

На правах рукописи



Рябов Юрий Германович

**РОЖДЕНИЕ ЛЕГКИХ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ В  
ЯДРО - ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ НА КОЛЛАЙДЕРЕ RHIC  
ПРИ ЭНЕРГИЯХ  $\sqrt{s_{NN}} = 63$  И 200 ГЭВ**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

С.-Петербург – 2007

Работа выполнена в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор физико-математических наук,  
профессор

Самсонов Владимир Михайлович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук,  
профессор

Курепин Алексей Борисович,  
Институт ядерных исследований РАН

кандидат физико-математических наук,

Феофилов Григорий Александрович,  
С.-Петербургский государственный университет

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна.

Защита состоится “14 ” ноября 2007 года в 16 часов

на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, корпус 2, ауд. 265.

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

Автореферат разослан “ 7 ” октября 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.05

доктор физико-математических наук

профессор



Титовец Ю.Ф.

## Актуальность работы

Исследование столкновений тяжелых релятивистских ядер является одним из приоритетных направлений в физике высоких энергий. Квантовая хромодинамика, фундаментальная теория сильных взаимодействий, предсказывает, что при температуре взаимодействующей системы  $\sim 170$  МэВ должен происходить фазовый переход адронной материи в состояние со “свободными” кварками и глюонами. Этот переход также сопровождается частичным восстановлением киральной симметрии. Подобное состояние материи принято называть кварк-глюонной плазмой. Условие экстремально высокой температуры взаимодействующей системы реализуется в столкновениях тяжелых ядер, обладающих большой энергией. Основной целью программы исследований таких столкновений является поиск и исследование свойств нового состояния материи – кварк-глюонной плазмы.

Легкие векторные мезоны являются важным инструментом для изучения свойств подобного состояния вещества. Измерение характеристик мезонов в  $p+p$ ,  $d+Au$  и  $Au+Au$  столкновениях используется для обнаружения различных аномалий, возникающих при столкновении тяжелых ядер, и позволяет разделить эффекты холодной и горячей ядерной материи, влияющие на характеристики частиц. Степень влияния ядерной среды принято характеризовать фактором ядерной модификации ( $R_{AA}$ ), определяемым как отношение выходов частиц в  $Au+Au$  и  $p+p$  столкновениях, деленных на соответствующее число элементарных нуклон-нуклонных столкновений, происходящих при взаимодействии. Одним из наиболее выдающихся результатов, полученным всеми экспериментами на коллайдере RHIC, является наблюдение подавления выхода не идентифицированных адронов с большим поперечным импульсом в центральных столкновениях ядер золота. Позднее было обнаружено, что выход барионов (протонов) с большим поперечным импульсом в таких столкновениях практически не подавлен. Подобное различие в поведении мезонов и барионов получило название “барионной загадки”. Помимо этого было обнаружено отсутствие подавления выходов прямых фотонов. Контрольный эксперимент, в котором факторы ядерной модификации измерялись в столкновениях ядер дейтерия и ядер золота, показал отсутствие какого-либо подавления для всех измеренных частиц. Это свидетельствует о том, что обнаруженный ранее эффект подавления выходов не идентифицированных адронов является результатом воздействия среды, образующейся в столкновениях тяжелых ядер. Измерение факторов ядерной модификации для векторных мезонов позволяет получить более полную информацию о зависимости степени подавления выхода частиц с большим поперечным импульсом от массы и кваркового состава частиц. В частности,  $\phi$  - мезон, имеющий массу близкую к массе протона, является очень заманчивым инструментом для изучения этого вопроса. Измерения факторов ядерной модификации легких векторных мезонов также позволяют определить какая из двух моде-

лей, гидродинамическая или рекомбинационная, более корректно описывает экспериментальные результаты.

Ожидается, что свойства легких векторных мезонов должны быть чувствительны к частичному восстановлению киральной симметрии, которое предположительно возникает при столкновении тяжелых ядер сверхвысоких энергий. Малое время жизни  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов ( $\Gamma_\omega = 8.5$  МэВ,  $\Gamma_\phi = 4.3$  МэВ) предполагает, что существенная их часть распадается внутри горячей и плотной ядерной среды, возникающей в таких столкновениях. Теоретические модели предсказывают, что под влиянием образующейся среды базовые свойства легких векторных мезонов, такие как масса, ширина и вероятности распада по различным каналам, могут изменяться. Эти изменения могут быть исследованы путем сравнения свойств мезонов, измеренных в лептонных и адронных каналах распада в различных сталкивающихся системах.

Эксперимент PHENIX на ускорителе RHIC (BNL, США) имеет уникальную возможность изучать рождение легких векторных мезонов как в адронных, так и в лептонных каналах распада в рамках одного эксперимента. Причем, эти измерения возможны в протонных столкновениях и столкновениях тяжелых ядер при одной и той же энергии, приходящейся на пару сталкивающихся нуклонов. Физическая программа эксперимента PHENIX предполагает исследование рождения легких векторных мезонов в  $p+p$ ,  $d+Au$  и  $Au+Au$  взаимодействиях, измерение факторов ядерной модификации для этих мезонов в  $d+Au$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при различной центральности столкновений. С целью поиска признаков частичного восстановления киральной симметрии физическая программа PHENIX включает в себя исследование модификаций масс и ширин легких векторных мезонов, а также измерения интегральных выходов и температур в адронных и лептонных каналах распада.

### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является:

- Исследование рождения  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов в  $p+p$ ,  $d+Au$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 63$  и 200 ГэВ.
- Исследование относительного выхода векторных и псевдоскалярных мезонов для понимания процессов фрагментации струй.
- Исследование факторов ядерной модификации для  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов в  $d+Au$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при различной центральности столкновений.
- Исследование признаков восстановления киральной симметрии через систематическое измерение масс и ширин векторных мезонов в  $d+Au$  и  $Au+Au$  взаимодействиях, а также

через сравнение интегральных выходов  $\phi$  - мезонов, измеренных в лептонном и адронном каналах распада.

- Разработка методики и программного комплекса для полного моделирования и тонкой настройки характеристик дрейфовой камеры спектрометра PHENIX.

В работу вошли измерения, проведенные с использованием экспериментальных данных, полученных на эксперименте PHENIX в 2002-2005 годах.

### **Научная новизна работы**

При выполнении данной работы были получены следующие новые результаты:

- Инвариантные спектры по поперечному импульсу, измеренные для  $\omega$  - мезона в p+p, d+Au и Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Измерения проведены в двух адронных каналах распада  $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$  и  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$ . Данные результаты являются не только первыми измерениями  $\omega$  - мезона на коллайдере RHIC, но и вообще первыми в мире высокоточными измерениями спектров рождения  $\omega$  - мезона в широком диапазоне по поперечному импульсу;
- Инвариантные спектры по поперечной массе, измеренные для  $\phi$  - мезона в p+p и d+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, а также в Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 63$  и 200 ГэВ. Измерения проведены в адронном канале распада  $\phi \rightarrow K^+ K^-$ ;
- Факторы ядерной модификации, измеренные для  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов в d+Au и Au+Au взаимодействиях при различной центральности столкновений;
- Температура и интегральный выход  $\phi$  - мезонов, приходящийся на пару взаимодействующих нуклонов, измеренные в канале распада  $\phi \rightarrow K^+ K^-$  в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях;
- Зависимость массы и ширины  $\phi$  - мезона от центральности столкновений в d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Параметры мезона измерялись в канале распада  $\phi \rightarrow K^+ K^-$ ;
- Зависимость массы  $\omega$  - мезона от поперечного импульса в p+p и d+Au столкновениях. Масса измерялась в канале распада  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$ ;
- Отношение выходов векторных и псевдоскалярных мезонов ( $\omega/\pi^0$ ) в зависимости от поперечного импульса, измеренное в p+p столкновениях;
- Создан программный комплекс, полностью моделирующий работу основного детектора трековой системы спектрометра PHENIX - дрейфовой камеры.

## **Научная и практическая значимость**

Полученные в диссертации экспериментальные результаты могут использоваться для развития теоретических моделей ядро - ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Результаты измерений в p+p столкновениях, впервые полученные при такой энергии взаимодействия, могут использоваться для прямой проверки расчетов, выполненных в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики. Разработанный программный комплекс для моделирования работы дрейфовой камеры установки PHENIX может использоваться для моделирования работы практически любого газового проволочного детектора. В частности, комплекс использовался для настройки параметров считывающей электроники дрейфовых камер, созданных в ПИЯФ для эксперимента LAND в GSI (Германия).

## **Положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментальные результаты, представленные в разделе “научная новизна работы”.
2. Показано, что среда, образующаяся в d+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, оказывает слабое влияние на рождение  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов.
3. Показано, что среда, образующаяся в центральных Au+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, приводит к подавлению выходов  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов в 3-5 раз. В пределах ошибок измерений факторы подавления для различных нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ) согласуются друг с другом.
4. Показано, что степень подавления выходов адронов в центральных Au+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ зависит не от массы частиц, а от их кваркового состава.
5. Показано, что интегральный выход  $\phi$  - мезонов возрастает примерно в два раза при переходе от p+p к центральным Au+Au взаимодействиям при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Подобная тенденция сохраняется и при энергии взаимодействия равной  $\sqrt{s_{NN}} = 62$  ГэВ.
6. Показано, что в существующих на данный момент данных эксперимента PHENIX, не наблюдается каких - либо модификаций массы и ширины  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов в адронных каналах распада.
7. Показано, что отношение выходов векторных и псевдоскалярных мезонов ( $\omega/\pi^0$ ) остается постоянным в области поперечных импульсов 2 - 13 ГэВ/c в p+p взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s} = 200$  ГэВ;

8. Программный комплекс, полностью моделирующий работу дрейфовой камеры спектрометра PHENIX.

**Достоверность и обоснованность результатов**, полученных в диссертации, обуславливается следующим:

1. Инвариантный выход  $\omega$  - мезонов измерялся в двух адронных каналах распада ( $\pi^0\gamma$  и  $\pi^0\pi^+\pi^-$ ). Одновременное рассмотрение нескольких распадов одной и той же частицы повышает надежность получаемых результатов. Кроме того, было проведено несколько контрольных измерений выхода  $\eta$  - мезонов, распадающихся в каналы  $\eta \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$  и  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ . Для измерений трехчастичных распадов  $\eta$  и  $\omega$  - мезонов использовалась идентичная методика. При этом появляется возможность сравнения выходов  $\eta$  - мезонов в двух различных каналах распада. Результаты соответствующих анализов в пределах ошибок хорошо согласуются между собой;
2. Спектры рождения  $\phi$  - мезонов в  $p+p$  и  $d+Au$  взаимодействиях были измерены в канале распада  $\phi \rightarrow K^+K^-$  в рамках двух различных подходов, а именно с использованием возможностей установки PHENIX для идентификации заряженных каонов, так и без него. Результаты двух анализов в пределах ошибок хорошо согласуются друг с другом;
3. Разработанная методика моделирования работы дрейфовой камеры эксперимента PHENIX использовалась для вычисления базовых параметров детектора при различных режимах работы по высокому напряжению. Получено хорошее согласие между результатами моделирования и экспериментально наблюдаемыми параметрами;
4. Достоверность результатов также подтверждается их апробацией на международных конференциях и достаточным объемом публикаций в реферируемых научных изданиях.

**Личное участие автора** в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит:

- В постановке задач исследований;
- В разработке методики и создании программного комплекса для полного моделирования характеристик дрейфовой камеры спектрометра PHENIX;
- В разработке методик анализа экспериментальных данных для измерения различных адронных распадов легких векторных  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов;
- В проведении анализа экспериментальных данных и получении физических результатов, представленных в работе;
- В подготовке и написании публикаций.

## **Публикации**

По результатам выполненных исследований были опубликованы четыре работы в реферируемых журналах, список которых приведен в конце автореферата.

## **Апробация материалов**

Результаты работы обсуждались на семинарах Отдела физики высоких энергий ПИЯФ РАН, кафедре «Экспериментальная ядерная физика» СПбГПУ, докладывались автором на российских и зарубежных конференциях:

- International conference on instrumentation for colliding beam physics (Новосибирск, 2002);
- Vienna Conference on Instrumentation (Вена, 2004);
- Quark matter 2005 (Будапешт, 2005);
- Quark matter 2006 (Шанхай, 2006);
- Ядро-2007 (Воронеж, 2007).

## **Содержание и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Объем диссертации составляет 121 страницу машинописного текста, в том числе 52 рисунка и 10 таблиц. Список литературы содержит 90 наименований.

## **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цели диссертации, показаны научная новизна и практическая ценность работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дается подробное описание установки, на которой были получены экспериментальные результаты диссертации. Описано устройство и возможности первого в мире коллайдера тяжелых ионов RHIC и спектрометра PHENIX. Для спектрометра PHENIX описана процедура определения  $z$  – координаты точки взаимодействия (вдоль пучка), даны определения центральности столкновений, числа взаимодействующих нуклонов ( $N_{участн}$ ) и числа парных нуклон-нуклонных столкновений ( $N_{столкн}$ ). Дается обзор использованных в физическом анализе триггеров (MinBias и гамма). Демонстрируются возможности спектрометра по идентификации частиц. В первой главе также обсуждается физическая программа эксперимента PHENIX применительно к легким векторным мезонам. Обсуждается важность измерения факторов ядерной модификации для данных частиц, представлен обзор признаков восстановления киральной симметрии, полученных экспериментами при более низких энергиях.



**Вторая глава** посвящена программному комплексу, способному полностью моделировать работу разработанной и созданной в ПИЯФ дрейфовой камеры - основного детектора трековой системы спектрометра PHENIX. Создание данного комплекса позволило в сжатые сроки решить вопросы выбора высоковольтных режимов работы дрейфовой камеры PHENIX в условиях постепенного старения детектора.

В первой части этой главы определяются и систематизируются требования, предъявляемые к дрейфовой камере, описывается проволочная структура и общее устройство камеры. Приводятся рабочие параметры (эффективность, пространственное разрешение, длительность сигналов) детектора, удовлетворяющие описанным требованиям.

Во второй части данной главы описывается работа разработанного в диссертации программного комплекса, моделирующего работу дрейфовой камеры. В качестве входных данных программного комплекса используются треки заряженных частиц, полученные в результате моделирования центральных столкновений ядер золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ с помощью генератора событий HIJING, а также прохождения частиц через материалы экспериментальной установки с помощью программы PISA (Phenix Integrated Simulation Application). Для каждого трека заряженной частицы, проходящего через дрейфовую камеру, определяется тип частицы, ее координаты и полный импульс.

Задача регистрации трека заряженной частицы разбивается программным комплексом на элементарные независимые подзадачи. Моделирование процесса регистрации ионизирующего излучения включает в себя розыгрыш таких процессов как: ионизация молекул или атомов рабочей газовой смеси детектора заряженными частицами, термализация ионизованных электронов, дрейф электронов первичной ионизации вдоль силовых линий электрического поля и газовое усиление в пространственно ограниченной области очень больших электрических полей. Независимость элементарных подзадач позволяет параллельно использовать несколько десятков процессоров, что серьезно сокращало время, необходимое для расчета. Результатом работы элементарной подзадачи является токовый импульс, индуцированный на сигнальной проволоке. В случае если в одном событии имеется несколько треков, наводящих сигнал на одну и ту же сигнальную проволоку, токовые импульсы от таких треков суммируются.

Токовые импульсы, индуцированные на сигнальных проволоках, сворачиваются с функцией отклика электроники (микросхема ASD-8). Результирующие сигналы дискриминируются по амплитуде с целью определения времени дрейфа электронов и длительности сигнала. Затем полученные данные переводятся в стандартный формат данных эксперимента

PHENIX. Это позволяет использовать при анализе смоделированных событий те же алгоритмы и коды, что и для реальных данных.

В ходе моделирования переменными параметрами являлись потенциалы на электродах дрейфовой камеры. Результаты расчетов для нескольких наборов потенциалов сравнивались с экспериментальными данными. Результаты сравнения показали очень высокую степень достоверности проведенного моделирования.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы, связанные с измерением выходов легких нейтральных мезонов в  $p+p$ ,  $d+Au$  и  $Au+Au$  столкновениях на коллайдере RHIC. Основной акцент делается на описание методик, специально разработанных для измерения различных адронных распадов легких векторных  $\omega$  и  $\phi$  – мезонов в условиях большой множественности частиц. Измерения характеристик частиц проводились с использованием данных, полученных на установке PHENIX в 2002-2005 годах в ходе различных циклов работы ускорителя. Основные характеристики изучаемых распадов частиц и анализируемых в диссертации данных приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики изучаемых распадов и анализируемых данных.

Цикл работы	Триггер	Кол-во событий	$\sqrt{s_{NN}}$ (ГэВ)	$\int L$	Канал распада	Вероятность (%)
№3 $p+p$	Minbias	$4.3 \cdot 10^8$	200	$0.02 \text{ пбн}^{-1}$	$\phi \rightarrow K^+ K^-$	$49.3 \pm 0.6$
	Гамма	$4.6 \cdot 10^7$	200	$0.22 \text{ пбн}^{-1}$	$\eta \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$	$22.7 \pm 0.4$
					$\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$	$89.1 \pm 0.7$
					$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$	$8.9^{+0.27}_{-0.23}$
					$\eta \rightarrow \gamma \gamma$	$39.39 \pm 0.24$
№3 $d+Au$	Minbias	$5.4 \cdot 10^8$	200	$0.2 \text{ нбн}^{-1}$	$\phi \rightarrow K^+ K^-$	
	Гамма	$2.1 \cdot 10^7$	200	$1.5 \text{ нбн}^{-1}$	$\eta \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^- (\gamma \gamma)$	
					$\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$	
					$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$	
№4 $Au+Au$	Minbias	$58 \cdot 10^6$	62.4	$5 \text{ мкбн}^{-1}$	$\phi \rightarrow K^+ K^-$	
		$1530 \cdot 10^6$	200	$130 \text{ мкбн}^{-1}$	$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$	
№5 $p+p$	Minbias	$1.5 \cdot 10^9$	200	$0.07 \text{ пбн}^{-1}$	$\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$	
	Гамма	$1.0 \cdot 10^9$	200	$2.5 \text{ пбн}^{-1}$	$\phi \rightarrow K^+ K^-$	
					$\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$	
					$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$	

Одновременное рассмотрение нескольких адронных распадов одной и той же частицы используется для повышения надежности получаемых результатов. Помимо этого было проведено несколько контрольных измерений выхода  $\eta$  - мезонов, распадающихся в каналы  $\eta \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$  и  $\eta \rightarrow \gamma \gamma$ . Методики измерения трехчастичных распадов  $\eta$  и  $\omega$  - мезонов практически идентичны. При этом появляется возможность сравнения выходов  $\eta$  - мезонов в двух различных каналах распада. Спектры рождения  $\phi$  - мезонов в  $p+p$  и  $d+Au$  взаимодействиях были измерены в канале распада  $\phi \rightarrow K^+ K^-$  в рамках двух различных подходов, а именно с использованием возможностей установки PHENIX для идентификации заряженных каонов, так и без него.

Работу по измерению выходов частиц условно можно разделить на следующие этапы:

1. Анализ качества и отбор экспериментальных данных. Определение характеристик детекторных подсистем, исключение неактивных или нестабильных областей.
2. Оптимизация критериев отбора заряженных и нейтральных частиц, зарегистрированных в детекторе.
3. Построение спектров инвариантной массы распадающихся частиц. Выделение в спектрах пиков, соответствующих распадам мезонов.
4. Определение эффективности триггеров, использованных при наборе данных.
5. Оценка эффективности регистрации частиц на основе полного Монте-Карло моделирования работы экспериментальной установки.
6. Определение систематических ошибок измерений.

В данной главе подробно рассмотрены каждый из перечисленных этапов, обсуждены достоинства и принципиальные ограничения подобных измерений на установке PHENIX.

**Четвертая глава** посвящена результатам исследований рождения  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов в ядро - ядерных взаимодействиях. Инвариантные спектры рождения  $\phi$  - мезонов по поперечной массе ( $m_T = \sqrt{p_T^2 + m_0^2}$ ), измеренные в  $p+p$ ,  $d+Au$  и  $Au+Au$  взаимодействиях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 63$  и  $200$  ГэВ, показаны на рис. 1. Рождение  $\phi$  - мезонов было измерено в  $\phi \rightarrow K^+ K^-$  канале распада в различных взаимодействующих системах при различной центральности столкновений. В  $p+p$  и  $d+Au$  взаимодействиях выход  $\phi$  - мезонов был измерен с использованием двух различных подходов. В первом из них требовалось, чтобы оба заряженных трека были идентифицированы как каоны с помощью TOF или EMC подсистем (точки на рис. 1). В альтернативном подходе идентификация частиц не использовалась, т.е. считалось, что все измеренные заряженные частицы являются каонами (полые кресты на рис. 1). Из рисунка 1 видно, что результаты обоих анализов хорошо согласуются друг с другом. При этом два ана-

лиза имеют различные источники систематических ошибок, и совпадение их результатов является важным фактором, подтверждающим корректность получаемых результатов.

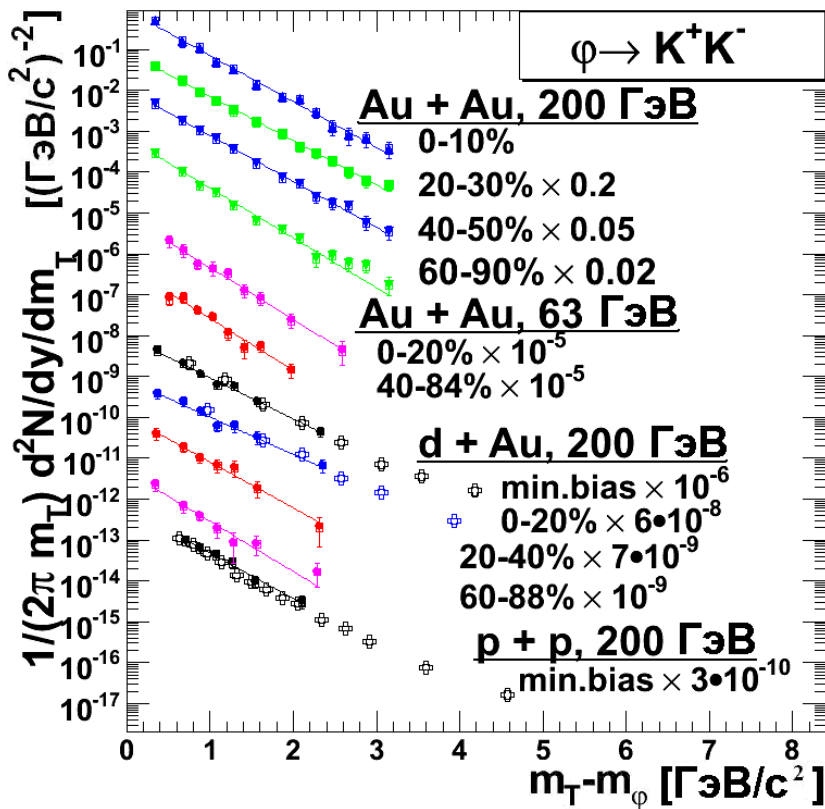


Рис. 1 Инвариантные спектры рождения  $\phi$  - мезонов по поперечной массе, измеренные в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергии

$$\sqrt{s_{NN}} = 63 \text{ и } 200 \text{ ГэВ.}$$

Инвариантные спектры по поперечному импульсу, измеренные для  $\omega$  - мезонов в p+p, d+Au и Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, представлены на рис. 2.

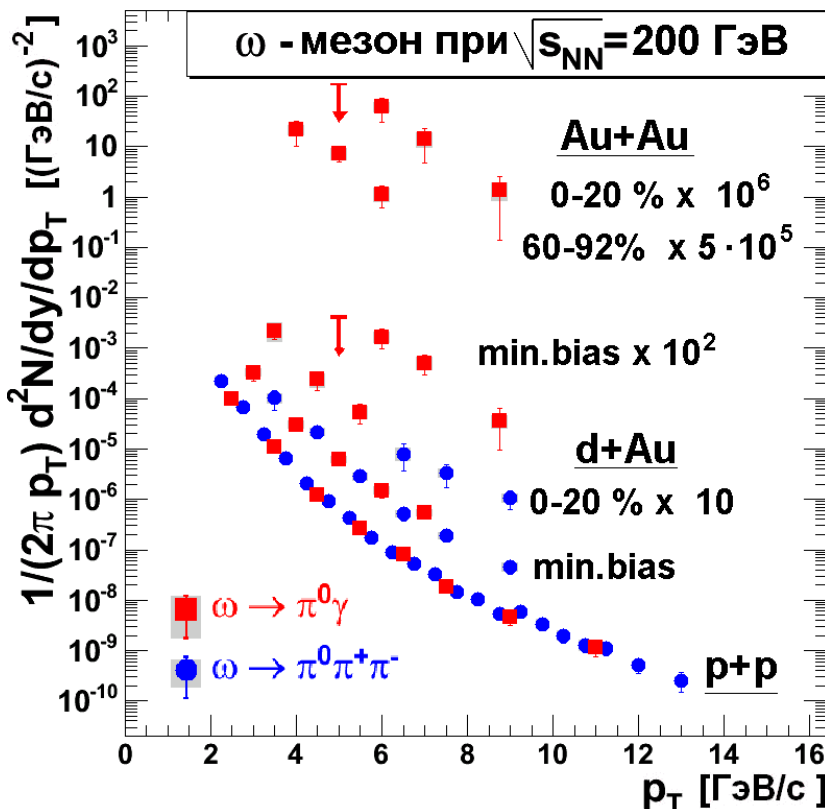


Рис. 2. Инвариантные спектры по поперечному импульсу, измеренные для  $\omega$  - мезонов в p+p, d+Au и Au+Au столкновениях при энергии

$$\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ.}$$

В случае p+p и d+Au взаимодействий выходы  $\omega$  - мезонов были измерены в двух различных каналах распада:  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$  и  $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$ . Результаты измерений хорошо согласуются друг с другом. В случае Au+Au взаимодействий рождение  $\omega$  - мезона было измерено в канале  $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$  в области больших поперечных импульсов при различных центральностях взаимодействий.

Измеренное отношение  $\omega/\pi^0$  в p+p и d+Au взаимодействиях практически не зависит от поперечного импульса частиц. Аппроксимация отношения константой в области поперечных импульсов  $p_T > 2.0$  ГэВ/с дает значение  $0.81 \pm 0.02$  (стат.)  $\pm 0.07$  (сист.), что не вполне согласуется с предсказаниями РУТНИА. Полученное значение отношения согласуется с результатами измерений, выполненных при более низких энергиях взаимодействий. В данном случае имеются в виду измерения отношения  $\omega/\pi^0$  в  $\pi$ +Ве взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s} = 31$  ГэВ, выполненных коллаборацией E706, а так же результаты коллаборации R-806.

Для определения степени влияния ядерной среды на выходы частиц были измерены факторы ядерной модификации для  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов в d+Au и Au+Au столкновениях. На рис. 3 показаны факторы ядерной модификации легких мезонов, измеренные в периферийных и наиболее центральных Au+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

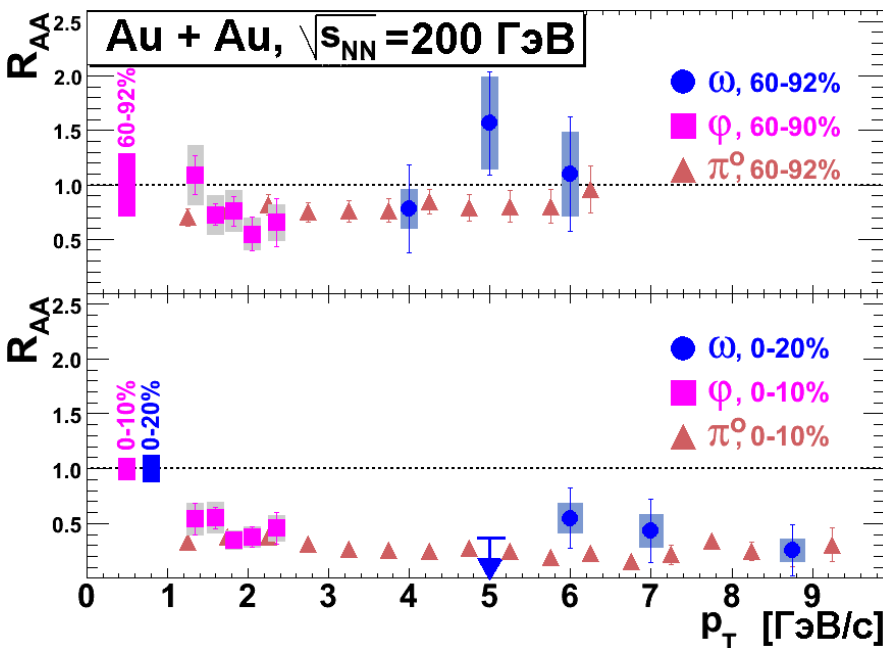


Рис. 3. Факторы ядерной модификации, измеренные в периферийных и наиболее центральных Au+Au взаимодействиях при энергии

$$\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ.}$$

В центральных столкновениях выход мезонов подавлен в 3-5 раз. Из рисунка 3 также видно, что степень подавления выходов мезонов в центральных Au+Au взаимодействиях в пределах ошибок измерений не зависит от массы мезонов, которые изменяются в диапазоне от  $\sim 130$  МэВ/с<sup>2</sup> для  $\pi^0$  - мезона до  $\sim 1$  ГэВ/с<sup>2</sup> для  $\phi$  - мезона, т.е. более чем в семь раз. В то же время факторы ядерной модификации для протонов, масса которых меньше массы  $\phi$  - мезона, а также и других барионов, практически равны единице. Эта разница непосредственно

указывает на тот факт, что влияние среды, сформировавшейся с результате центральных столкновений тяжелых релятивистских ядер, связано не с массой частиц, а с их кварковым составом. Факторы ядерной модификации  $R_{dAu}$ , измеренные в  $d+Au$  столкновениях, близки к единице для всех рассматриваемых частиц.

Для исследования признаков частичного восстановления киральной симметрии спектры рождения  $\phi$  - мезонов, представленные на рис. 1, аппроксимировались функцией для извлечения интегральных выходов ( $dN/dy$ ) и температур ( $T$ ). Для аппроксимации использовалась следующая функция:

$$\frac{1}{2\pi \cdot m_T} \frac{d^2N}{dm_T dy} = \frac{dN/dy}{2\pi \cdot T \cdot (T + m_0)} \exp\left(-\frac{(m_T - m_0)}{T}\right), \quad \text{где:}$$

$m_0$  – масса покоя  $\phi$  - мезона;

$dN/dy$  и  $T$  – параметры аппроксимации.

Зависимости измеренной температуры и интегрального выхода, приходящегося на пару взаимодействующих нуклонов, от центральности взаимодействий представлены на рис. 4. Извлеченные температуры практически не зависят от размера взаимодействующей системы и только слабо изменяются при переходе от энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 63$  ГэВ к энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Также нет указаний и на то, что температуры, измеренные в лептонном и адронном канале распада, отличаются.

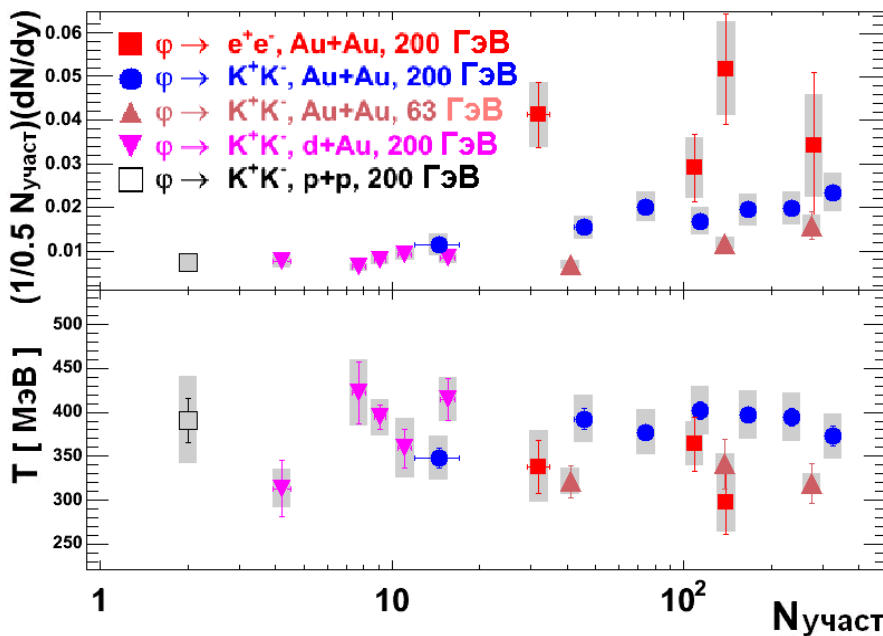


Рис. 4. Интегральный выход  $\phi$  - мезонов, приходящийся на пару взаимодействующих нуклонов, и температура как функции центральности взаимодействий при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 63$  и 200 ГэВ.

Интегральный выход  $\phi$  - мезонов, приходящийся на пару взаимодействующих нуклонов, возрастает в два раза при переходе от  $p+p$  к центральным  $Au+Au$  столкновениям при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Похожая тенденция также наблюдается и при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 63$  ГэВ. Сле-

дует отметить, что такое возрастание характерно для  $\phi$  - мезона в большей степени, чем для других измеренных мезонов. Ближайшим к нему по степени изменения интегрального выхода на пару взаимодействующих нуклонов является  $K$  - мезон, содержащий один  $s$  - кварк. Выходы легких мезонов, не содержащих  $s$  - кварка, изменяются значительно меньше. Это указывает на то, что вероятность рождения более массивного  $s$  - кварка в центральных событиях выше, чем в периферийных, что может быть связано с более высокой плотностью энергии. Интегральный выход  $\phi$  - мезонов, измеренный в лептонном канале, несколько превышает выход, измеренный в адронном канале. Однако большие неопределенности в измерении выхода  $\phi$  - мезонов в  $\phi \rightarrow e^+e^-$  канале распада не позволяют сделать однозначный вывод о различии выходов  $\phi$  - мезонов в лептонном и адронном каналах распада.

Масса и ширина  $\phi$  - мезонов, восстановленные в  $\phi \rightarrow K^+K^-$  канале распада в d+Au и Au+Au столкновениях, показаны на рис. 5 как функции размера взаимодействующей системы (центральности столкновений).

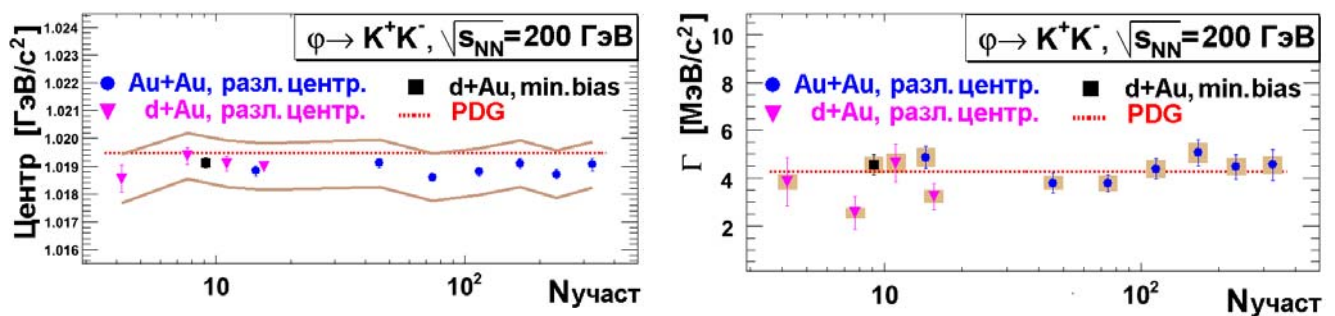


Рис.5. Масса (слева) и ширина (справа)  $\phi$  - мезона, восстановленные в  $\phi \rightarrow K^+K^-$  канале распада при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в d+Au и Au+Au взаимодействиях. Параметры показаны как функции центральности столкновений.

В существующих на данный момент данных, не наблюдается каких - либо модификаций массы и ширины  $\phi$  - мезона, измеренных в адронном канале распада. Измерение массы и ширины мезонов в лептонном канале на основе имеющейся в настоящее время статистики не представляется возможным.

Для  $\omega$  - мезона в пределах ошибок измерений также не наблюдается отличий восстановленной массы от табличного значения в диапазоне поперечных импульсов  $p_T > 2.0$  ГэВ/с.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

В работе показано, что:

- среда, образующаяся в d+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, оказывает слабое влияние на рождение  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов. Факторы ядерной модификации для всех измеренных частиц близки к единице;

- среда, образующаяся в центральных Au+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, приводит к подавлению выходов  $\omega$  и  $\phi$  - мезонов в 3-5 раз. В пределах ошибок измерений факторы подавления для различных нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ) согласуются друг с другом. Выходы барионов при этом не подавлены;
- степень подавления выходов адронов в центральных Au+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ зависит не от массы частиц, а от их кваркового состава;
- интегральный выход  $\phi$  - мезонов возрастает примерно в два раза при переходе от p+p к центральному Au+Au взаимодействиям при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Подобная тенденция сохраняется и при энергии взаимодействия равной  $\sqrt{s_{NN}} = 63$  ГэВ;
- в существующих на данный момент данных эксперимента PHENIX, не наблюдается каких - либо модификаций массы и ширины  $\omega$  и  $\phi$  - мезона в адронных каналах распада;
- отношение выходов векторных и псевдоскалярных мезонов ( $\omega/\pi^0$ ) остается постоянным в области поперечных импульсов 2 - 13 ГэВ/с в p+p взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s} = 200$  ГэВ;
- разработанная методика моделирования дрейфовой камеры спектрометра PHENIX позволяет адекватно описать характеристики детектора, измеренные с использованием реальных данных.

### **Публикации**

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Riabov Yu. et al. Measurement of leptonic and hadronic decays of  $\omega$  and  $\phi$  - mesons at RHIC by PHENIX // Journal of Physics G. -2007. -V.34. -P.925.
2. Adler S.S., Riabov Yu. et al. Production of  $\phi$  mesons at midrapidity in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au+Au collisions at relativistic energies // Physical Review C. -2005. -V.C72. -P.014903.
3. Adler S.S., Riabov Yu. et al. Production of  $\omega$  mesons at Large Transverse Momenta in p + p and d + Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // Physical Review C. -2007. -V.C75. -P.051902.
4. Ryabov Yu. Low-mass drift chamber of the PHENIX central spectrometers at RHIC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. -2002. -V.494. -P.194.