

На правах рукописи



Малаев Михаил Владимирович

**Рождение ϕ -мезонов в p - p , p -Pb и Pb-Pb столкновениях в эксперименте
ALICE на LHC**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель: **Рябов Виктор Германович**
доктор физико-математических наук, ФГБУ НИЦ КИ
«Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.
Константинова», ведущий научный сотрудник отделения физики
высоких энергий

Официальные оппоненты: старший научный сотрудник **Токарев Михаил Владимирович**
доктор физико-математических наук, Объединенный институт
ядерных исследований, начальник сектора лаборатории физики
высоких энергий

профессор **Андрианов Владимир Андреевич**
доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный университет», ведущий
научный сотрудник кафедры физики высоких энергий и
элементарных частиц физического факультета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «2» марта 2016 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета
Д 212.229.29 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный уч. корп.,
ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте
<https://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.29
кандидат физико-математических наук
доцент



Ермакова Н.Ю.

Актуальность работы

Одной из основных задач современной физики высоких энергий является изучение фазовой диаграммы состояния сильно взаимодействующей материи. Особый интерес представляет переход от адронных к партонным степеням свободы, который реализуется при высоких температурах и/или барионных плотностях. Изучение фазового перехода может пролить свет на два фундаментальных, но все еще загадочных аспекта квантовой хромодинамики (КХД): конфайнмент и нарушение киральной симметрии.

В лабораторных условиях достижение сверхвысоких плотностей энергии и барионных плотностей возможно только при изучении центральных столкновений релятивистских тяжелых ядер. В таких столкновениях кинетическая энергия налетающих частиц рассеивается в сравнительно большом объеме ядерного вещества, вовлеченном в реакцию. Нагревание и сжатие ядерного вещества может приводить к фазовому переходу материи из состояния бесцветных адронов в состояние свободных кварков и глюонов, получившее название кварк-глюонной плазмы (КГП). Расчеты КХД, проведенные на решетке в предположении нулевого барионного химического потенциала и конечных температур, предсказывают образование КГП при плотности энергии ~ 1 ГэВ/фм³.

Начиная с 2000 года Релятивистский Коллайдер Тяжелых Ионов (RHIC) в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (БНЛ, США) являлся основным ускорителем для изучения столкновений тяжелых ядер при энергиях взаимодействия до $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. В 2005 году все коллаборации, работающие на RHIC, сделали заявление об экспериментальном обнаружении нового состояния вещества – сильновзаимодействующей КГП, ведущей себя как идеальная жидкость, характеризующейся высокой плотностью энергии и цветовых зарядов, обладающей высокой температурой и партонными степенями свободы. В 2010 году началась реализация программы по изучению взаимодействий релятивистских тяжелых ядер на Большом Адронном Коллайдере (LHC) в Европейском Центре Ядерных Исследований (ЦЕРН, Швейцария). Несмотря на многократное увеличение энергии взаимодействия тяжелых ядер до $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ, никаких качественно новых явлений обнаружено не было. Большая часть эффектов, наблюдаемых на RHIC, также была обнаружены и на LHC, фактически подтверждая выводы об образовании сильновзаимодействующей КГП.

Вывод об образовании нового состояния ядерного вещества в центральных столкновениях тяжелых ядер при энергиях коллайдеров RHIC и LHC основан на совокупности полученных экспериментальных результатов и их интерпретации в рамках современных представлений КХД. Одними из основных доводов в пользу образования КГП стало

обнаружение эффекта подавления выхода адронов в области больших поперечных импульсов и барионной аномалии в области промежуточных поперечных импульсов.

При столкновении двух релятивистских ядер происходят процессы жесткого рассеяния, в результате которых образуются пары высокоэнергетичных цветозаряженных партонов. Распространяясь в промежуточной среде, образующейся в результате ядро-ядерного взаимодействия, партоны теряют часть своей энергии в результате когерентного тормозного излучения глюонов и многократного перерассеяния. Энергетические потери приводят к уменьшению поперечного импульса партонов и, как следствие, поперечного импульса адронов, образующихся при их фрагментации. Экспериментально данный эффект, получивший название эффекта гашения струй, наблюдается через уменьшение выхода адронов с большими поперечными импульсами. Измерение степени подавления выхода адронов позволяет оценивать энергетические потери партонов в среде и, тем самым, изучать ее свойства. При этом во взаимодействиях легких и тяжелых ядер образование промежуточной среды не ожидается и эффект гашения струй не проявляется.

Измерения, выполненные для легких адронов в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях коллайдеров RHIC и LHC, показали, что выход таких частиц действительно подавлен более чем в пять раз в центральных столкновениях тяжелых ядер (Au-Au, Pb-Pb) [5]. При этом эффекта подавления не наблюдалось для тех же адронов во взаимодействиях легких и тяжелых ядер (d -Au, p -Pb), а также для жестких прямых фотонов, не участвующих в сильных взаимодействиях [6]. Это позволило сделать вывод об экспериментальном обнаружении эффекта гашения струй и получить оценки для плотности цветowych зарядов и плотности энергии в образующейся среде, которую в настоящее время ассоциируют с КГП. На настоящий момент существует достаточно большое число теоретических моделей, которые успешно описывают степень подавления выхода легких адронов в центральных столкновениях тяжелых ядер на коллайдерах RHIC и LHC. Проблемы для данных моделей возникают при попытке одновременного описания эффектов подавления для адронов, содержащих легкие (u , d) кварки, и более тяжелых адронов, содержащих (c , b) кварки, используя одни и те же предположения о свойствах образующейся среды. Очевидно, что разрешение данного кризиса требует более углубленного изучения эффекта гашения струй, систематического измерения выходов и степени подавления для большего числа идентифицированных адронов, расширения исследований на сектор частиц, содержащих в своем составе промежуточные по массе странные кварки.

Другим важным открытием, сделанным на коллайдерах RHIC и LHC, стало обнаружение избыточного выхода барионов по отношению к мезонам в области промежуточных поперечных импульсов в центральных столкновениях тяжелых ядер [7]. Отношение выходов

протонов и пионов (p/π), измеренное в столкновениях тяжелых ионов в диапазоне поперечных импульсов 2-5 ГэВ/ c , оказалось в несколько раз большим аналогичного отношения, измеренного в протон-протонных взаимодействиях при той же энергии. Позже аналогичный эффект был обнаружен и в секторе странных частиц для отношения Λ/K_s . Объяснение экспериментально обнаруженного эффекта, получившего название “барионная аномалия”, требует привлечения отличных от фрагментации механизмов рождения адронов. Существует достаточно широкий спектр теоретических моделей, пытающихся описать обнаруженный эффект и по-разному определяющих доминирующие механизмы рождения. Ряд моделей пытается описать избыточный выход барионов через рекомбинацию структурных кварков, при которой барионы, состоящие из трех кварков, получают большую прибавку к поперечному импульсу по сравнению с мезонами, состоящими только из двух кварков, что и приводит к появлению барионной аномалии [8]. Рекомбинационные сценарии предполагают образование теплового источника партонов, который можно ассоциировать с КПП. Таким образом, успех моделей, привлекающих рекомбинационные механизмы образования частиц, может являться подтверждением факта образования КПП в центральных столкновениях тяжелых ядер на ускорителях RHIC и LHC. Необходимо отметить, что альтернативные модели, отдающие предпочтение гидродинамическим эффектам и развитию потоков для описания барионной аномалии, также имеют право на существование [9]. В последнем случае различие в поведение барионов и мезонов определяется в основном различием в массах частиц. Очевидно, что для дискриминации тех или иных предположений о доминирующих механизмах рождения адронов необходимо провести систематическое измерение свойств различных идентифицированных адронов в области промежуточных поперечных импульсов. При этом основной уклон должен делаться на измерение выходов барионов и мезонов, обладающих схожими массами.

В данной работе в качестве инструмента для изучения свойств плотной и горячей среды, образующейся в центральных столкновениях тяжелых ядер на коллайдере LHC, используются ϕ -мезоны. Данные частицы, как по массе, так и по кварковому составу занимают промежуточное положение между более легкими (u, d) и более тяжелыми (c, b) частицами. Измерение выхода ϕ -мезонов в центральных столкновениях тяжелых ядер и степени его подавления в области больших поперечных импульсов позволит дополнить существующую картину и провести систематическое изучение эффекта гашения струй. Помимо этого, ϕ -мезон, обладающий массой близкой к массе протона, является идеальным кандидатом для изучения барионной аномалии. Тема работы является актуальной, так как она связана с получением новых данных о свойствах ядерной материи в условиях высоких температур,

реализуемых в центральных столкновениях тяжелых ядер при максимальной энергии коллайдера LHC.

Цели работы

Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании особенностей рождения ϕ -мезонов во взаимодействиях ультррелятивистских тяжелых ядер на коллайдере LHC для получения новых данных о механизмах рождения адронов и свойствах ядерной материи в условиях высоких температур и плотностей энергии. Для достижения этой цели в настоящей работе было осуществлено:

1. Измерение спектров рождения ϕ -мезонов по поперечному импульсу в p - p взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ, а также в p -Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ и в Pb-Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ при различной центральности столкновений.

2. Измерение факторов ядерной модификации для ϕ -мезонов в зависимости от поперечного импульса в p -Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ и в Pb-Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ при различной центральности столкновений.

3. Измерение отношений p/ϕ и ϕ/π в различных сталкивающихся системах в зависимости от центральности ядро-ядерных столкновений и поперечного импульса частиц.

4. Интерпретация полученных экспериментальных результатов и их сравнение с предсказаниями теоретических моделей для получения новых данных о механизмах рождения адронов и свойствах среды, образующейся в центральных столкновениях тяжелых ядер.

Все экспериментальные результаты были получены в области малых быстрот ($|y| < 0.5$) с использованием экспериментальной установки ALICE на коллайдере LHC.

Научная новизна результатов работы

Все экспериментальные результаты, полученные при выполнении работы, являются новыми. Результаты для ϕ -мезонов в p - p , p -Pb и Pb-Pb столкновениях были получены при беспрецедентно высоких энергиях взаимодействия, недоступных до запуска в строй коллайдера LHC.

Впервые было измерено рождение ϕ -мезонов в p - p столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ, в p -Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ и в Pb-Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Измерения были выполнены в диапазоне по поперечному импульсу 0.3 - 21 ГэВ/ c . Все предыдущие измерения инвариантных спектров рождения ϕ -мезонов были ограничены 6 - 7 ГэВ/ c . Новые результаты расширяют область измерений до 21 ГэВ/ c и превосходят все ранее полученные результаты по точности в области перекрытия.

Спектры рождения ϕ -мезонов были впервые в мире измерены в области больших поперечных импульсов ($p_T > 7$ ГэВ/с). Это позволило проверить точность пертурбативных расчетов и доступных параметризаций функций фрагментации в p - p столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ, а также получить сведения о факторах ядерной модификации в p -Pb и Pb-Pb взаимодействиях в кинематической области, в которой рождение адронов полностью определяется фрагментацией жестко рассеянных партонов. Показано, что рождение всех адронов, содержащих в своем составе (u, d, s) кварки, одинаково подавлено в области больших поперечных импульсов в центральных столкновениях тяжелых ядер, что свидетельствует о схожести энергетических потерь для партонов различных ароматов.

Высокая точность полученных в работе результатов позволила детально изучить поведение различных идентифицированных адронов в области промежуточных поперечных импульсов и построить отношения p/ϕ и ϕ/π в различных сталкивающихся системах. Это позволило сделать вывод о большем влиянии гидродинамических потоков на спектры рождения адронов, чем ранее считалось, и об отсутствии необходимости в привлечении рекомбинационных моделей для объяснения барионной аномалии.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

При выполнении работы автором была разработана и применена новая методика анализа экспериментальных данных, позволяющая выделять сигналы от распада ϕ -мезонов без идентификации вторичных частиц даже в центральных столкновениях тяжелых ядер, характеризующихся высокой множественностью и огромными уровнями комбинаторных фонов. Разработанная методика нашла свое применение в коллаборации ALICE и после адаптации также может применяться в других экспериментах, таких как CBM (GSI, Германия) или NICA (ОИЯИ, Дубна)

Полученные в диссертационной работе результаты свидетельствуют об образовании чрезвычайно плотной среды в центральных Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ, достаточной чтобы партоны различных ароматов эффективно теряли свою энергию распространяясь в ней. Образующаяся среда является сильносвязанной, т.к. градиенты давления, возникающие при взаимодействии тяжелых ядер, приводят к развитию гидродинамических потоков, во многом определяющих спектры рождения адронов в области малых и промежуточных поперечных импульсов. Полученные экспериментальные результаты требуют своего исчерпывающего теоретического описания для получения новых данных о свойствах КГП и, безусловно, сыграют свою роль в развитии теоретических моделей ядро-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

Личное участие автора

Автор диссертационной работы является членом коллаборации ALICE с 2009 года, принимал непосредственное участие в работе эксперимента и наборе экспериментальных данных в ходе всех циклов его работы.

Автор работы провел полный цикл физического анализа доступных экспериментальных данных, начиная с анализа качества данных для различных детекторных подсистем и заканчивая измерением спектров рождения и факторов ядерной модификации для ϕ -мезонов в различных сталкивающихся системах.

В работах, опубликованных по теме диссертации, вклад автора является определяющим.

Достоверность результатов, изложенных в диссертации

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обусловлена: 1) согласием результатов, полученных с использованием различных методик проведения измерений. Поскольку методики измерения характеризуются различными источниками систематических ошибок, совпадение результатов является достаточным подтверждением правильности проведенных измерений; 2) все представленные в работе результаты были одобрены коллаборацией ALICE; 3) достоверность результатов также подтверждена их апробацией на российских и международных конференциях и достаточным объемом публикаций в реферируемых журналах.

Положения, выносимые на защиту

1. В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

а) Инвариантные спектры рождения ϕ -мезонов по поперечному импульсу в p - p взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ, а также в p -Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ и в Pb-Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ при различной центральности столкновений. Измерения были выполнены в широком диапазоне поперечных импульсов 0.3-21 ГэВ/с.

б) Факторы ядерной модификации для ϕ -мезонов в зависимости от поперечного импульса в p -Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ и в Pb-Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ при различной центральности столкновений.

в) Отношения p/ϕ и ϕ/π в различных сталкивающихся системах в зависимости от центральности ядро-ядерных столкновений и поперечного импульса частиц.

2. Спектр рождения, измеренный для ϕ -мезонов в p - p столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$, хорошо согласуется с предсказаниями генераторов событий Pythia 6 и Phojet в области

больших поперечных импульсов $p_T > 6$ ГэВ/с. В области малых и промежуточных поперечных импульсов согласие ухудшается.

3. Фактор ядерной модификации, измеренный для ϕ -мезонов в p -Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, согласуется с единицей во всей области измерений, свидетельствуя о слабом влиянии эффектов холодной ядерной материи на рождение ϕ -мезонов.

4. При больших значениях поперечного импульса выход ϕ -мезонов существенно подавлен в центральных Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Данный эффект не может быть объяснен эффектами холодной ядерной материи и согласуется с предположением об энергетических потерях жестко рассеянных партонов в плотной и горячей среде, ассоциируемой с КГП.

5. В центральных Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ в области больших поперечных импульсов выходы всех адронов подавлены в равной степени, не зависимо от их массы или кваркового состава. Равное подавление для частиц, содержащих легкие (u, d), промежуточные (s) и тяжелые (c, b) кварки не имеет исчерпывающего объяснения и находится в противоречии с теоретическими предсказаниями о меньших энергетических потерях для более тяжелых кварков.

6. В центральных Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ фактор ядерной модификации для ϕ -мезона при промежуточных значениях поперечного импульса занимает среднее положение между факторами, измеренными для протонов и более легких (π, K) мезонов, ближе к мезонам. При этом отношение p/ϕ практически не зависит от поперечного импульса. В периферийных столкновениях фактор ядерной модификации для ϕ -мезонов начинает совпадать с фактором для протонов, а отношение p/ϕ становится сравнимым с отношением, измеренным в p - p столкновениях. Это свидетельствует о том, что форма спектров рождения для адронов (прежде всего для ϕ -мезонов и протонов) в основном определяется массой частиц, а не их кварковым составом, что согласуется с гидродинамическими расчетами.

7. В центральных p -Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ в области малых значений поперечного импульса отношение p/ϕ практически не зависит от поперечного импульса. Схожесть спектров рождения протонов и ϕ -мезонов в этой области значений поперечных импульсов свидетельствует о возможном проявлении коллективных эффектов в p -Pb столкновениях, которые обычно ожидаются в столкновениях тяжелых ядер.

Содержание и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 120 страниц, 47 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 82 наименования.

Основное содержание работы

Во введении обсуждается актуальность, научная новизна и ценность представляемой работы, цели и задачи, поставленные перед автором, основные положения, выносимые на защиту. Так же введение включает в себя краткое содержание диссертации и основные выводы.

В первой главе приведен краткий обзор экспериментальных результатов в области изучения ядерной материи при больших значениях температуры и плотности энергии, имеющих в мире на момент написания диссертационной работы. Так же в главе обсуждаются теоретические аспекты, необходимые для понимания и интерпретации результатов, полученных в данной работе.

Вторая глава представляет собой краткое описание экспериментальной установки ALICE на коллайдере LHC, с использованием которой были получены основные результаты диссертационной работы. Описаны основные детекторные подсистемы эксперимента ALICE и их характеристики. Более детально описаны элементы установки, которые использовались автором при обработке экспериментальных данных и измерении спектров рождения ϕ мезонов. Показано, что экспериментальная установка ALICE удовлетворяет всем предъявляемым требованиям и позволяет выполнить поставленные задачи при изучении протон-протонных и ядро-ядерных столкновений при энергиях коллайдера LHC.

Третья глава посвящена описанию методики обработки экспериментальных данных, разработанной автором в рамках данной работы для выполнения поставленных задач. Необходимость в разработке новой методики определялась необходимостью измерения выходов ϕ -мезонов в максимально широком диапазоне по поперечному импульсу в условиях беспрецедентно высоких уровней комбинаторного фона, достигаемых в центральных столкновениях тяжелых ядер при энергиях ускорителя LHC.

Восстановление ϕ -мезонов производилось в канале распада на два противоположно заряженных каона: $\phi \rightarrow K^+ K^-$. Треки заряженных частиц восстанавливались с использованием двух основных трековых детекторов эксперимента ALICE: TPC (Time Projection Chamber – время-проекционная камера) и ITS (Inner Tracking System – внутренняя трековая система). Измерение ϕ -мезонов производилось с использованием возможностей экспериментальной установки по идентификации частиц при $p_T < 3$ ГэВ/с и без их использования в области больших поперечных импульсов. Данное разделение было обусловлено тем, что выделение

полезного сигнала в области малых значений поперечного импульса без использования идентификации частиц не представлялось возможным из-за высокого уровня комбинаторного фона. В то же время в области больших поперечных импульсов целесообразность использования идентификации частиц пропадала и приводила только к увеличению систематических ошибок измерений и уменьшению эффективности регистрации частиц. Идентификация частиц производилась с использованием детекторов TPC и TOF (Time Of Flight – время-пролетный детектор). Для улучшения отношения сигнал/фон и отбора треков высокого качества автором были разработаны и оптимизированы критерии отбора треков заряженных частиц с учетом особенностей конкретной изучаемой сталкивающейся системы и рекомендаций экспертов отдельных детекторных систем.

Для измерения сигнала от распада ϕ -мезонов строилось распределение инвариантных масс пар треков противоположного знака – K^+K^- . Полученное распределение пар отобранных для анализа треков противоположного знака содержало, помимо полезного сигнала, комбинаторный фон. Для оценки формы и величины некоррелированного фона от случайных пар треков использовался метод смешивания событий. После вычитания некоррелированного фона распределение инвариантных масс пар треков аппроксимировалось сложной функцией, которая включала в себя свертку функций Брейта-Вигнера (для учета сигнала) и функции Гаусса (для учета массового разрешения детектора) [10]. Кроме того, функция содержала полином второй степени для описания остаточного коррелированного фона. На рисунке 1 представлены примеры распределений инвариантных масс пар треков противоположного знака до и после вычитания комбинаторного фона [2]. На рисунке также представлен пример аппроксимации распределения, полученного после вычитания комбинаторного фона, сложной функцией.

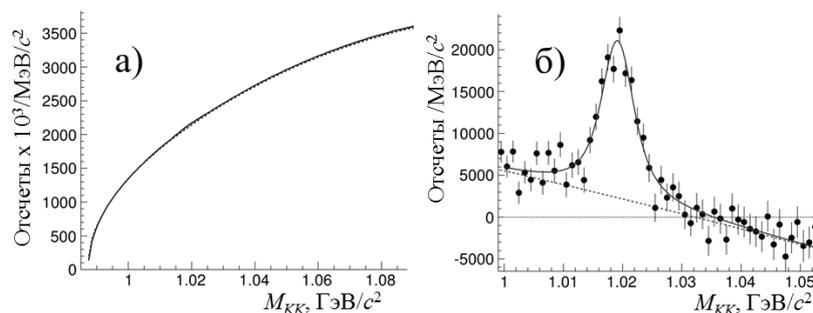


Рисунок 1 - Распределение инвариантных масс пар противоположно заряженных каонов в

Pb-Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ до (а) и после (б) вычитания комбинаторного фона [1]. Черные точки – эксперимент; сплошная линия – аппроксимация распределения сложной функцией, прерывистая – комбинаторный фон, оцененный методом смешивания событий (а) или часть функции, отвечающая за остаточный коррелированный фон (б).

Разработанная методика также включала в себя Монте-Карло моделирование экспериментальной установки с целью определения эффективности восстановления ϕ -мезонов в экспериментальной установке и массового разрешения трековой системы с учетом всех используемых критериев отбора частиц и множественности рождающихся частиц. В качестве генераторов событий использовались программы Pythia для p - p столкновений, HIJING для Pb-Pb и DPMJET для p -Pb. Прохождение сгенерированных частиц через экспериментальную установку моделировалось с использованием программного пакета GEANT3. Все смоделированные методом Монте-Карло данные проверялись на соответствие реальным данным.

Эффективность восстановления ϕ -мезонов для каждого анализируемого промежутка по поперечному импульсу определялась как отношение $N_{\text{рек}}/N_{\text{ген}}$, где $N_{\text{ген}}$ – число сгенерированных ϕ -мезонов в данном промежутке по поперечному импульсу в изучаемом диапазоне значений быстрот, а $N_{\text{рек}}$ – число восстановленных ϕ -мезонов. На рисунке 2 представлена типичная эффективность восстановления ϕ -мезонов в зависимости от поперечного импульса для случая p - p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ.

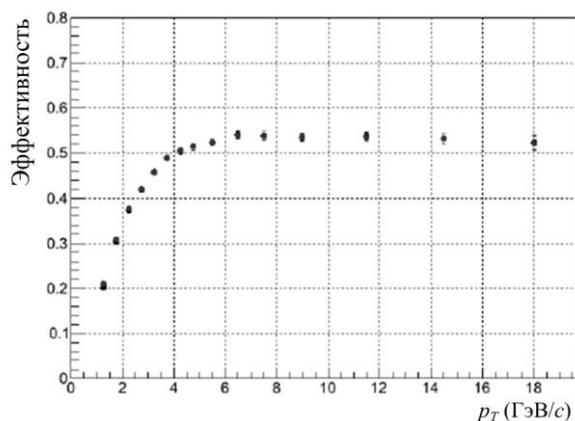


Рисунок 2 - Зависимость эффективности восстановления ϕ -мезонов от поперечного импульса в p - p взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ.

В конце третьей главы подробно описаны основные источники систематических ошибок измерений и представлены результаты оценки их значений. Основной вклад в систематическую погрешность измерений вносит неопределенность в эффективности восстановления треков заряженных частиц детекторами TPC и ITS. Также большой вклад в систематическую ошибку измерений вносит неопределенность в определении выходов ϕ -мезонов из аппроксимации измеренных спектров инвариантной массы двух каонов. Общая систематическая ошибка измерений варьируется в диапазоне от 7 до 17 % в зависимости от изучаемой сталкивающейся системы и диапазона значений поперечного импульса ϕ -мезонов.

Четвертая глава посвящена представлению и обсуждению новых результатов, полученных при выполнении диссертационной работы.

В рамках данной работы были получены инвариантные дифференциальные спектры рождения ϕ -мезонов в p - p столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ, p -Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ и Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ (Рисунок 3) [1-4]. На этом и последующих рисунках вертикальными «усами» обозначены статистические ошибки, прямоугольниками – систематические ошибки измерений. В случае p -Pb и Pb-Pb взаимодействий результаты были получены при различных центральных столкновениях. Все измерения были проведены в широком диапазоне по поперечному импульсу вплоть до 21 ГэВ/с. С использованием полученных результатов были вычислены факторы ядерной модификации для ϕ -мезонов в p -Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ и в Pb-Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ, а также отношения выходов ϕ -мезонов к выходам протонов и заряженных пионов как функции поперечного импульса в различных сталкивающихся системах при различных энергиях столкновения.

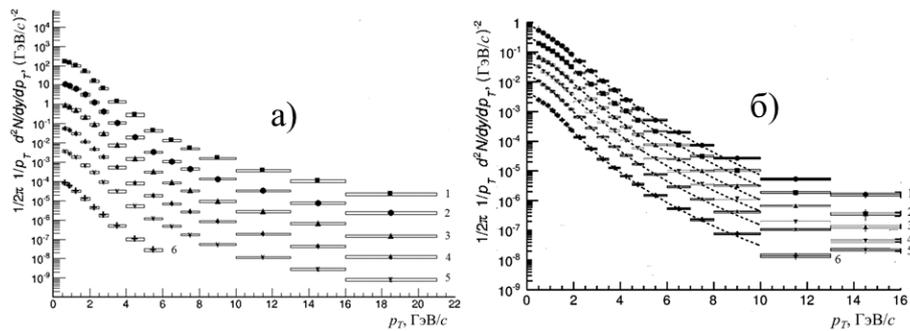


Рисунок 3 - инвариантные спектры рождения $\phi \rightarrow K^+ K^-$ мезонов, измеренные в Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ (а) и в p -Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ (б) [1-4]. Для наглядности спектры для разных диапазонов по центральности столкновений отмасштабированы на разные множители (Pb-Pb: 1) 0-5% - 10^2 , 2) 10-20% - 10^1 , 3) 20-30% - 10^0 , 4) 30-40% - 10^{-1} , 5) 40-50% - 10^{-2} , 6) 60-80% - 10^{-3} ; p -Pb: 1) 0-5% - 10, 2) 5-10% - 5, 3) 10-20% - 2, 4) 20-40% - 1, 5) 40-60% - 0.5, 6) 60-80% - 0.2). На этом и последующих рисунках вертикальными «усами» обозначены статистические ошибки, прямоугольниками – систематические ошибки измерений.

На рисунке 4 представлены факторы ядерной модификаций как функция поперечного импульса для ϕ -мезонов в сравнении с имеющимися результатами для других идентифицированных адронов в Pb-Pb соударениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ в наиболее центральных столкновениях (а) и в p -Pb соударениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ в событиях без отбора по центральности (б) [2-4, 11]. В центральных Pb-Pb столкновениях при больших

значениях поперечного импульса выход ϕ -мезонов испытывает сильное подавление по отношению к p - p взаимодействиям. При этом степень подавления выходов ϕ -мезонов совпадает с степенью подавления для других идентифицированных адронов. Данное подавление не может быть объяснено эффектами начального состояния (рисунок 4 б). Таким образом, наблюдаемое подавление относится к эффектам конечного состояния и может быть объяснено энергетическими потерями партонов, распространяющихся в плотной цветовой среде. Следует также отметить, что в области промежуточных значений поперечного импульса в p -Pb взаимодействиях наблюдается эффект Кронина, ярко выраженный для барионов и слабо выраженный для мезонов [12].

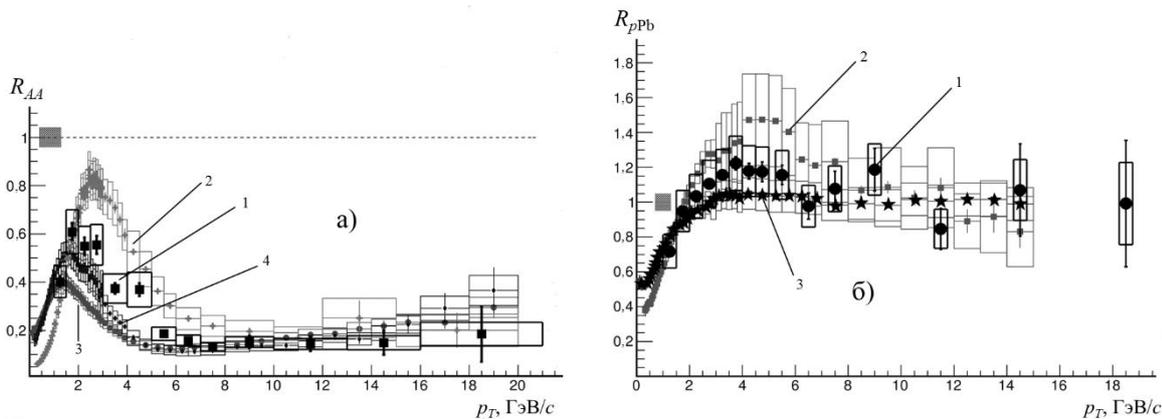


Рисунок 4 - Зависимости факторов ядерной модификации для ϕ -мезонов (1) от поперечного импульса в сравнении с другими адронами (2 – протоны; 3, 4 – заряженные пионы каоны) в Pb-Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ для центральности столкновения 0-5 % (а) и в p -Pb взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ для центральности столкновения 0-100 % (б) [2-4, 11].

На рисунке 5 представлено отношение выходов $(p+\bar{p})$ к выходам ϕ -мезонов в зависимости от поперечного импульса, полученные в Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ при различных центральностях столкновения [2]. В наиболее центральных Pb-Pb столкновениях в диапазоне значений поперечного импульса $p_T < 4$ ГэВ/с отношение p/ϕ не зависит от величины поперечного импульса p_T . Подобное наблюдение говорит о схожести форм спектров рождения этих близких по массе, но различных по кварковому составу частиц, что согласуется с гидродинамическими моделями рождения частиц. Следует отметить, что схожий эффект также наблюдается в центральных p -Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ при $0 < p_T < 1.5-2$ ГэВ/с. Данное наблюдение может свидетельствовать о проявлении коллективных эффектов в столкновениях легких и тяжелых ядер, что обычно ожидается только в случае столкновения тяжелых ядер. В области больших значений поперечного

импульса отношение p/ϕ в Pb-Pb взаимодействиях стремится к значениям этого отношения для случая p - p столкновений (рисунок 5 б).

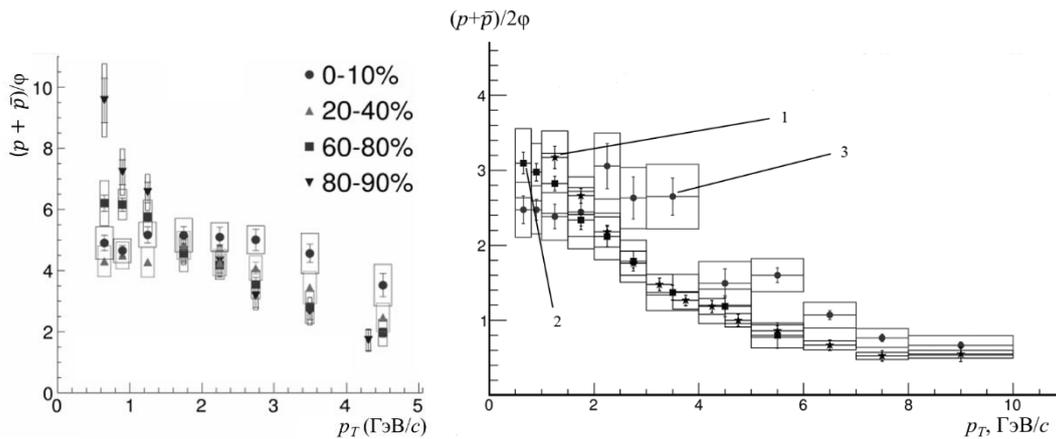


Рисунок 5 - Зависимость отношения выходов протонов и ϕ -мезонов от поперечного импульса в Pb-Pb взаимодействиях с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ [1]. Центральности столкновений ядер: (а) - 0-10 % (●), 20-40 % (▲), 60-80 % (■) и 80-90 % (▼); (б) – 0-5 % (3), 60-80% (2). Так же на рисунке (б) добавлено отношение в p - p при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ (1).

В **заключении** сформулированы основные **выводы** по результатам, полученным автором в рамках данной работы:

1) Полученные в данной работе результаты по изучению процессов рождения ϕ -мезонов в p - p , p -Pb и Pb-Pb столкновениях не имеют аналогов в мире. Впервые рождение ϕ -мезонов было измерено в области больших поперечных импульсов $p_T > 7$ ГэВ/с. Полученные результаты вносят значительный вклад в изучение свойств плотной и горячей среды (КГП), предположительно образующейся в столкновениях тяжелых ядер.

2) Спектр рождения ϕ -мезонов, полученный в p - p взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ хорошо согласуется с теоретическими моделями в области больших значений поперечного импульса. В то же время в области малых значений поперечного импульса данные модели не могут описать полученные экспериментальные результаты и нуждаются в уточнении.

3) Отношение выходов протонов к выходам ϕ -мезонов в центральных Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ выходит на плато в области $0 < p_T < 4-5$ ГэВ/с. Данный результат говорит о схожести форм спектров рождения этих частиц. Данное наблюдение указывает на зависимость форм спектров рождения частиц от массы, что согласуется с гидродинамическими подходами к описанию процессов рождения частиц.

4) Отношение выходов протонов к выходам ϕ -мезонов в центральных p -Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ выходит на плато в области $0 < p_T < 1.5-2$ ГэВ/с.

Наблюдение подобного эффекта в p -Pb столкновениях в данной области импульсов может свидетельствовать о наличии коллективных эффектов, обычно ожидаемых в случае столкновения тяжелых ядер, в p -Pb столкновениях.

5) Измерение факторов ядерной модификации для ϕ -мезонов в p -Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ показало, что выход ϕ -мезонов не испытывает подавления при больших значениях поперечного импульса по сравнению с элементарными p - p взаимодействиями, что согласуется с результатами, полученными для других идентифицированных адронов. В области промежуточных значений поперечного импульса наблюдается незначительный избыток выхода ϕ -мезонов. Сравнение полученных в данной работе результатов с результатами, полученными для ϕ -мезонов в области больших значений быстрот, демонстрирует сильную зависимость факторов ядерной модификации от быстроты, что может быть объяснено эффектами экранировки и антиэкранировки структурных функций.

6) Результаты, полученные в данной работе, демонстрируют сильное подавление выхода ϕ -мезонов в области больших значений поперечного импульса в центральных Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Данное подавление не может быть объяснено эффектами начального состояния, так как не наблюдается в случае p -Pb столкновений, и может свидетельствовать об образовании КГП. Также, как уже отмечалось ранее (см. пункт 1.3), экспериментально было обнаружено равное подавление для частиц, содержащих легкие и тяжелые кварки, что противоречит предположению, что более тяжелые кварки должны менее интенсивно терять энергию при прохождении через плотную, цветозаряженную среду, и тем самым их выход должен быть менее подавленным, чем выход адронов, содержащих легкие кварки [82]. Результаты, полученные в данной работе, продемонстрировали, что при больших значениях поперечного импульса выходы ϕ -мезонов, содержащие s -кварк (который занимает промежуточное значение по массе между легкими и тяжелыми кварками), подавлены в равной степени, как и выходы частиц, содержащих легкие и тяжелые кварки. Данное наблюдение лишь подтверждает массовую независимость степени подавления выходов адронов при больших значениях поперечного импульса в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер.

7) Результаты, полученные для ϕ -мезонов и протонов в Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, демонстрируют сходство процессов рождения частиц с близкой по значению массой. Данные выводы согласуются с предсказаниями гидродинамических моделей. Важным аспектом полученных результатов является то, что они могут быть качественно объяснены развитием коллективного радиального потока и не требуют привлечения рекомбинационных моделей.

Публикации и апробация работы

По результатам работы было опубликовано 4 печатные работы в журналах, реферируемых ВАК. Автором были представлены результаты на международной конференции Quark Matter 2014 (Дармштадт, Германия), на международной конференции XIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum (Санкт-Петербург, Россия) и на международной конференции «ЯДРО 2014» (Дубна, Россия). Результаты работы также неоднократно обсуждались на семинарах международной коллаборации ALICE в CERN и на семинарах ОФВЭ ПИЯФ.

Публикации автора

1. **Malaev, M.** $K^*(892)^0$ and $\phi(1020)$ production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV / M. Malaev, V. Abelev, Ja. Adam [et al.] // Phys. Rev. C. – 2015. – Vol. 91. – Pp. 024609-024634.
2. **Малаев, М.** Факторы ядерной модификации ϕ -мезонов при столкновении ядер свинца в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере / М. Малаев, В. Рябов, Ю. Рябов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – Т. 218. – № 2. – С. 99-109.
3. **Малаев, М.** Факторы ядерной модификации ϕ -мезонов во взаимодействиях протонов с ядрами свинца в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере / М. Малаев, В. Рябов, Ю. Рябов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – Т. 218. – № 2. – С. 110-117.
4. **Malaev, M.** Measuring nuclear modification factors for ϕ -mesons in p +Pb and Pb+Pb collisions in the ALICE experiment at the Large Hadron collider / M. Malaev, V. Riabov, Yu. Ryabov, V. Samsonov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. – 2015. – Vol. 79. – No. 7. – Pp. 909-911.

Список литературы

5. **Adler, S.S.** Suppressed π^0 production at large transverse momentum in central Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV / S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 91. – Pp. 072301–072307.
6. **Adler, S.S.** Centrality dependence of direct photon production in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions / S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94. – Pp. 232301–232306.
7. **Adler, S.S.** Scaling properties of proton and anti-proton production in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au + Au collisions / S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 91. – Pp. 172301–172307.

8. **Greco, V.**, Parton Coalescence and the Antiproton/Pion Anomaly at RHIC / V. Greco, C. Ko, P. Levai // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 90. – Pp. 202302–202306.
9. **Shen, C.** Radial and elliptic flow in Pb+Pb collisions at the Large Hadron Collider from viscous hydrodynamics / C. Shen, U. Heinz, P. Huovinen, H. Song // Phys. Rev. C. – 2011. – Vol. 84. – Pp. 044903-044915.
10. **Beringer, J.** Review of Particle Physics / J. Beringer, J.F. Arguin, R.M. Barnett [et al.] // Phys. Rev. D. – 2012. – Vol. 86. – Pp. 1-1528.
11. **Abelev, B.** Production of charged pions, kaons and protons at large transverse momenta in p-p and Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV / B. Abelev, Ja. Adam, D. Adamova [et al.] // Phys. Lett. B. – 2014. – Vol. 736. – Pp. 196-207.
12. **Cronin, J.** Production of hadrons at large transverse momentum at 200, 300 and 400 GeV / J. Cronin // Phys. Rev. D. – 1975. – Vol. 11. – Pp. 3105–3123.