

на правах рукописи

Котов Дмитрий Олегович

**Рождение  $\phi$ -мезонов в  $p+p$ ,  $d+Au$ ,  $Cu+Cu$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  и  $200$  ГэВ в эксперименте ФЕНИКС**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего и профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Бердников Ярослав Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
**Водопьянов Александр Сергеевич**  
кандидат физико-математических наук,  
**Феофилов Григорий Александрович**

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»

Защита состоится «20» октября 2010 г. в 17 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, II уч. корп., ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан «    » сентября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.29

кандидат физико-математических наук

доцент

Ермакова Н.Ю.

## Актуальность работы.

Столкновение тяжелых ядер при больших энергиях взаимодействия является уникальной возможностью для создания и изучения кварк-глюонной плазмы (КГП) в лабораторных условиях. В условиях экстремально больших плотностей энергии и температуры ( $\epsilon \approx 1$  ГэВ/фм<sup>3</sup>,  $T \approx 170$  МэВ), расчеты квантовой хромодинамики (КХД) на решетке предсказывают фазовый переход бесцветной адронной материи в состояние КГП. Экспериментальное наблюдение КГП имеет важное значение для развития КХД и космологии. Считается, что в первые микросекунды после Большого Взрыва, Вселенная находилась в состоянии КГП.

В течение последних нескольких лет основным ускорителем для изучения взаимодействий тяжелых ядер является релятивистский коллайдер тяжелых ионов (RHIC) в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (БНЛ), США. Уже первые эксперименты на коллайдере RHIC показали, что плотность энергии, достигаемая в столкновениях тяжелых ядер при максимальной энергии коллайдера RHIC ( $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ), превышает величину необходимую для фазового перехода. Физические результаты, полученные к 2005 году, позволили всем коллаборациям на RHIC сделать заявление об обнаружении сильно взаимодействующей КГП. В настоящее время исследования на коллайдере RHIC направлены на то, чтобы более детально изучить данное состояние ядерной материи и в сообществе с теоретиками получить его численное описание. Одним из признаков образования КГП на RHIC стало обнаружение сильного подавления выхода адронов в центральных столкновениях тяжелых ядер. Перед запуском RHIC в ряде теоретических работ предсказывалось, что высокоэнергетичные партоны, проходя через среду с большой плотностью цветовых зарядов, образующуюся в столкновениях тяжелых ионов, будут терять часть своей энергии. Энергетические потери должны приводить к уменьшению выходов частиц, рождающихся в результате фрагментации жестко рассеянных партонов. Данный эффект получил название эффекта гашения струй и впервые был обнаружен в центральных Au+Au

столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  ГэВ. Выходы  $\pi^0$ -мезонов, состоящих из легких  $u$  и  $d$  кварков, в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5.0$  ГэВ/с) оказались подавлены пятикратно по сравнению с элементарными протон-протонными ( $p+p$ ) столкновениями. Такая же степень подавления была обнаружена и для электронов от лептонных распадов мезонов, содержащих тяжелые  $c$  и  $b$  кварки.

Другим важным наблюдением, сделанным на RHIC, стало обнаружение избыточного выхода барионов в области промежуточных поперечных импульсов ( $2.0 \text{ ГэВ/с} < p_T < 5.0 \text{ ГэВ/с}$ ). Так, величины отношений  $p/\pi$  и  $\bar{p}/\pi$  в несколько раз превышали соответствующие значения, измеренные в  $p+p$  взаимодействиях. Столь существенное различие в степени подавления барионов и мезонов получило название «барионной загадки» и указывало на наличие дополнительных механизмов рождения частиц, отличных от жесткого рассеяния и фрагментации партонов. При этом остается неясным, связано ли различие в поведении барионов и мезонов в данной области импульсов с различием в массах частиц или их кварковых составах.

Для дальнейшего изучения особенностей рождения адронов в области промежуточных и больших поперечных импульсов в зависимости от их массы и кварковых составов удобно использовать  $\phi$ -мезон, так как он обладает массой сравнимой с массой протона (бариона), но при этом состоит из двух ( $s\bar{s}$ ) кварков.

При более низких энергиях взаимодействия ядер  $\sqrt{s_{NN}} < 30$  ГэВ (синхротроны SPS и AGS в ЦЕРНе и БНЛ), образование КГП однозначно не было зафиксировано, что может быть связано с недостаточным временем существования образующейся среды или с недостаточным её размером. Для теоретиков и экспериментаторов представляет особый интерес, как ведут себя сигнатуры образования КГП при промежуточных энергиях столкновения ядер. С этой целью на RHIC был проведен физический цикл работ при энергии взаимодействия ядер  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ. Исследование рождения  $\phi$ -мезонов при

этой энергии взаимодействия тяжелых ядер является важным элементом физической программы исследований КГП.

Тема настоящей диссертации является актуальной, так как она связана с изучением свойств ядерной материи в условиях высоких плотностей энергии через измерение рождения  $\phi$ -мезонов в столкновениях тяжелых ядер.

### **Цель и задачи диссертационной работы.**

Целью диссертационной работы является изучение свойств ядерной материи в условиях больших плотностей энергии, достаточных для образования КГП, на основе исследования особенностей рождения  $\phi$ -мезонов в ядро-ядерных ( $A+A$ ) взаимодействиях.

Задачи диссертационной работы заключаются в измерении и физической интерпретации инвариантных спектров рождения по поперечному импульсу и факторов ядерной модификации  $R_{AA}$  для  $\phi$ -мезонов в  $p+p$ ,  $d+Au$ ,  $Cu+Cu$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  и  $200$  ГэВ.

### **Научная новизна результатов работы.**

В диссертационной работе автором впервые получены новые результаты об инвариантных спектрах рождения по поперечному импульсу и факторах ядерной модификации  $R_{AA}$  для  $\phi$ -мезонов в  $d+Au$  и  $Cu+Cu$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и  $p+p$ ,  $Cu+Cu$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ. Новые результаты, полученные автором при изучении  $d+Au$  и  $Cu+Cu$  столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, по точности и диапазону измерений не имеют аналогов в мире.

### **Личное участие автора.**

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в экспертной поддержке эксперимента ФЕНИКС, наборе экспериментальных данных и их физическом анализе с целью измерения инвариантных спектров

рождения по поперечному импульсу и факторов ядерной модификации  $\phi$ -мезонов в столкновениях тяжелых ядер.

Автор является участником совместной физической группы сотрудников “Лаборатории релятивистской ядерной физики” ОФВЭ ПИЯФ РАН и кафедры “Экспериментальной ядерной физики” ГОУ ВПО СПбГПУ в коллаборации ФЕНИКС. В работах, которые были опубликованы по теме диссертации, вклад автора является определяющим.

### **Достоверность результатов, изложенных в диссертации.**

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обусловлена согласием результатов, полученных: 1) с использованием различных методик проведения измерений, 2) а также с использованием данных различных циклов работы коллайдера RHIC и эксперимента ФЕНИКС. Поскольку методики измерения характеризуются различными источниками систематических ошибок, совпадение результатов является достаточным подтверждением правильности проведенных измерений. Достоверность результатов также подтверждена их апробацией на российских и международных конференциях и достаточным объемом публикаций в реферируемых журналах.

### **Практическая значимость результатов работы.**

Новые результаты, полученные автором в диссертационной работе, показывают, что в  $\text{Cu}+\text{Cu}$  и  $\text{Au}+\text{Au}$  столкновениях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  и 200 ГэВ в области промежуточных поперечных импульсов рождение адронов не описывается жестким рассеянием и фрагментацией партонов, что позволяет успешно описать процессы рождения адронов в элементарных  $p+p$  столкновениях. Результаты по измерению факторов ядерной модификации для  $\phi$ -мезонов в  $\text{Cu}+\text{Cu}$  и  $\text{Au}+\text{Au}$  столкновениях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  и 200 ГэВ для своего объяснения требуют введения дополнительных механизмов рождения адронов отличных от фрагментации. Результаты качественно

согласуются с рекомбинационными моделями, предполагающими образование КПП в столкновениях тяжелых ядер на RHIC. Тем не менее, полученные результаты не имеют полного теоретического описания, что указывает на отсутствие исчерпывающего понимания процессов, происходящих во взаимодействиях тяжелых ядер, и говорит о необходимости дальнейшего развития теоретических моделей.

Разработанные методики анализа экспериментальных данных широко используются в коллаборации ФЕНИКС (ПИЯФ, ОВФЭ, СПбГПУ) и будут адаптированы и применены при анализе экспериментальных данных экспериментов АЛИСА, АТЛАС (LHC) и СБМ (FAIR).

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. В диссертационной работе получены следующие новые физические результаты:
  - Инвариантные спектры рождения  $\phi$ -мезонов по поперечному импульсу в  $d+Au$  и  $Cu+Cu$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и в  $p+p$ ,  $Cu+Cu$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ.
  - Факторы ядерной модификации для  $\phi$ -мезонов в  $d+Au$  и  $Cu+Cu$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и в  $Cu+Cu$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ.
2. Новые результаты, полученные в  $Cu+Cu$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, показали, что выход  $\phi$ -мезонов в центральных столкновениях ядер меди в области больших поперечных импульсов подавлен в 1.5 раза, что сравнимо со степенью подавления выхода более легких  $\pi^0$ -мезонов. В области промежуточных поперечных импульсов выход  $\phi$ -мезонов подавлен в меньшей степени, чем выход легких  $\pi^0$ -мезонов, но существенно сильнее, чем выход протонов. Данное

наблюдение качественно согласуется с измерениями, ранее выполненными в Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

3. В случае равного числа нуклонов, участвующих во взаимодействии ядер при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, новые результаты по рождению  $\phi$ -мезонов, полученные в данной работе при изучении Cu+Cu столкновений, согласуются с результатами, полученными ранее при изучении Au+Au столкновений. Данный факт говорит о том, что, в среднем по азимутальному углу, степень подавления выхода  $\phi$ -мезонов не зависит от особенностей геометрии перекрытия ядер.
4. Высокая точность новых измерений, выполненных в данной работе для  $\phi$ -мезонов в  $d$ +Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, позволяет утверждать, что разница в степенях подавления выходов легких  $\pi^0$ -мезонов и  $\phi$ -мезонов, а также мезонов и протонов, обнаруженная в Cu+Cu столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и ранее измеренная в Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, не может быть объяснена эффектами, возникающими в начальном состоянии. Качественно эффект может быть объяснен при привлечении рекомбинационных моделей, учитывающих рекомбинацию ливневых и тепловых кварков. Данные модели подразумевают наличие теплового источника партонов, который может быть идентифицирован с КГП.
5. Сравнение новых данных о факторах ядерной модификации, полученных в настоящей работе для  $\phi$ -мезонов в Cu+Cu и Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ с существующими данными для  $\pi^0$ -мезонов и протонов показало, что их поведение в области промежуточных поперечных импульсов, качественно согласуется с наблюдаемым в  $A+A$  столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Данный факт может указывать на образование источника тепловых партонов (КГП) в



столкновениях тяжелых ядер и при более низкой энергии взаимодействия ядер  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ.

### **Публикации и апробация работы.**

По результатам диссертации опубликовано 3 печатные работы в журнале из перечня ВАК («Научно-технические ведомости СПбГПУ»). Список работ приведен в конце автореферата. Результаты работы обсуждались автором на семинарах международной коллаборации ФЕНИКС в БНЛ, США, семинарах ОВФЭ ПИЯФ и кафедры ЭЯФ СПбГПУ. Автор представлял результаты диссертационной работы от имени коллаборации ФЕНИКС на научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, Россия, 2009 г.), VII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (Харьков, Украина, 2010 г.), LX Международной конференции «Ядро 2010» (С.-Петербург, 2010 г.).

### **Содержание и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы. Объем диссертации составляет 114 стр., 49 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 92 наименования.

### **Краткое содержание работы.**

**Во введении** обоснована актуальность проведенного исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, отражены научная новизна, практическая ценность полученных результатов, степень их достоверности и личный вклад автора. Представлены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание разделов диссертации.

**Первая глава** отведена под литературный обзор существующих теоретических подходов для описания механизмов рождения частиц в  $A+A$  взаимодействиях в области больших и промежуточных поперечных импульсов.

**Во второй главе** представлено описание экспериментальной установки ФЕНИКС с указанием основных детекторных подсистем и их характеристик. Приведена методика определения импульса заряженных частиц, описаны возможности времяпролетной системы спектрометра ФЕНИКС для идентификации заряженных адронов.

**Третья глава** посвящена описанию методик обработки экспериментальных данных. Выделение сигнала  $\phi$ -мезонов в спектре инвариантной массы двух  $K$ -мезонов производилось либо без идентификации частиц, либо с идентификацией одного  $K$ -мезона времяпролетной системой. Использование идентификации каонов позволяет эффективно выделять сигнал в условиях высокого уровня комбинаторного фона в области малых и промежуточных поперечных импульсов. В области больших поперечных импульсов, ввиду низкого уровня комбинаторного фона, выделение пиков, соответствующих распадам  $\phi$ -мезонов, становится возможным без идентификации каонов.

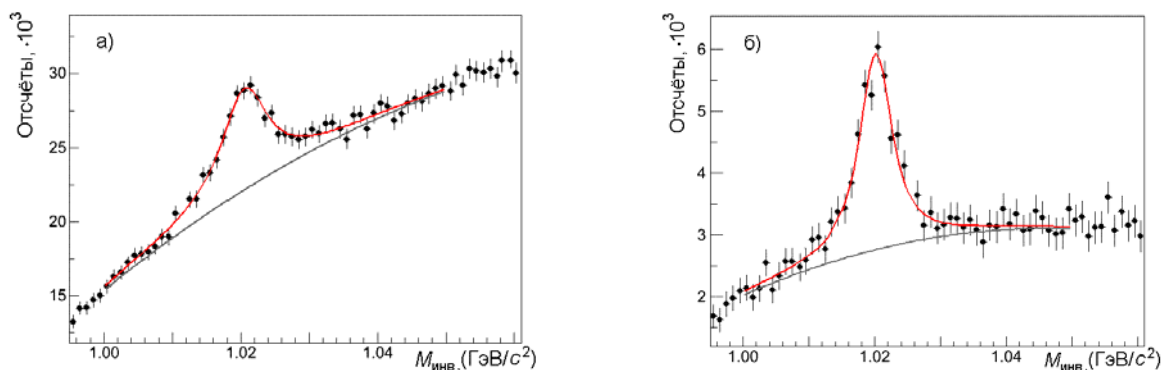


Рисунок 1 – Аппроксимация распределения по инвариантной массе двух каонов, полученного без идентификации частиц (а) [2] и с идентификацией одного каона (б) [2]. Для описания формы пика  $\phi$ -мезона используется свертка функций Брейта-Вигнера [8] и Гаусса. Полином второй степени используется для описания фона.

Выход  $\phi$ -мезонов определялся путем аппроксимации спектра инвариантной массы (после вычитания комбинаторного фона) полиномом второй степени и функцией Брейта-Вигнера [8], свернутой с распределением Гаусса. Полином использовался для описания остаточного фона. Свертка функции Брейта-Вигнера [8] и Гаусса предназначена для описания формы пика

φ-мезона с учетом массового разрешения спектрометра ФЕНИКС. Примеры аппроксимации распределений по инвариантной массе, полученных двумя методиками в одном и том же интервале по поперечному импульсу в Cu+Cu взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ, представлены на рисунке 1.

В заключение третьей главы описана методика оценки эффективности регистрации φ-мезонов с учетом акцептансов и известных характеристик детекторных подсистем эксперимента ФЕНИКС на основе полного Монте-Карло моделирования экспериментальной установки.

**Четвертая глава** диссертации отведена для обсуждения новых физических результатов, полученных в ходе выполнения работы. Коллективные ядерные эффекты в  $A+A$  взаимодействиях изучались с помощью параметра  $R_{AA}$ , получившего название фактора ядерной модификации и равного:  $R_{AA}(p_T) = dN_{AA} / (\langle N_{\text{столкн}} \rangle \times dN_{pp})$ . Здесь  $dN_{AA}(dN_{pp})$  – выход частиц в  $A+A$  ( $p+p$ ) столкновениях в заданном интервале по поперечному импульсу, а  $\langle N_{\text{столкн}} \rangle$  – число парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений, вычисляемое на основе модели Глаубера [9]. В условиях отсутствия коллективных эффектов,  $A+A$  взаимодействия в области больших поперечных импульсов являются суперпозицией  $p+p$  столкновений ( $R_{AA} \approx 1$ ). В противном случае факторы ядерной модификации могут принимать значения отличные от единицы, что говорит о подавлении или избытке выхода частиц.

На рисунке 2 представлено сравнение факторов ядерной модификации  $R_{dA}$ , измеренных в настоящей работе для φ-мезонов [3], и ранее измеренных для  $\pi^0$ -мезонов [10] и протонов [10] в центральных и периферийных  $d+Au$  столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

Здесь и далее вертикальные прямоугольники вблизи оси ординат соответствуют величине неопределенности в определении числа  $\langle N_{\text{столкн}} \rangle$ . В центральных  $d+Au$  столкновениях в области промежуточных поперечных импульсов наблюдается избыточный выход адронов (эффект Кронина), который одинаков для мезонов (~15%) и существенно больше для барионов

(~50%). Избыток выхода частиц уменьшается при переходе от центральных столкновений к периферийным.

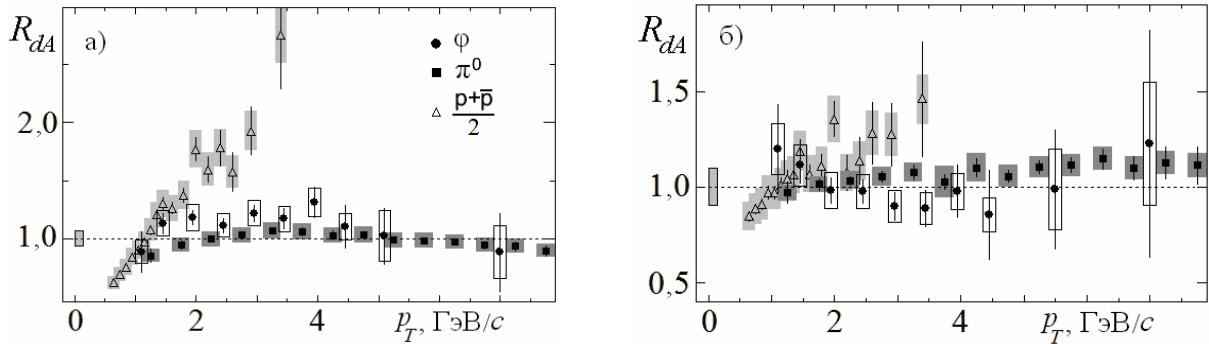


Рисунок 2 – Зависимости факторов ядерной модификации  $R_{dA}$  от поперечного импульса  $p_T$   $\phi$ -мезонов [3],  $\pi^0$ -мезонов [10] и протонов [10] в центральных (а) и периферийных (б)  $d+Au$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

На рисунке 3 представлено сравнение факторов ядерной модификации  $R_{AA}$ , измеренных в настоящей работе для  $\phi$ -мезонов [1], и ранее измеренных для  $\pi^0$ -мезонов [11], каонов [12] и протонов [12] в центральных  $Cu+Cu$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

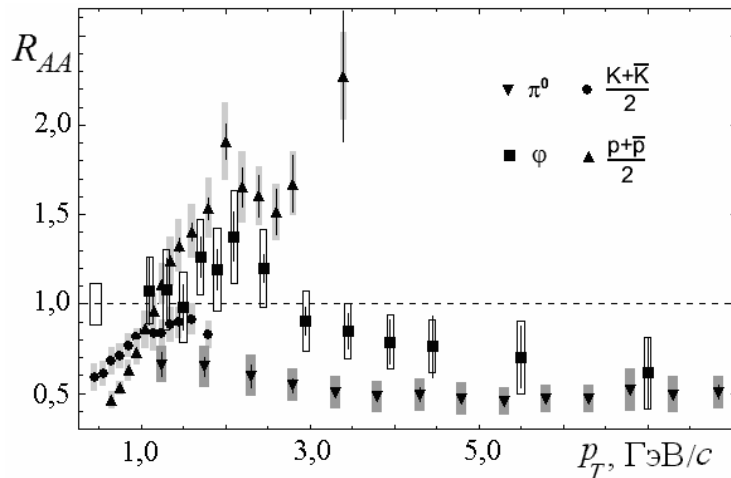


Рисунок 3 – Зависимости факторов ядерной модификации  $R_{AA}$  от поперечного импульса  $p_T$   $\pi^0$ -мезонов [11], каонов [12], протонов [12] и  $\phi$ -мезонов [1] в центральных  $Cu+Cu$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

На рисунке 4 представлено сравнение факторов ядерной модификации  $R_{AA}$ , измеренных в настоящей работе для  $\phi$ -мезонов [2] в центральных  $Cu+Cu$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ со значениями факторов  $R_{AA}$ , полученными ранее для  $\pi^0$ -мезонов [11, 13] и протонов [12].

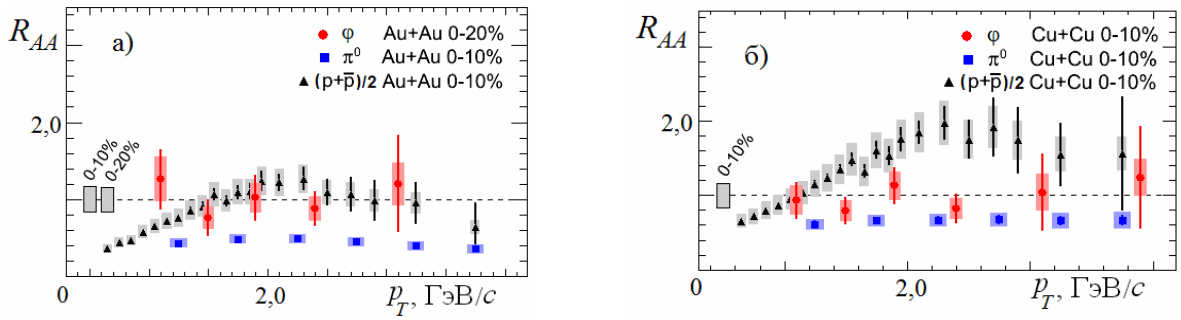


Рисунок 4 – Зависимости факторов ядерной модификации  $R_{AA}$  от поперечного импульса  $p_T$   $\phi$ -мезонов [2],  $\pi^0$ -мезонов [11, 13] и протонов [12] в центральных Au+Au (а) и Cu+Cu (б) взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ.

В центральных Cu+Cu столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ (рис. 3) в области промежуточных поперечных импульсов степень подавления выхода  $\phi$ -мезонов [1] занимает промежуточное положение между степенями подавления  $\pi^0$ -мезонов [11] и протонов [12]. Различие в факторах ядерной модификации, обнаруженное в Cu+Cu столкновениях не может быть полностью объяснено эффектом Кронина, поскольку оно существенно превышает разницу в величине избытка выходов мезонов и барионов (рис.2). Качественно эффект может быть объяснен при привлечении рекомбинационных моделей, учитывающих рекомбинацию ливневых и тепловых кварков. Данные модели подразумевают наличие теплового источника партонов, который может быть идентифицирован с КГП. Новые результаты о факторах ядерной модификации, полученные для  $\phi$ -мезонов в Cu+Cu и Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ (рис. 4), в совокупности с имеющимися данными для  $\pi^0$ -мезонов [11, 13] и протонов [12], качественно согласуются с измерениями в Cu+Cu и Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Данный факт может указывать на образование КГП в столкновениях тяжелых ядер и при более низкой энергии взаимодействия ядер  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ.

## Выводы.

1. Выход  $\phi$ -мезонов в центральных Cu+Cu столкновениях в области больших поперечных импульсов подавлен в 1.5 раза, что сравнимо со

степенью подавления выхода более легких  $\pi^0$ -мезонов. В области промежуточных поперечных импульсов выход  $\phi$ -мезонов подавлен в меньшей степени, чем выход легких  $\pi^0$ -мезонов, но существенно сильнее, чем выход протонов. Данное наблюдение качественно согласуется с измерениями, ранее выполненными в Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

2. В случае равного числа нуклонов, участвующих во взаимодействии ядер при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, новые результаты по рождению  $\phi$ -мезонов, полученные при изучении Cu+Cu столкновений, согласуются с результатами, полученными ранее при изучении Au+Au столкновений. Данный факт говорит о том, что, в среднем по азимутальному углу, степень подавления выхода  $\phi$ -мезонов не зависит от особенностей геометрии перекрытия ядер.
3. Новые результаты, полученные для факторов ядерной модификации  $\phi$ -мезонов в  $d$ +Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, позволили с высокой точностью установить, что величина избытка выхода  $\phi$ -мезонов (эффект Кронина) совпадает с величиной избытка выхода ранее измеренной для  $\pi^0$ -мезонов ( $\sim 15\%$ ) и отличается от величины того же эффекта, измеренного ранее для протонов ( $\sim 50\%$ ). Данное наблюдение устанавливает, что различие в факторах ядерной модификации для  $\pi^0$  и  $\phi$ -мезонов, мезонов и барионов, обнаруженное в Cu+Cu столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и ранее измеренное в Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ не может быть полностью объяснено эффектом Кронина и связано с образованием плотной и горячей среды в столкновениях тяжелых ядер при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
4. Поведение факторов ядерной модификации, измеренных в данной работе для  $\phi$ -мезонов в Cu+Cu и Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  ГэВ, а также  $\pi^0$ -мезонов и протонов, измеренных ранее, качественно

согласуется с наблюдаемым в Cu+Cu и Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

5. Различие в степенях подавления выходов  $\pi^0$ ,  $\phi$ -мезонов и протонов в Cu+Cu и Au+Au столкновениях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  и 200 ГэВ не имеет исчерпывающего теоретического описания. Качественно эффект может быть объяснен при привлечении рекомбинационных моделей, учитывающих рекомбинацию ливневых и тепловых кварков. Данные модели подразумевают наличие теплового источника партонов, который может быть идентифицирован с кварк-глюонной плазмой.

### **Публикации автора.**

1. **Котов, Д.О.** Рождение  $\phi$ -мезонов в столкновениях ядер меди при энергии 200 ГэВ [Текст] / Д.О. Котов, Я.А. Бердников, В.Г. Рябов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – №4(88). – С. 57–62.
2. **Котов, Д.О.** Рождение  $\phi$ -мезонов в столкновениях релятивистских протонов, ядер меди и ядер золота при энергии 62.4 ГэВ [Текст] / Д.О. Котов, Я.А. Бердников, В.Г. Рябов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – №1(94). – С. 103–109.
3. **Котов, Д.О.** Рождение  $\phi$ -мезонов в столкновениях ядер дейтерия и ядер золота при энергии 200 ГэВ [Текст] / Д.О. Котов, Я.А. Бердников, В.Г. Рябов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – №2(98). – С. 135–140.
4. **Kotov, D.O.** Phi-meson production in copper nuclei collisions at 200 GeV in PHENIX experiment [Text] / Ya.A. Berdnikov, D.O. Kotov, V.G. Riabov [et. al.] // Book of abstracts “LX international conference of nuclear physics – Nucleus 2010”, July 6-9, 2010, Saint-Petersburg. – 2010. – P. 146.
5. **Kotov, D.O.** Phi-meson production in heavy ion collisions at 62.4 GeV in PHENIX experiment [Text] / Ya.A. Berdnikov, D.O. Kotov, V.G. Riabov [et.

- al.] // Book of abstracts “LX international conference of nuclear physics – Nucleus 2010”, July 6-9, 2010, Saint-Petersburg. – 2010. – P. 147.
6. **Котов Д.О.** Подавление выходов лёгких адронов в столкновениях тяжёлых ядер при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в эксперименте PHENIX [Текст] / Я.А. Бердников, Д.О. Котов, В.Г. Рябов // Материалы VII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. Харьков: Изд-во ННЦ ХФТИ. – 2010. – С. 48.
7. **Kotov D.O.** Nuclear modification factors of phi meson in  $p+p$ ,  $d+Au$ ,  $Cu+Cu$  and  $Au+Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV [Text] / D.O. Kotov, V.G. Riabov, M. Naglis [et. al.] // e-Print Archive: <http://arxiv.org/abs/1004.3532>

#### Список литературы.

8. **Eidelman, S.** Review of particle physics [Text] / S. Eidelman, K.G. Hayes, K.A. Olive [et al.] // Phys. Lett. B. – 2004. – V.592. – P.1–1109.
9. **Glauber, R.J.** High-energy scattering of protons by nuclei [Text] / R.J. Glauber, G. Matthiae // Nucl. Phys. B. – 1970. – V.21. – P.135–157.
10. **Adler, S.S.** Nuclear effects on hadron production in  $d+Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV revealed by comparison with  $p+p$  data [Text] / S.S. Adler, Y. Berdnikov, V. Riabov, Y. Riabov [et al.] // Phys. Rev. C. – 2006. – Vol. 74. – P. 024904–024917.
11. **Adare, A.** Onset of  $\pi^0$  suppression studied in  $Cu+Cu$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 22.4, 62.4, \text{ and } 200$  GeV [Text] / A. Adare, V. Riabov, Y. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Phys. Rev. Lett. -2008. –V.101. –P.162301–162307.
12. **Konno, M.** High- $p_T$  identified hadron production in  $Au+Au$  and  $Cu+Cu$  collisions at RHIC-PHENIX [Text] / M. Konno // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. – 2007. – V.34(8). – P. S975–S978.
13. **Buesching, H.** Neutral pions with large transverse momentum in  $d+Au$  and  $Au+Au$  Collisions [Text] / H. Buesching // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. – 2005. – P. S473–S480.