физической программы и уникальные возможности экспериментальной установки делают COMPASS универсальным инструментом для изучения и критической проверки основ КХД в широком диапазоне энергий.

**Целью** данной работы является получение новых экспериментальных данных по взаимодействию фотонов с мезонами для проверки и развития феноменологических моделей в низкоэнергетической области КХД, описывающих структуру и свойства мезонов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**

1. Усовершенствовать методику измерений поляризуемостей заряженных пиона и каона и выдать на её основе рекомендации по настройке экспериментальной установки для проведения таких измерений в эксперименте COMPASS.
2. Осуществить измерение поляризуемостей заряженного пиона в реакции радиационного рассеяния пиона на ядерной мишени в условиях установки COMPASS с точностью лучшей, чем это было сделано в предыдущих экспериментах.
3. Разработать и применить на практике новый метод поиска лепто(фото)рождения экзотических чармониеподобных состояний в эксклюзивных реакциях нейтрального и заряженного обмена, используя имеющиеся данные по глубоконеупругому рассеянию мюонов на поляризованных ядерных мишенях, набранные на установке COMPASS в период с 2002 по 2013 гг.

#### **Методология и методы исследования.**

1. Общенаучные методы.

2. Экспериментальные методы физики частиц. Анализ сырых данных. Калибровка. Оптимизация работы детекторов.
3. Математические и статистические методы. Анализ физических данных. Получение наилучших оценок, доверительных интервалов, разделение сигнала и фона, оценка систематических ошибок.
4. Численные методы. Компьютерная обработка больших объёмов данных, численное моделирование методом Монте Карло.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Выполнена оптимизация конфигурации экспериментальной установки COMPASS. Усовершенствована методика измерения поляризуемостей заряженного пиона в реакции радиационного рассеяния пиона на ядерной мишени.
2. На основе усовершенствованной методики получен самый точный на сегодняшний день экспериментальный результат для поляризуемостей заряженного пиона в реакции радиационного рассеяния отрицательного пиона с импульсом 190 ГэВ/с на никелевой мишени года в эксперименте COMPASS.
3. Обоснована возможность измерения поляризуемости заряженных каонов в следующей фазе эксперимента на установке COMPASS.
4. Впервые осуществлён поиск лепторождения экзотических чармониев  $Z_c^\pm(3900)$  и  $Z_c^\pm(4200)$  в эксклюзивной реакции  $\mu^+ N \rightarrow \mu^+ Z_c^\pm N'$  на установке COMPASS с использованием данных по полуинклюзивному глубоконеупругому рассеянию мюонов с импульсом 160 ГэВ/с и 200 ГэВ/с на  ${}^6\text{LiD}$  и  $\text{NH}_3$ . Установлены верхние пределы для сечения фоторождения этих состояний, умноженного на относительную вероятность их распада в  $J/\psi\pi^\pm$ . Представлена модельно-зависимая интерпретация полученных результатов.
5. Впервые осуществлён поиск лепторождения экзотического чармония  $X(3872)$  в эксклюзивной реакции  $\mu^+ N \rightarrow \mu^+(J/\psi\pi^+\pi^-)N'$  на установке COMPASS с использованием данных по полуинклюзивному глубоконеупругому рассеянию мюонов с импульсом 160 ГэВ/с и 200 ГэВ/с на  ${}^6\text{LiD}$  и  $\text{NH}_3$ . Установлен верхний предел для сечения фоторождения этого состояния, умноженного на относительную вероятность его распада в  $J/\psi\pi^+\pi^-$ .

6. Впервые осуществлён поиск лепторождения экзотического чармония  $X(3872)$  в эксклюзивной реакции  $\mu^+ N \rightarrow \mu^+ X(3872)\pi^\pm N$  с использованием данных по полуинклюзивному глубоконеупругому рассеянию мюонов с импульсом 160 ГэВ/с и 200 ГэВ/с на  ${}^6\text{LiD}$  и  $\text{NH}_3$  на установке COMPASS. Впервые наблюдался со статистической значимостью  $4.1\sigma$  сигнал нового чармониеподобного состояния  $\tilde{X}(3872)$ , квантовые числа которого не соответствуют таковым ( $1^{++}$ ) для  $X(3872)$ . Выполнена оценка сечения фоторождения обнаруженного состояния  $\tilde{X}(3872)$ .

### **Научная новизна:**

В результате проделанной автором работы были выданы рекомендации по адаптации универсальной установки COMPASS для прецизионного измерения поляризуемостей заряженного пиона. Методика измерения поляризуемостей пиона, опробованная впервые на установке СИГМА (Серпухов), была адаптирована к условиям установки COMPASS и усовершенствована с целью уменьшения систематической ошибки измерения. Было выполнено прецизионное измерение поляризуемостей заряженного пиона в предположении  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$ , причём полученный результат на сегодняшний день является самым точным измерением этой величины в отдельном эксперименте. Сделаны предложения по измерению поляризованностей заряженного каона, не известных на сегодняшний день.

Впервые в мире был осуществлён экспериментальный поиск лепто(фото)рождения экзотических чармониев  $Z_c^\pm(3900)$ ,  $Z_c^\pm(4200)$  и  $X(3872)$ , а также произведена оценка верхнего предела для сечения фоторождения этих состояний. Впервые был обнаружен сигнал нового состояния  $\tilde{X}(3872)$  и определено сечение фоторождения этого состояния. Сделаны выводы о возможности наблюдения чармониеподобного состояния  $\tilde{X}(3872)$  в будущих экспериментах.

### **Практическая значимость**

Полученные прецизионные результаты для поляризуемости заряженного пиона являются принципиально важными для проверки и дальнейшего развития теоретических моделей в низкоэнергетической области КХД. Согласие полученных результатов с предсказаниями киральной теории возмущений в пределах экспериментальных ошибок снимает многолетний вопрос о

существенном расхождении имеющихся экспериментальных данных с предсказаниям этой модели. Полученный научно-методический задел лёг в основу предложения по измерению поляризуемостей заряженного каона с использованием каонного пучка в следующей фазе эксперимента COMPASS.

Инициированные автором диссертации работы по поиску лепто(фото)рождения экзотических состояний на установке COMPASS заложила основы нового научно-экспериментального подхода к изучению природы и свойств экзотических чармониев. Полученное указание на существование нового чармониеподобного состояния  $\tilde{X}(3872)$ , а также оценки сечения фоторождения состояний  $Z_c^\pm(3900)$ ,  $Z_c^\pm(4200)$  и  $X(3872)$  являются важными и принципиально новыми "входными" данными для различных теоретических моделей, нацеленных на установление природы экзотических чармониев. Дальнейшее развитие заложенного подхода может быть связано с экспериментами по ультрапериферическим столкновениям адронов на действующем Большом адронном коллайдере и с экспериментами по электрон-нуклонному рассеянию на планируемом к постройке электрон-ионном коллайдере EIC.

Полученные автором результаты измерения поляризуемостей пиона и поиска фоторождения  $Z_c^\pm(3900)$  с 2016 года входят в ежегодно обновляемый обзор современного состояния физики частиц от Particle Data Group [A1].

### Достоверность

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается использованием в работе общепринятых современных методов получения экспериментальных данных, их обработки и последующего анализа. Работа также опирается на современные теоретические знания и подходы.

### Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались автором на следующих международных конференциях:

1. Symmetries and Spin (SPIN-PRAHA-2005), Прага (Чехия), 2005;
2. XXXIII International Conference on High Energy Physics (ICHEP'06), Москва (Россия), 2006;
3. European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2007), Манчестер (Великобритания), 2007;
4. International Conference on Hadron Structure (HS 07), Модра-Гармония (Словакия), 2007;



5. International Conference on Hadron Structure (HS 09), Татранска Штрба (Словакия), 2009;
6. Symmetries and Spin (SPIN-PRAHA-2010), Прага (Чехия), 2010;
7. European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2011), Гренобль (Франция), 2011;
8. International Workshop on Hadron Structure and Spectroscopy (IWHSS 2013), Эрланген (Германия), 2013;
9. European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2015), Вена (Австрия), 2015;
10. 11th International Workshop on Heavy Quarkonium (QWG 16), Ричланд (США), 2016;
11. International Workshop on Hadron Structure and Spectroscopy (IWHSS 2016), Клостер Зеон (Германия), 2016;
12. International Conference on the Structure and the Interactions of the Photon (PHOTON 2017), Женева (Швейцария), 2017;
13. XVII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (HADRON 2017), Саламанка (Испания), 2017;
14. XII Latin-American Symposium on Nuclear Physics and Applications (LASNPA 2017), Гавана (Куба), 2017;
15. XIII International Conference on Beauty, Charm and Hyperon Hadrons (BEACH 2018), Пенише (Португалия), 2018;

а также на ряде открытых семинаров в Объединённом институте ядерных исследований (Дубна), Туринском университете (Турин), Институте физики высоких энергий (Пекин) и Мюнхенском техническом университете (Мюнхен).

**Личный вклад.** Данная диссертация основана на работах, выполненных автором в составе международной коллаборации COMPASS в 2004–2018 гг. На защиту вынесены положения, отражающие персональный вклад автора в опубликованные работы. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены лишь те, основные результаты которых были получены либо автором лично, либо при его значительном или определяющем участии.

Автор диссертации принимал активное участие в подготовке и проведении предварительного сеанса 2004 года, целью которого была проверка возможности измерения поляризуемости заряженного пиона. Он внёс опре-

деляющий вклад в адаптацию существующего метода измерений к особенностям установки COMPASS и выработку рекомендаций по оптимизации установки для основного измерения. Автор принял активное участие в проведении сеанса 2009 года, где отвечал за экспресс-анализ поступающих данных. Он участвовал в калибровке установки, моделировании её отклика, а также в совершенствовании алгоритмов реконструкции треков и кластеров в калориметре. Автор диссертации внёс определяющий вклад в анализ данных, получение физического результата для поляризуемостей пиона и детальное изучение систематических эффектов.

Автор диссертации выдвинул предложение и обосновал возможность поиска экзотических чармониев в уже набранных в период с 2002 по 2011 гг. данных эксперимента COMPASS и показал его реализуемость. Он внёс решающий вклад в реализацию предложенной программы – анализ данных, получение и интерпретацию физических результатов. Кроме того, он принимал участие в сеансах 2006, 2007, 2010 и 2011 гг., данные которых были использованы для поиска экзотических чармониеподобных состояний.

В рамках коллаборации COMPASS автор принимал непосредственное участие в подготовке рукописей основных коллаборационных статей по теме диссертации, трижды возглавляя редакционные комитеты.

Всё вышперечисленное говорит о решающей роли автора в получении результатов, вошедших в диссертацию.

### **Публикации.**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 20 печатных изданиях [1–20], 16 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [1–16], 4 — в тезисах докладов [17–20].

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, девяти глав и заключения. Полный объем диссертации 193 страницы текста с 63 рисунками и 14 таблицами. Список литературы содержит 216 наименований.

## **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, определяются цели и задачи.

Здесь также формулируются выносимые на защиту положения, описываются научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе вводится понятие поляризуемостей адронов, даётся обзор предсказаний различных теоретических моделей для величин электрической  $\alpha_\pi$  и магнитной  $\beta_\pi$  поляризуемостей заряженного пиона, рассматриваются различные методы экспериментального определения этих величин, а также даётся обзор имеющихся экспериментальных результатов.

Электрическая  $\alpha_\pi$  и магнитная  $\beta_\pi$  поляризуемости пиона характеризуют жёсткость пиона как сложной кварк-глюонной системы, определяя проявление его внутренней структуры в реакции комптоновского рассеяния. Киральная теория возмущений, являющаяся одной из наиболее успешных феноменологических моделей в области низких энергий в двухпетлевом приближении предсказывает значения  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0.16 \times 10^{-4}$  фм<sup>3</sup> и  $\alpha_\pi - \beta_\pi = (5.7 \pm 1.0) \times 10^{-4}$  фм<sup>3</sup> [A4]. Предсказания большинства других моделей для  $\alpha_\pi$  лежат в широком интервале от  $1 \times 10^{-4}$  фм<sup>3</sup> до  $1 \times 10^{-3}$  фм<sup>3</sup> при  $\alpha_\pi + \beta_\pi \approx 0$ .

Имевшиеся к середине 2000х экспериментальные результаты также лежали в широких пределах, имели значительные ошибки и недостаточно хорошо согласовывались друг с другом, а также с предсказаниями киральной теории возмущений, что и послужило мотивом для проведения нового прецизионного измерения поляризуемостей заряженного пиона на установке COMPASS.

Во второй главе даётся обзор сложившейся на сегодняшний день ситуации с экзотическими чармониеподобными состояниями. Здесь кратко освещается история открытия и изучения таких состояний, а также рассматриваются различные методы их поиска и экспериментального изучения.

В период с 2003 года по настоящее время было заявлено о наблюдении с разной степенью достоверности более чем двадцати различных чармониеподобных состояний (то есть, адронов, включающих в себя пару  $c\bar{c}$ ), чьи свойства не укладываются в рамки классической кварковой модели. Было предложено несколько теоретических моделей, объясняющих природу этих объектов: тетракварки, мезонные молекулы, адрочармонии, глюболы, гибридные мезоны и т. д. Предпринимались также попытки объяснить наблюдаемые сигналы различными кинематическими эффектами вблизи порога рождения

пар  $D$ -мезонов. Однако, и в настоящее время природа экзотических чармониев остаётся невыясненной.

К текущему моменту для поиска и изучения свойств экзотических чармониев используются следующие эксклюзивные механизмы: рождение в распадах  $B$ -адронов, резонансное рождение в аннигиляции  $e^+e^-$ , рождение в сопровождении дополнительной пары  $c\bar{c}$ , рождение в реакции слияния виртуальных фотонов в  $e^+e^-$  столкновениях, рождение в распаде других чармониев, а также инклюзивное рождение в столкновениях адронов при высоких энергиях. Фото(лепто)рождение на ядерных мишенях является новым механизмом, интерес к которому определяется в том числе и тем, что с одной стороны, в таком процессе может быть непосредственно определена интенсивность взаимодействия экзотического состояния с фотоном. С другой стороны, представляет интерес взаимодействие родившегося объекта с ядерной материей, которое зависит от природы этого экзотического объекта.

Третья глава посвящена обзору физической программы эксперимента COMPASS.

COMPASS (COmmon Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) – эксперимент с неподвижной мишенью на вторичном пучке протонного суперсинхротрона (SPS) в ЦЕРН. Основными задачами эксперимента является изучение внутренней структуры адронов и адронная спектроскопия с использованием мюонных и адронных пучков высокой интенсивности. Научная программа эксперимента была принята в 1997 году, а уже в 2002 был осуществлён первый набор данных. С 2012 года реализуется второй этап эксперимента, рассчитанный на срок до 2020 года. Физическая программа первой фазы эксперимента [A2] (экспериментальные данные именно этой фазы лежат в основе диссертации) включает в себя измерения с мюонным пучком, связанные с изучением спиновой структуры нуклонов в полуинклюзивных реакциях глубоконеупругого рассеяния, и измерения с адронным пучком, которые включают в себя адронную спектроскопию и изучение реакций Примакова, в том числе и прецизионное измерение поляризуемостей заряженного пиона. Поиск фоторождения экзотических чармониев в данных, набранных с мюонным пучком, предложенный автором диссертации, послужил дополнением изначальной физической программы.

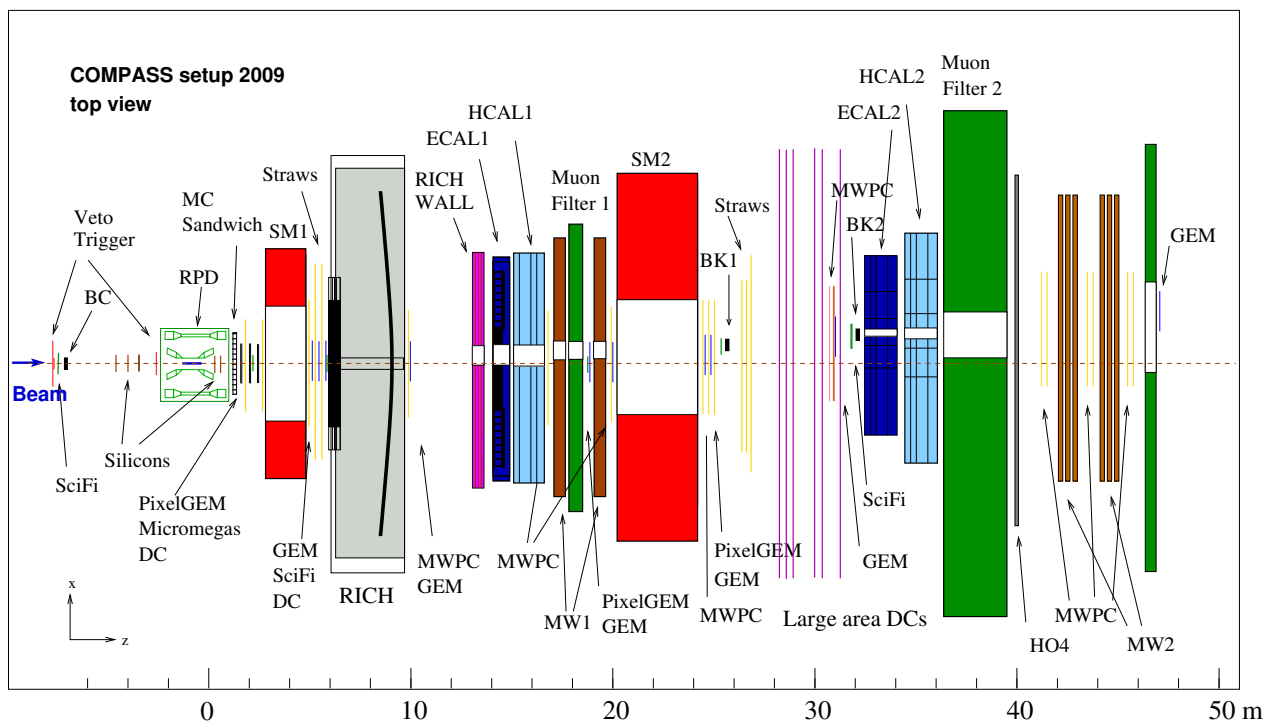


Рис. 1 — Установка COMPASS в конфигурации для сеансов с адронным пучком в 2009 году (вид сверху) [9].

В четвертой главе приведено общее описание экспериментальной установки COMPASS в сеансах с мюонным и адронным пучками, причём более детально описаны подсистемы детектора, которые являлись критически важными для исследований, представленных в диссертации.

Экспериментальная установка COMPASS на протяжении всего срока работы эксперимента модифицировалась с целью адаптации и оптимизации для того или иного пункта физической программы [9; 10]. Установка условно может быть разделена на три части. Первая часть включает в себя детекторы, стоящие до мишени, которые измеряют параметры трека налетающей пучковой частицы. Вторая и третья части установки COMPASS, спектрометры больших и малых углов, построены вокруг спектрометрических магнитов SM1 и SM2, соответственно, расположены последовательно за мишенью. Суммарная протяжённость установки вдоль оси пучка превышает 50 метров. Наличие двух независимых спектрометров позволяет регистрировать и идентифицировать вторичные частицы в широких диапазонах импульсов и углов вылета. Каждый из спектрометров включает в себя электромагнитный и адронный калориметр, а также систему идентификации мюонов. В спектрометр больших углов входит также детектор черенковских колец, служащий для идентификации вторичных частиц. Схема детектора COMPASS в конфи-

гурации 2009 года для сеанса с адронным пучком представлена на рисунке 1.

Для набора данных используются пучки положительных и отрицательных мюонов с импульсом 160 ГэВ/с – 200 ГэВ/с, а также положительные и отрицательные адронные пучки с импульсом 190 ГэВ/с, где в случае пучка положительных адронов основной компонентой являются протоны, а в случае отрицательных – пионы. Примесь каонов в отрицательном адронном пучке составляла 2.4%. Пара черенковских счётчиков служит для идентификации пучкового адрона.

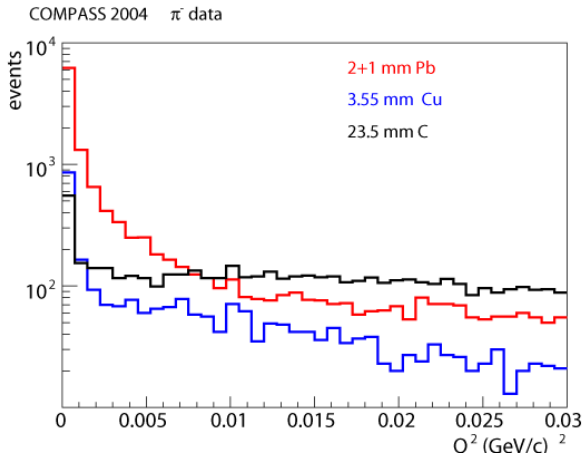
В сеансах с мюонным пучком для изучения спиновой структуры нуклона в качестве мишеней использовались продольно и поперечно поляризованные криогенные мишени из  ${}^6\text{LD}$  и  $\text{NH}_3$ , в то время как в сеансах с адронным пучком использовались ядерные мишени различной толщины с атомным номером от водорода до свинца.

**Пятая глава** посвящена измерению поляризуемостей заряженного пиона в эксперименте COMPASS. Здесь рассматривается кинематика используемой реакции

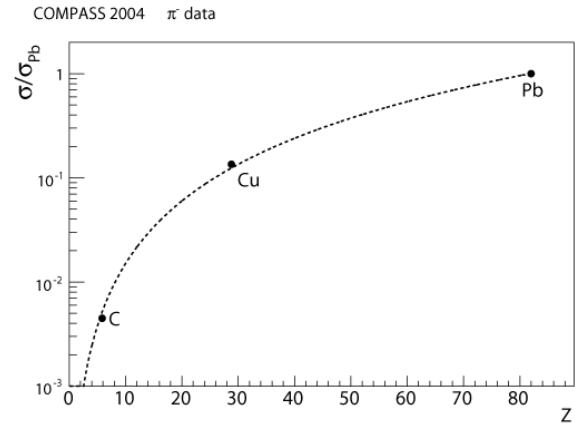
$$\pi^-(A,Z) \rightarrow \pi^-(A,Z)\gamma,$$

анализируется опыт предыдущего подобного эксперимента на установке "СИГМА" (Серпухов), рассказывается о результатах предварительного сеанса 2004 года на установке COMPASS и основном измерении в сеансе 2009 года. В данной главе даётся подробное описание проделанной автором работы, излагаются полученные результаты и представляется их обсуждение.

Пробный сеанс набора данных для программы измерения поляризуемости пиона продолжительностью около двух недель был проведён осенью 2004 года. В ходе сеанса использовались пучки отрицательных пионов и мюонов с импульсом 190 ГэВ/с выведенные на ядерные мишени. Следует отметить, что COMPASS имеет уникальную возможность использовать мюонный пучок той же энергии, что и пионный, для изучения и устранения возможных систематических эффектов. Основным материалом мишени служил свинец ( $0.5 X_0$ ), для изучения систематических эффектов и для проверки зависимости сечения примаковского рассеяния от заряда ядра  $Z$  использовались также медная и графитовая мишени. В ходе сеанса была протестирована



(а)



(б)

Рис. 2 — Результаты пробного сеанса 2004 года на установке COMPASS: (а)  $Q^2$  распределения для свинцовой (показано красным), медной (показано синим) и графитовой (показано чёрным) мишеней [8; 18]. (б) Измеренная зависимость сечения изучаемой реакции от атомного номера мишени. Значения для сечений нормированы на соответствующее сечение для свинца. Пунктирная кривая соответствует  $Z^2$  зависимости для сечения. [8; 18]

возможность проведения заявленных в программе эксперимента измерений и сделаны выводы об оптимизации установки для последующих измерений. На Рис. 2 показаны полученные по результатам пробного сеанса распределения по квадрату переданного в реакции 4-импульса ( $Q^2$ ) для различных мишеней (а) и зависимость сечения изучаемой реакции от атомного номера ядра мишени (б).

По итогам пробного сеанса был выработан ряд рекомендаций по оптимизации установки для последующих измерений. Для уменьшения влияния совокупности различных поправок к борновскому сечению (прежде всего, поправок на многофотонный обмен и экранирование заряда ядра электронной оболочкой) материал мишени был заменён на никель, толщина мишени для уменьшения эффектов связанных с многократным рассеянием и улучшения разрешения по квадрату переданного в реакции 4-импульса была уменьшена до  $0.3 X_0$ . Был принят ряд мер по упрощению и оптимизации триггера, основным элементом которого стал электромагнитный калориметр спектрометра малых углов, а также по повышению прозрачности экспериментальной установки для фотонов. Результаты пробного сеанса обсуждаются в работах автора [8; 11; 12; 18]

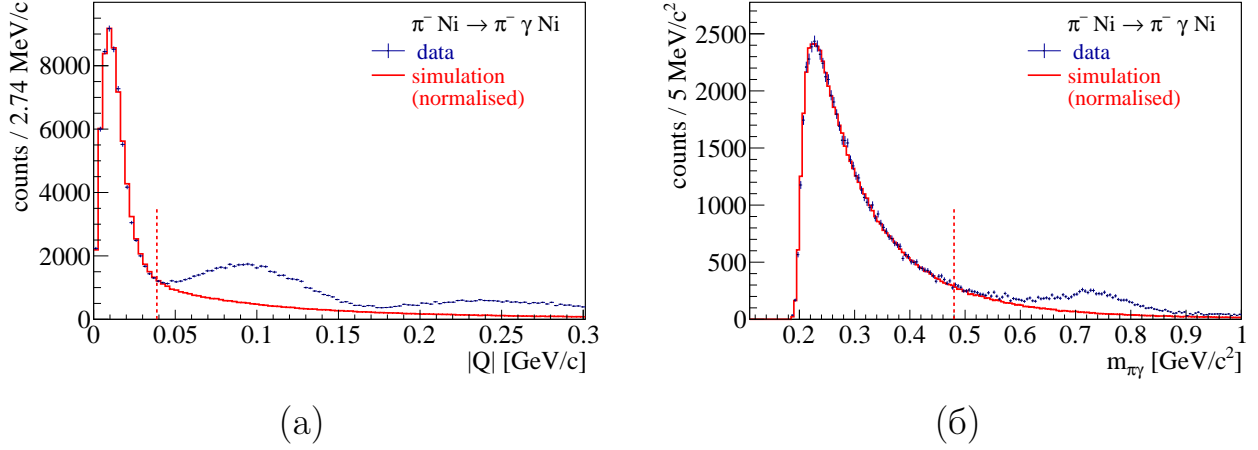


Рис. 3 — Сравнение измеренных (чёрные точки с ошибками) и полученных методом численного моделирования (красные гистограммы) распределений для измерений с пионным пучком: (а) для модуля переданного ядру 4-импульса  $|Q|$ ; (б) для инвариантной массы конечного состояния  $m_{\pi\gamma}$ . Границы кинематического диапазона, используемого в анализе, показаны вертикальной линией [1].

Данные, использованные для извлечения поляризуемостей заряженного пиона, были набраны в 2009 году. В ходе сеанса попеременно использовались пучки отрицательных пионов и мюонов с импульсом 190 ГэВ/с. Принимались во внимание только события с энерговыделением выше 70 ГэВ в центральной области электромагнитного калориметра. Извлечение поляризуемости пиона было выполнено в предположении  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$  в следующей кинематической области:  $Q^2 < 1.5 \times 10^{-3} (\text{GeV}/c)^2$  (Рис. 3(а)),  $M_{\pi\gamma} < 3.5m_\pi$  (Рис. 3(б)) и  $p_T < 45 \text{ MeV}/c$  путём сравнения измеренной формы дифференциального сечения  $d\sigma/dx_\gamma$  реакции  $\pi^- Ni \rightarrow \pi^- Ni \gamma$ , где  $x_\gamma$  — энергия испущенного фотона, отнесённая к энергии пучка, с формой, предсказанной теорией для точечного бесструктурного пиона. Отношение  $R_\pi(x_\gamma)$  измеренного дифференциального сечения к ожидаемому для точечного пиона показано на Рис. 4(а). Помимо борновского сечения для случая точечного пиона были приняты во внимание радиационные и киральные поправки к сечению, а также электромагнитный формфактор ядра никеля. Значение электрической поляризуемости было получено в результате подгонки функции

$$R_\pi(x_\gamma) = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{x_\gamma^2}{1 - x_\gamma} \cdot \frac{m_\pi^3}{\alpha} \cdot \alpha_\pi.$$



в интервале  $0.4 < x_\gamma < 0.9$  к экспериментальным точкам. Было установлено, что основными источниками систематической ошибки измерения являются: i) неопределённость, связанная с ограниченной точностью определения эффективности трековых детекторов, закладываемой в моделирование; ii) неопределённость, связанная с тем, что в моделировании не были учтены кулоновские поправки, а также поправки на многофотонный обмен и эффект экранирования заряда ядра электронной оболочкой; iii) неопределённость вычитания фона от распада  $\pi^0$ , а также iv) неопределённость, связанная с влиянием фона сильного взаимодействия и его интерференции с кулоновским взаимодействием при малых значениях  $Q^2$  на форму  $x_\gamma$ -распределения.

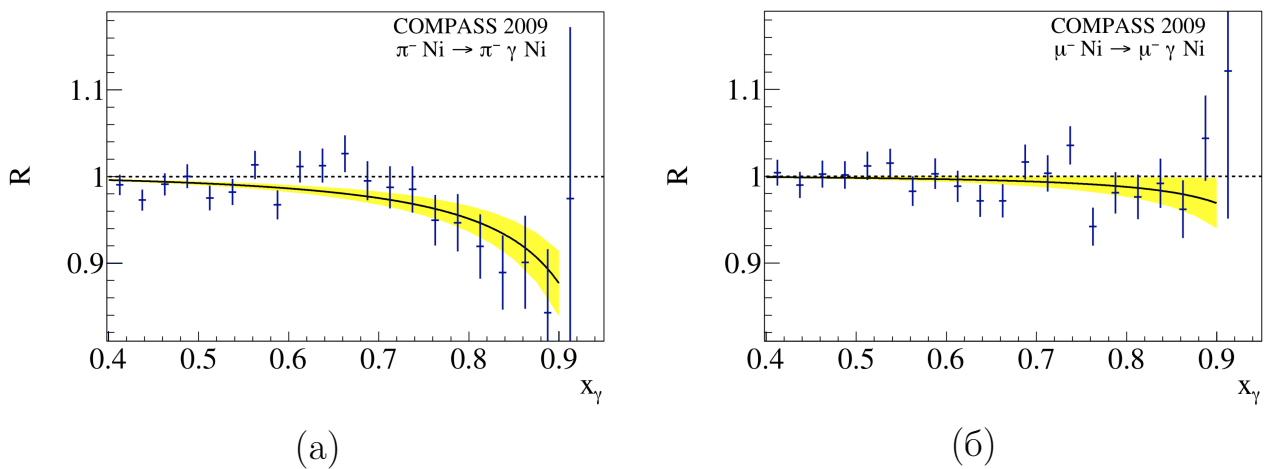


Рис. 4 — Измеренные отношения (а)  $R_\pi$  и (б)  $R_\mu$  в зависимости от  $x_\gamma$ .

Результат подгонки показан чёрными кривыми, а диапазон ошибок, соответствующий одному стандартному отклонению, — жёлтой областью [1].

Для проверки отсутствия значимых неучтённых систематических эффектов анализ был повторён для данных, набранных с мюонным пучком той же энергии и интенсивности. Хотя из-за разницы в спинах пиона и мюона формы  $x_\gamma$  распределений для  $\pi\gamma$  и  $\mu\gamma$  событий существенно отличаются, измеренное дифференциальное сечение  $d\sigma_{\mu\gamma}/dx_\gamma$  должно в точности соответствовать предсказанному квантовой электродинамикой. Измеренное отношение  $R_\mu(x_\gamma)$ , приведённое на Рис. 4(б), соответствует значению ”ложной” поляризуемости  $(0.5 \pm 0.5_{\text{стат.}}) \times 10^{-4}$  фм<sup>3</sup>. которое согласуется в пределах ошибки с нулевым значением. Это свидетельствует об отсутствии значительных неучтённых вкладов в систематику.

Возможное влияние вкладов более высоких членов в разложении комптоновской амплитуды (кадрупольные поляризуемости и т. д.) исследовалось

посредством варьирования верхней границы отбора по массе конечного состояния в диапазоне от  $0.40 \text{ ГэВ}/c^2$  до  $0.57 \text{ ГэВ}/c^2$  и было признано незначительным.

Полученное в конечном итоге значение для поляризуемости пиона  $\alpha_\pi$  в предположении  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$

$$\alpha_\pi = (2.0 \pm 0.6_{\text{стат.}} \pm 0.7_{\text{сист.}}) \times 10^{-4} \text{ фм}^3$$

согласуется с предсказанием киральной теории возмущений и является самым точным в мире на сегодняшний день измерением этой величины в отдельно взятом эксперименте. Детали анализа подробно представлены в работах автора [1; 14].

**Шестая глава** посвящена анализу возможности измерения поляризуемостей заряженного каона в следующей фазе эксперимента COMPASS.

Каон, будучи голдстоуновским бозоном в  $SU(3)$  симметричной киральной теории, является таким же основополагающим объектом КХД, как и пион. Киральная теория возмущения предсказывает для поляризуемостей каона значения  $\alpha_K + \beta_K \approx 0$  и  $\alpha_K = (0.64 \pm 0.10) \times 10^{-4} \text{ фм}^3$ .

В настоящее время активно обсуждается создание в ЦЕРН интенсивного (до  $2 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$ ) пучка обогащённого каонами, на основе технологии радиочастотной сепарации [A3]. На основе опыта, накопленного при проведении измерений поляризуемости заряженного пиона на установке COMPASS, было предложено провести первое в мире измерение поляризуемости заряженного каона в реакции  $K^-(A,Z) \rightarrow K^-(A,Z)\gamma$  [6; A5]. Показано, что в условиях, близких к условиям измерения поляризуемости пиона на установке COMPASS, может быть достигнута статистическая точность извлечения величины  $\alpha_K$  на уровне  $\pm 0.03 \times 10^{-4} \text{ фм}^3$  в предположении  $\alpha_K + \beta_K = 0$ . При этом ожидается, что систематическая ошибка по своей величине не превзойдёт ошибку статистическую.

В **седьмой главе** описывается поиск лепто(фото)рождения экзотических чармониеподобных состояний  $Z_c^\pm(3900)$  и  $Z_c^\pm(4200)$  в эксклюзивной реакции

$$\mu^+ N \rightarrow \mu^+ Z_c^\pm N \rightarrow \mu^+ J/\psi \pi^\pm N \rightarrow \mu^+ \mu^+ \mu^- \pi^\pm N$$

на установке COMPASS, а также обсуждается полученный результат.

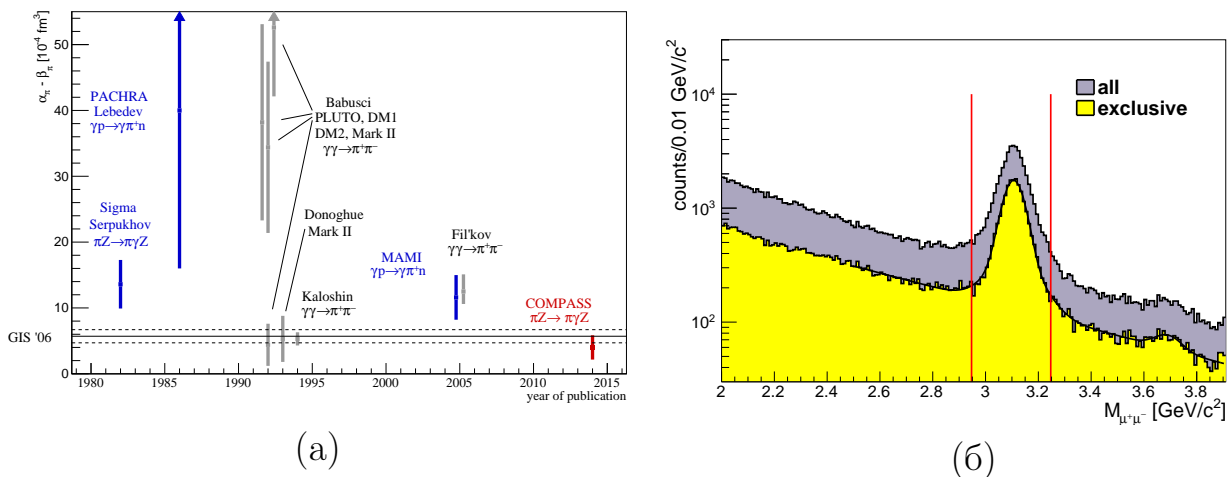


Рис. 5 — (а) Экспериментальные результаты для величины  $\alpha_\pi - \beta_\pi$  из различных источников, отсортированные по годам публикации, включая результат COMPASS (показан красным). Синим показаны результаты предыдущих специализированных экспериментов. Предсказание киральной теории [A4] показано горизонтальной линией [14]. (б) Спектр инвариантных масс для всех димюонов, рождённых в мюон-нуклонном рассеянии на установке COMPASS (показано синим) и для димюонов, рождённых эксклюзивно в реакции  $\mu^+ N \rightarrow \mu^+ J/\psi N$  (показано жёлтым) [2].

Для анализа использовались данные по глубоконеупругому рассеянию мюонного пучка на поляризованных ядерных мишенях, набранные в сеансах 2002–2011 годов в рамках программы по изучению спиновой структуры нуклона. Возможные спин-зависимые эффекты подавлялись путём комбинирования данных со всеми возможными поляризациями мишеней. Для последующего изучения отбирались события с вершиной, реконструированной в области мишени и четырьмя исходящими из неё треками, три из которых – мюонные с соответствующими зарядами, причём, два из них происходят от распада  $J/\psi$  (см. Рис. 5(б)). Полное число восстановленных распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  составило около 50 000. Эта статистика эквивалентна интегральной светимости  $14 \text{ пб}^{-1}$  для взаимодействия пучка реальных фотонов с энергией 100 ГэВ со свободными нуклонами. Распределение для инвариантной массы системы ”фотон-нуклон” показано на Рис. 6(а).

Спектр инвариантных масс для  $J/\psi \pi^\pm$  показанный на Рис. 6(б), не содержит какой-либо статистически значимой резонансной структуры в области  $3.9 \text{ ГэВ}/c^2$ . Верхний предел для возможного числа событий рождения  $Z_c^\pm(3900)$  был определён из сравнения ожидаемого числа фоновых событий

в интервале  $3.84 \text{ ГэВ}/c^2 < M_{J/\psi\pi^+} < 3.96 \text{ ГэВ}/c^2$ , полученного из подгонки функции, описывающей фон за пределами сигнального интервала, и фактически наблюдаемого числа событий в сигнальном интервале. Он составил  $N_{Z_c}^{UL} = 15.1$  событий (CL=90%).

Для определения абсолютной нормировки вероятности фоторождения  $Z_c^\pm(3900)$  в качестве опорного был использован процесс эксклюзивного некогерентного фоторождения  $J/\psi$  на свободном нуклоне

$$\gamma N \rightarrow J/\psi N, \quad (1)$$

сечение которого в исследуемой области известно. Был произведён переход от отношения сечений лепторождения к отношению сечений фоторождения, а затем установлено, что

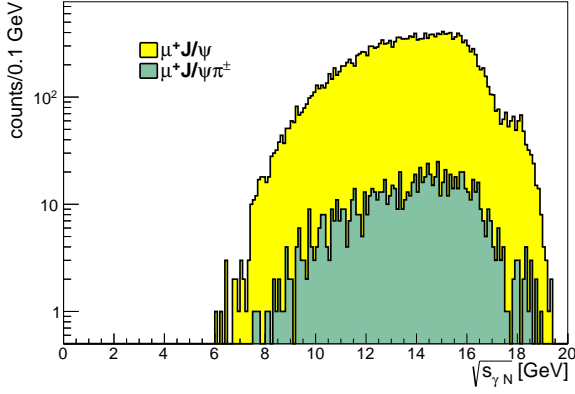
$$\mathcal{B}_{Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi\pi^\pm} \times \sigma_{\gamma N \rightarrow Z_c^\pm(3900) N} \Big|_{\langle \sqrt{s_{\gamma N}} \rangle = 13.8 \text{ ГэВ}} < 52 \text{ пб.}$$

где  $\mathcal{B}_{Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi\pi^\pm}$  – относительная вероятность канала распада  $Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi\pi^\pm$ . Этот результат был проинтерпретирован в рамках модели рождения  $Z_c^\pm(3900)$ , описанной в работе [А6]. Для значения параметра модели  $\Lambda_\pi = 0.6 \text{ ГэВ}/c^2$  был получен верхний предел для парциальной ширины  $\Gamma_{J/\psi\pi} < 2.4 \text{ МэВ}/c^2$ . Этот результат говорит о том, что канал распада  $Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi\pi^\pm$  не является доминирующим, что согласуется с уже имеющимися экспериментальными данными. Подробности анализа могут быть найдены в работах автора [2; 15]. Аналогичная работа была проделана по определению верхнего предела для сечения рождения экзотического чармониеподобного состояния  $Z_c^\pm(4200)$ , а также верхнего предела парциальной ширины распада  $Z_c^\pm(4200) \rightarrow J/\psi\pi^\pm$  [3; 16].

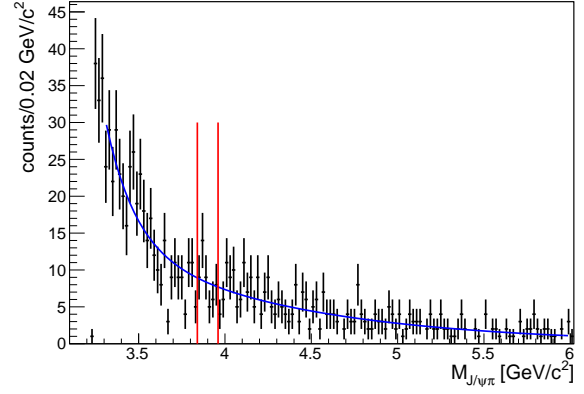
**Восьмая глава** посвящена поиску лепто(фото)рождения на установке COMPASS экзотического чармония  $X(3872)$  в эксклюзивной реакции

$$\mu^+ N \rightarrow \mu^+ X(3872)\pi^\pm N \rightarrow \mu^+ J/\psi\pi^+\pi^-\pi^\pm N \rightarrow \mu^+\mu^+\mu^-\pi^+\pi^-\pi^\pm N. \quad (2)$$

Для поиска лепто(фото)рождения  $X(3872)$  использовались те же данные, что и для поиска  $Z_c^\pm(3900)$ , а также сходные критерии отбора событий с  $J/\psi$  в конечном состоянии. Спектр инвариантных масс подсистемы  $J/\psi\pi^+\pi^-$



(a)



(б)

Рис. 6 — (а) Распределения по  $\sqrt{s_{\gamma N}}$  для процессов  $\mu^+ N \rightarrow \mu^+ J/\psi \pi^\pm N$  и  $\mu^+ N \rightarrow \mu^+ J/\psi N$  [2]. (б) Спектр инвариантных масс для конечного состояния  $J/\psi \pi^\pm$  [2]. Результат подгонки показан линией. Вертикальными линиями показана сигнальная область.

представлен на Рис. 7(а). Ниже  $4 \text{ ГэВ}/c^2$  наблюдаются две резонансных структуры, положение и ширина которых находятся в согласии с гипотезой рождения и распада состояний  $\psi(2S)$  и  $X(3872)$ . Однако, как будет показано ниже, это согласие для второго пика не является полным, поэтому соответствующее ему состояние получило обозначение  $\tilde{X}(3872)$ . Число событий в пиках  $\psi(2S)$  и  $\tilde{X}(3872)$  оценено, соответственно, как  $N_{\psi(2S)} = 24.2 \pm 6.5$  и  $N_{\tilde{X}(3872)} = 13.2 \pm 5.2$ . Для масс же получены значения  $M_{\psi(2S)} = 3683.7 \pm 6.5 \text{ МэВ}/c^2$  и  $M_{\tilde{X}(3872)} = 3860.4 \pm 10.0 \text{ МэВ}/c^2$ , которые находятся в хорошем согласии с мировыми средними значениями для  $\psi(2S)$  и  $X(3872)$  [A1]. Было установлено также, что аналогичные спектры масс для неэксклюзивных событий с той же сигнатурой не содержит никаких статистически значимых сигналов кроме, возможно, сигнала  $\psi(2S)$ . Не наблюдается и резонансных состояний в спектрах масс  $\psi(2S)\pi^\pm$  и  $\tilde{X}(3872)\pi^\pm$ .

Параллельно с реакцией заряженного обмена исследовалась реакция нейтрального обмена

$$\mu^+ N \rightarrow \mu^+ X^0 N \rightarrow \mu^+ (J/\psi \pi^+ \pi^-) N \rightarrow \mu^+ (\mu^+ \mu^- \pi^+ \pi^-) N. \quad (3)$$

Спектр инвариантных масс эксклюзивного конечного состояния  $J/\psi \pi^+ \pi^-$  для этой реакции показан на Рис. 7(б). В нём хорошо заметен пик  $\psi(2S)$ , в то время как для числа событий рождения  $X(3872)$  было установлено лишь огра-

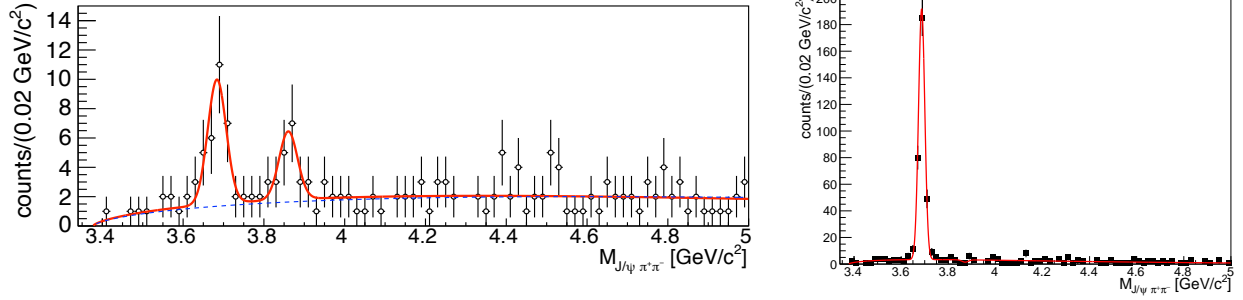


Рис. 7 — (а) Спектр инвариантных масс подсистемы  $J/\psi\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  конечного состояния  $J/\psi\pi^+\pi^-\pi^\pm$  для эксклюзивных событий ( $|\Delta E| < 4$  ГэВ) реакции (2) [5]. Результат подгонки показан красным. (б) Спектр инвариантных масс эксклюзивного конечного состояния  $J/\psi\pi^+\pi^-$  для реакции нейтрального обмена (3) [5].

ничение сверху: 0.9 событий (CL=90%). Аналогичный анализ был проведён для эксклюзивного конечного состояния  $\mu^+J/\psi 2\pi^+2\pi^-N'$ . Никаких статистически значимых указаний на сигнал  $X(3872)$  в спектре инвариантных масс подсистемы  $J/\psi\pi^+\pi^-$  для соответствующей реакции обнаружено не было.

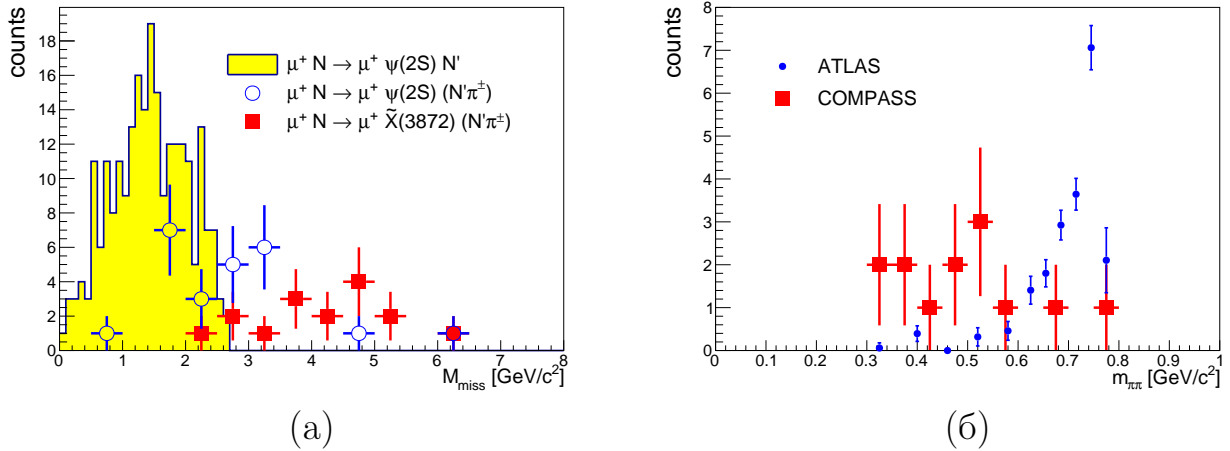


Рис. 8 — (а) Распределения для недостающей массы  $M_{miss}$  для событий  $\psi(2S)\pi^\pm$  (синие кружки) и  $\tilde{X}(3872)\pi^\pm$  (красные квадраты), рождённых в реакции (2) и для  $\psi(2S)$  рождённых в реакции (3) [5]. (б) Спектр инвариантных масс подсистемы  $\pi^+\pi^-$  в распаде  $\tilde{X}(3872)$ , полученный на установке COMPASS (красные квадраты) и в распаде  $X(3872)$ , полученный на установке ATLAS [A7] (синие точки) [5].

На Рис. 8(а) показаны распределения для величины недостающей массы  $M_{miss}$ , определяемой следующим образом:

$$M_{miss}^2 = (P_\mu + P_N - P_{\mu'} - P_{X^0})^2,$$

для реакций эксклюзивного рождения состояний  $\psi(2S)\pi^\pm$  и  $\tilde{X}(3872)\pi^\pm$  (следует заметить, что при таком определении сопутствующий пион даёт вклад в недостающую массу). Средние значения недостающей массы для событий рождения  $\psi(2S)$  и  $\tilde{X}(3872)$  вместе с сопутствующим пионом в реакции (2) составляют, соответственно,  $2.7 \text{ ГэВ}/c^2$  и  $4.3 \text{ ГэВ}/c^2$ . Такая значимая разница свидетельствует о том, что, скорее всего, механизмы рождения этих конечных состояний разные.

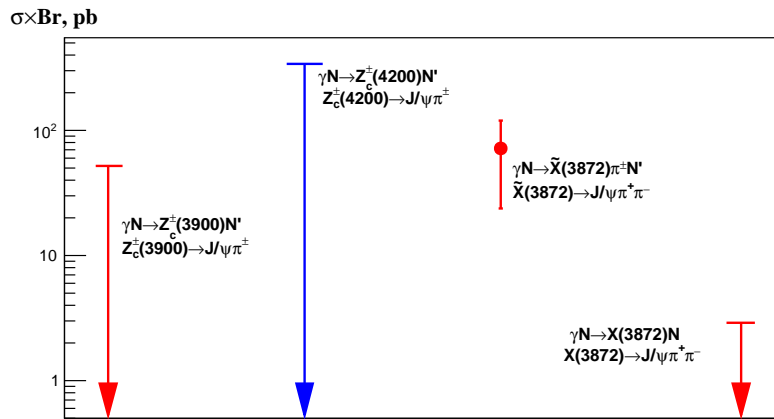


Рис. 9 — Сводные результаты, полученные автором диссертации, для сечения фоторождения экзотических чармониев, умноженного на относительную вероятность соответствующего канала распада. Красным показаны результаты, опубликованные коллаборацией COMPASS [2; 5], синим – результат из работы [3] по данным эксперимента COMPASS.

На Рис. 8(б) приведено сравнение спектров инвариантных масс двух пионов, полученных в распаде  $\tilde{X}(3872)\pi^\pm \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$  на установке COMPASS и в эксперименте ATLAS для распада  $X(3872)$  [A7]. Статистическая значимость различия в формах полученного для  $\tilde{X}(3872)$  распределения и ожидаемого в распаде  $X(3872) \rightarrow J/\psi\rho^0$  была оценена с использованием метода максимального правдоподобия. Она составляет от  $4.7\sigma$  до  $7.3\sigma$  и зависит от допущений о влиянии фона под пиком  $\tilde{X}(3872)$  (см. Рис. 7(а)). Именно столь значительное различие в спектрах инвариантных масс двух пионов и

не позволяет отождествить наблюдаемый сигнал в соответствующей области спектра инвариантных масс  $J/\psi\pi^+\pi^-$  с хорошо известным состоянием  $X(3872)$  и заставляет предположить, что, по всей видимости, следует говорить о новом, не наблюдавшимся прежде, состоянии  $\tilde{X}(3872)$ . Автором была проделана обширная работа по изучению возможных систематических эффектов, позволяющих интерпретировать пик  $\tilde{X}(3872)$  в спектре инвариантных масс  $J/\psi\pi^+\pi^-$  как ложный сигнал, однако, убедительных свидетельств наличия таких систематических эффектов найдено не было.

Таким образом, в канале распада  $J/\psi\pi^+\pi^-$  на установке COMPASS со статистической значимостью  $4.1\sigma$  наблюдался сигнал нового чармониеподобного состояния  $\tilde{X}(3872)$  с массой  $M_{\tilde{X}(3872)} = 3860.4 \pm 10.0$  МэВ/ $c^2$  и Брейт-Вигнеровской шириной  $\Gamma_{\tilde{X}(3872)} < 51$  МэВ/ $c^2$  (CL=90%), квантовые числа которого не соответствуют таковым для  $X(3872)$  ( $1^{++}$ ). Существование состояния, имеющего квантовые числа  $1^{+-}$ , и близкого по массе к  $X(3872)$ , согласуется с предсказанием тетракварковой (дикварк-антидикварковой) модели экзотического чармония  $X(3872)$  [A8; A9].

Используя метод, описанный в седьмой главе, была получена оценка сечения фоторождения  $\tilde{X}(3872)$ , умноженного на относительную вероятность распада в  $J/\psi\pi^+\pi^-$

$$\sigma_{\gamma N \rightarrow \tilde{X}(3872)\pi N'} \times \mathcal{B}_{\tilde{X}(3872) \rightarrow J/\psi\pi\pi} = 71 \pm 28(\text{стат.}) \pm 39(\text{сист.}) \text{ пб.}$$

Было также получено ограничение на сечение рождения состояния  $X(3872)$  в реакции (3):

$$\mathcal{B}_{X(3872) \rightarrow J/\psi\pi\pi} \times \sigma_{\gamma N \rightarrow X(3872)N'} \Big|_{\langle \sqrt{s_{\gamma N}} \rangle = 14 \text{ ГэВ}} < 2.9 \text{ пб.}$$

Детали анализа могут быть найдены в работах автора [5; 6; 19; 20]. Результаты поиска лепто(фото)рождения экзотических чармониеподобных состояний на установке COMPASS обобщены на Рис. 9.

В **девятой главе** обсуждается возможность дальнейшего изучения фоторождения экзотических чармониев в данных эксперимента COMPASS, а также в данных других экспериментов: завершившихся, продолжающихся и планируемых.



Модификация установки COMPASS для сеансов 2016–2017 гг. в рамках программы по измерению обобщённых партонных распределений, существенно повысившая её прозрачность для фотонов, предоставляет новые возможности для поиска лепто(фото)рождения экзотических чармониев, распадающихся в конечное состояние с фотонами и нейтральными пионами (например,  $Z_c^0(3900) \rightarrow J/\psi\pi^0$ ). Однако, объём набранных в этих сеансах данных в несколько раз меньше использовавшегося в работе, описанной в диссертации [19; 20].

Многообещающе выглядит возможность поиска и изучения фоторождения чармониеподобных состояний в ультрапериферических столкновениях протонов и ядер в экспериментах на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН), а также в электрон-нуклонном рассеянии на планируемом к постройке в США электрон-ионном коллайдере EIC [20].

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

1. В ходе предварительного сеанса 2004 года были получены данные по радиационному рассеянию пиона на различных ядерных мишенях, анализ которых позволил оптимизировать универсальный детектор COMPASS и методику измерения для последующего набора данных в 2009 году с целью определения поляризуемостей заряженного пиона.
2. Анализ данных по радиационному рассеянию отрицательного пиона с импульсом 190 ГэВ/с на никелевой мишени, набранных в сеансе 2009 года, позволил извлечь поляризуемости заряженного пиона  $\alpha_\pi$  и  $\beta_\pi$  в предположении  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$  с точностью  $0.9 \times 10^{-4}$  фм<sup>3</sup>, что является самым точным измерением этих величин в отдельно взятом эксперименте. Полученный результат

$$\alpha_\pi = -\beta_\pi = (2.0 \pm 0.6_{\text{стат.}} \pm 0.7_{\text{сист.}}) \times 10^{-4} \text{ фм}^3$$

находится в хорошем согласии с предсказанием эффективной киральной теории, что, несомненно, является важным для становления и дальнейшего развития как этой модели, так и других феноменологических моделей в области низких энергий.

3. На основе опыта, полученного в работе с каонной компонентой адронного пучка на установке COMPASS было сделано предложение по измерению в будущем поляризуемостей заряженного каона с использованием радиосепарированного каонного пучка, что стало бы первым в мире измерением этой величины. Данное предложение официально принято в качестве одной из компонент физической программы будущих исследований на установке COMPASS.
4. В ходе поиска лепто(фото)рождения экзотических чармониев  $Z_c^\pm(3900)$ ,  $Z_c^\pm(4200)$  и  $X(3872)$  в эксклюзивных реакциях заряженного и нейтрального обмена в данных по полуинклюзивному глубоконеупругому рассеянию мюонов с импульсом 160 ГэВ/с и 200 ГэВ/с на  ${}^6\text{LiD}$  и  $\text{NH}_3$  мишенях, набранных в период с 2002 по 2011 год на установке COMPASS была произведена оценка верхних пределов для сечений фоторождения этих состояний (CL=90%):

$$\mathcal{B}_{Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi \pi^\pm} \times \sigma_{\gamma N \rightarrow Z_c^\pm(3900) N} \Big|_{\langle \sqrt{s_{\gamma N}} \rangle = 13.8 \text{ ГэВ}} < 52 \text{ пб},$$

$$\mathcal{B}_{Z_c^\pm(4200) \rightarrow J/\psi \pi^\pm} \times \sigma_{\gamma N \rightarrow Z_c^\pm(4200) N} \Big|_{\langle \sqrt{s_{\gamma N}} \rangle = 13.8 \text{ ГэВ}} < 340 \text{ пб},$$

$$\mathcal{B}_{X(3872) \rightarrow J/\psi \pi \pi} \times \sigma_{\gamma N \rightarrow X(3872) N'} \Big|_{\langle \sqrt{s_{\gamma N}} \rangle = 14 \text{ ГэВ}} < 2.9 \text{ пб}.$$

Верхние пределы для сечений фоторождения  $Z_c^\pm(3900)$  и  $Z_c^\pm(4200)$  были модельно-зависимым образом пересчитаны в ограничения на парциальную ширину распадов этих состояний в  $J/\psi \pi^\pm$ .

5. При поиске лепто(фото)рождения состояния  $X(3872)$  в реакции  $\mu^+ N \rightarrow \mu^+ \tilde{X}(3872) \pi^\pm N'$  со статистической значимостью  $4.1\sigma$  было получено свидетельство существования нового состояния  $\tilde{X}(3872)$  с массой  $M_{\tilde{X}(3872)} = 3860.4 \pm 10.0 \text{ МэВ}/c^2$  и шириной  $\Gamma_{\tilde{X}(3872)} < 51 \text{ МэВ}/c^2$  при уровне достоверности 90%, квантовые числа которого не соответствуют таковым для  $X(3872)$  ( $1^{++}$ ). Была получена оценка сечения фоторождения  $\tilde{X}(3872)$  в упомянутой выше реакции, умноженного на относительную вероятность распада в  $J/\psi \pi^+ \pi^-$

$$\sigma_{\gamma N \rightarrow \tilde{X}(3872) \pi N'} \times \mathcal{B}_{\tilde{X}(3872) \rightarrow J/\psi \pi \pi} = 71 \pm 28(\text{стат.}) \pm 39(\text{сист.}) \text{ пб}.$$

Существование подобного состояния, близкого по массе к  $X(3872)$ , хорошо укладывается в модель, трактующую экзотический чармоний  $X(3872)$  как тетракварковое (дикварк-антидикварковое) состояние.

6. Были проанализированы перспективы дальнейшего поиска фотопроизводства экзотических чармониев на установке COMPASS, где определённые надежды по поиску распадов чармониеподобных состояний с конечными состояниями с фотонами можно возлагать на данные сеансов 2016-2017 гг., а также в других экспериментах. Перспективными для такого поиска кажутся ультрапериферические столкновения в экспериментах на Большом адронном коллайдере и электрон-нуклонное рассеяние на планируемом к постройке электрон-ионном коллайдере EIC.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *Adolph C. ..., A. Guskov et al.* Measurement of the charged-pion polarizability // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Vol. 114. — P. 062002.
2. *Adolph C ..., A. Guskov et al.* Search for exclusive photoproduction of  $Z_c^\pm(3900)$  at COMPASS // *Phys. Lett.* — 2015. — Vol. B742. — Pp. 330–334.
3. *Wang Xiao-Yun, Chen Xu-Rong, Guskov Alexey.* Photoproduction of the charged charmoniumlike  $Z_c^+(4200)$  // *Phys. Rev.* — 2015. — Vol. D92, no. 9. — P. 094017.
4. *Wang Xiao-Yun, Guskov Alexey.* Photoproduction of  $a_2(1320)$  in a Regge model // *Phys. Rev.* — 2016. — Vol. D93, no. 7. — P. 074016.
5. *Aghasyan M. ..., A. Guskov et al.* Search for muoproduction of  $X(3872)$  at COMPASS and indication of a new state  $\tilde{X}(3872)$  // *Physics Letters B.* — 2018. — Vol. 783. — Pp. 334 – 340.
6. *Denisenko I., Guskov A., Mitrofanov E.* Hadron structure and spectroscopy at COMPASS. Overview of certain tasks // *Phys. Part. Nucl.* — 2017. — Vol. 48, no. 4. — Pp. 635–658.

7. *Bystritskiy M. Yu., Guskov A. V., Pervushin V. N., Volkov M. K.* Pion Polarizability in the NJL model and Possibilities of its Experimental Studies in Coulomb Nuclear Scattering // *Phys. Rev.* — 2009. — Vol. D80. — P. 114001.
8. *Guskov A. V.* The Primakoff reaction study for pion polarizability measurement at COMPASS // *Phys. Part. Nucl. Lett.* — 2010. — Vol. 7. — Pp. 192–200.
9. *Abbon P. ..., A. Guskov et al.* The COMPASS Setup for Physics with Hadron Beams // *Nucl. Instrum. Meth.* — 2015. — Vol. A779. — Pp. 69–115.
10. *Abbon P. ..., A. Guskov et al.* The COMPASS experiment at CERN // *Nucl. Instrum. Meth.* — 2007. — Vol. A577. — Pp. 455–518.
11. *Guskov A.* Pion polarizabilities measurement at COMPASS // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2008. — Vol. 110. — P. 022016.
12. *Guskov A.* Plans for a measurement of pion polarizabilities at COMPASS // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* — 2010. — Vol. 198. — Pp. 112–115.
13. *Guskov A.* The COMPASS-II program // *PoS.* — 2011. — Vol. EPS-HEP2011. — P. 462.
14. *Guskov Alexey.* Measurement of the charged-pion polarisability at COMPASS // *PoS.* — 2015. — Vol. EPS-HEP2015. — P. 439.
15. *Guskov Alexey.* Search for exclusive photoproduction of  $Z_c(3900)$  at COMPASS // *PoS.* — 2015. — Vol. EPS-HEP2015. — P. 440.
16. *Wang Xiao-Yun, Guskov Alexey.* Charmed hadron photoproduction at COMPASS // *Open Phys.* — 2016. — Vol. 14, no. 1. — Pp. 197–199.
17. *Guskov A. V.* Measurement of the pion polarizabilities at COMPASS // *Conf. Proc.* — 2006. — Vol. C060726. — Pp. 655–658.
18. *Guskov Alexey.* Pion polarizabilities measurement at COMPASS // *Fizika.* — 2008. — Vol. B17. — Pp. 313–320.
19. *Guskov A.* Muoproduction of exotic charmonia at COMPASS // *PoS.* — 2018. — Vol. Hadron2017. — P. 125.

20. *Guskov Alexey*. Search for muoproduction of the  $X(3872)$  at COMPASS // 13th International Conference on Beauty, Charm and Hyperons (BEACH2018) Peniche, Portugal, June 17-23, 2018. — 2018. <https://arxiv.org/abs/1809.00160>.

## Список цитируемой литературы

- A1. *Tanabashi M. et al.* Review of Particle Physics // *Phys. Rev.* — 2018. — Vol. D98. — P. 030001.
- A2. *Baum Guenter et al.* COMPASS: A Proposal for a Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy // *CERN-SPSLC-96-14, CERN-SPSLC-P-297*. — 1996.
- A3. *Bernard, Philippe and Lazeyras, Pierre and Lengeler, Herbert and Vaghin, V.* Particle separation with two-and three-cavity RF separators at CERN. CERN Yellow Reports: Monographs. — Geneva: CERN, 1968.
- A4. J. Gasser, M. A. Ivanov and M. E. Sainio, *Nucl. Phys. B* **745** (2006) 84 doi:10.1016/j.nuclphysb.2006.03.022 [hep-ph/0602234].
- A5. *Denisov O. Yu. ..., A. Guskov et al.* Letter of Intent: A New QCD facility at the M2 beam line of the CERN SPS. — 2018.
- A6. *Lin Qing-Yong, Liu Xiang, Xu Hu-Shan.* Charged charmoniumlike state  $Z_c(3900)^\pm$  via meson photoproduction // *Phys. Rev. D.* — 2013. — Dec. — Vol. 88. — P. 114009.
- A7. *Aaboud Morad et al.* 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 // *JHEP.* — 2017. — Vol. 01. — P. 117.
- A8. *Maiani, L., Piccinini, F., Polosa, A. D., Riquer, V.* Diquark-antidiquarks with hidden or open charm and the nature of  $X(3872)$  // *Phys. Rev.* — 2005. — Vol. D71. — P. 014028.
- A9. *Maiani, L., Piccinini, F., Polosa, A. D., Riquer, V.* The  $Z(4430)$  and a New Paradigm for Spin Interactions in Tetraquarks // *Phys. Rev.* — 2014. — Vol. D89. — P. 114010.