

Рябов Виктор Германович

Рождение легких мезонов в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях

$$\sqrt{s_{NN}} = 62, 200 \text{ ГэВ в эксперименте ФЕНИКС}$$

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный консультант:

доктор физико-математических наук,
профессор

Самсонов Владимир Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Курепин Алексей Борисович,

доктор физико-математических наук,
с.н.с.

Водопьянов Александр Сергеевич,

доктор физико-математических наук,
профессор

Андрианов Владимир Андреевич,

Ведущая организация:

Московский инженерно-физический институт (Государственный университет)

Защита состоится “ 15 ” апреля 2009 года в 16 часов

на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 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 “ ” _____ 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.29

кандидат физико-математических наук

Ермакова Н.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из приоритетных направлений в физике высоких энергий является изучение свойств ядерной материи в условиях высоких температур и плотностей. Теоретические расчеты на решетке в рамках квантовой хромодинамики (КХД) показывают, что при больших значениях температуры и/или барионной плотности адронная материя испытывает фазовый переход в состояние со “свободными” кварками и глюонами. Фазовый переход также может сопровождаться восстановлением киральной симметрии. По аналогии с электромагнитной плазмой подобное состояние материи получило название кварк-глюонной плазмы (КГП). Считается, что Вселенная, образовавшаяся около 14 миллиардов лет назад, находилась в данном состоянии, характеризуемом температурой порядка 10^{12} К, в течение нескольких микросекунд после Большого Взрыва. Ожидается, что изучение подобного состояния ядерного вещества поможет дать ответы на целый ряд фундаментальных вопросов в физике высоких энергий и физике сильных взаимодействий. Наиболее важные из них это вопрос о природе сил, связывающих кварки в адронах, и вопрос о нарушении киральной симметрии, ответственном за динамические массы кварков и, как следствие, адронов.

Теоретическое обсуждение природы ядерной материи в условиях высоких температур и плотностей во многом стимулировалось пониманием того, что подобные условия могут достигаться в лабораторных условиях при изучении центральных столкновений тяжелых релятивистских ядер. Основная цель программы подобных исследований заключается в экспериментальном изучении свойств ядерной материи в условиях высоких температур и плотностей. Большое внимание уделяется вопросу открытия КГП, где сам термин используется для общего описания системы, в которой доминирующими степенями свободы не являются бесцветные адроны, наблюдаемые как изолированные частицы, и резонансы. Данное определение имеет свои ограничения, поскольку нуклон-нуклонные взаимодействия при больших энергиях не могут быть описаны только на языке нейтральных по цвету адронов и требуют рассмотрения базовых партонных взаимодействий. Существенная разница по сравнению с взаимодействиями тяжелых ядер заключается в доминировании партонных степеней свободы во всем диапазоне импульсов и расстояний.

Для того чтобы зафиксировать образование КГП во взаимодействиях тяжелых релятивистских ядер, необходимо одновременно измерить целую совокупность потенциальных признаков ее образования. Очевидно, что сигналы образования КГП могут изучаться только через регистрацию адронов, лептонов и фотонов, вылетающих из области взаимодействия на конечной стадии реакций. Большинство теоретически предсказанных

сигналов образования КГП полностью или частично размываются в ходе эволюции взаимодействующей системы, а также могут иметь обычные адронные дубликаты.

Программа по изучению столкновений тяжелых релятивистских ядер с целью поиска и изучения свойств КГП началась на ускорителе Bevalac в Беркли (1975-1985, США) и продолжилась на синхротронах AGS в Брукхэйвенской Национальной Лаборатории (1987-1995, США) и SPS в ЦЕРНе (1987-настоящее время, Швейцария). Несмотря на множество новых эффектов, обнаруженных в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 4-20$ ГэВ, в настоящее время не существует экспериментальных данных, однозначно свидетельствующих об образовании КГП в лабораторных условиях. Модельно зависимые расчеты показывают, что в экспериментах удалось достичь плотностей энергии порядка $\varepsilon \approx 1-5$ ГэВ/фм³ и температур порядка $T \approx 140-200$ МэВ. Однако размер и время жизни партонного состояния могли быть недостаточными для достижения равновесия.

Прогресс в данной области может быть связан с повышением энергии взаимодействия тяжелых ионов, что достигается при использовании нового поколения ускорителей - коллайдеров. Первым в мире коллайдером тяжелых ионов стал Релятивистский Коллайдер Тяжелых Ионов (RHIC), который начал свою регулярную работу летом 2000 года в Брукхэйвенской Национальной Лаборатории. Эксперимент ФЕНИКС является одним из двух основных экспериментов на коллайдере RHIC. Физическая программа эксперимента включает в себя изучение свойств среды, образующейся в центральных столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер. Для этого экспериментальная установка должна обеспечивать эффективную регистрацию нейтральных и заряженных частиц в широком интервале импульсов и энергий. Особенности ядерных взаимодействий на коллайдере RHIC заключаются в высокой множественности заряженных частиц, рождающихся в центральных столкновениях тяжелых ядер в области малых быстрот¹ ($dN/dy|_{y=0} \sim 1000$), а также высокой частоте элементарных нуклон-нуклонных столкновений ($\sim 5 \cdot 10^5$ Гц). Поэтому создание экспериментальной установки ФЕНИКС потребовало проведения обширной программы исследований с целью оптимизации параметров детекторных подсистем, которые должны обеспечивать высокое энергетическое, пространственное и временное разрешение, а также высокую эффективность регистрации частиц в специфических условиях, реализуемых на коллайдере RHIC.

Данная диссертационная работа посвящена изучению свойств ядерной материи, образующейся при взаимодействии релятивистских тяжелых ядер, через измерение свойств

¹ Быстрота $y=1/2 \cdot \ln\left(\frac{E+p_z}{E-p_z}\right)$, где E - полная энергия частицы, p_z - проекция импульса на ось столкновения.

легких идентифицированных мезонов (π^0 , K_s^0 , η , ω , η' , ϕ), рождающихся в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 62, 200$ ГэВ. В работе также решен вопрос разработки, создания, запуска, калибровки и эксплуатации основного детектора трековой системы эксперимента ФЕНИКС - дрейфовых камер. Два направления близко связаны, т.к. дрейфовые камеры являются одним из основных детекторов, используемых для измерения свойств частиц в эксперименте ФЕНИКС. Тема настоящей работы является актуальной, так как она связана с описанием свойств ядерной материи в условиях высоких температур, а также с разработкой и созданием современных детекторов в области экспериментальной физики высоких энергий.

Цели работы. Основная цель работы заключается в получении и интерпретации новых экспериментальных данных о свойствах ядерной материи в условиях высоких температур, достигаемых в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер на коллайдере RHIC. Данная цель включает в себя:

1. Измерение инклюзивных спектров рождения легких идентифицированных мезонов (π^0 , K_s^0 , η , ω , η' , ϕ) по поперечному импульсу в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергиях взаимодействия $\sqrt{s_{NN}} = 62, 200$ ГэВ и различной центральности ядро-ядерных столкновений.
2. Изучение особенностей механизмов рождения мезонов в области больших поперечных импульсов (в области применимости пертурбативных методов КХД), измерение относительных выходов частиц в p+p столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ.
3. Измерение спектральных свойств (массы и ширины) легких векторных ω и ϕ - мезонов, а также интегральных выходов ϕ - мезона в адронном ($\phi \rightarrow K^+K^-$) и диэлектронном ($\phi \rightarrow e^+e^-$) каналах распада с целью поиска признаков восстановления киральной симметрии.
4. Измерение факторов ядерной модификации² для легких идентифицированных мезонов (π^0 , K_s^0 , η , ω , ϕ) в d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и различной центральности ядро-ядерных столкновений.
5. Определение роли эффектов начального (модификация функций распределения партонов в ядре, мягкое многократное перерасcеяние партонов (эффект Кронина)) и конечного (энергетические потери партонов в среде, перерасcеяние адронов, коллективные потоки) состояний, оказывающих влияние на свойства рождающихся частиц.

² Или ядерных модифицированных факторов, определение дано на стр. 19 автореферата.

6. Сравнение результатов измерений с предсказаниями различных теоретических моделей, получение численных оценок для величины энергетических потерь партонов, глюонной плотности в образующейся среде и ее транспортных свойств.
7. Систематическое изучение факторов ядерной модификации, измеренных для различных мезонов и (анти)барионов с целью поиска аномалий в механизмах рождения адронов, имеющих различную массу и кварковый состав.
8. Разработка, создание, запуск и калибровка основного детектора трековой системы эксперимента ФЕНИКС - дрейфовых камер.

Научная новизна работы:

1. Получены новые экспериментальные данные для инклюзивных спектров рождения легких идентифицированных мезонов (π^0 , K_s^0 , η , ω , η' , ϕ) по поперечному импульсу в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при беспрецедентно высоких энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 62, 200$ ГэВ.
2. Получены новые экспериментальные данные для относительных выходов векторных и псевдоскалярных мезонов (ω/π^0 , ϕ/π^0 , K_s^0/π^0 , η/π^0 и η'/π^0) в p+p столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. Измерения были выполнены в области больших поперечных импульсов ($p_T > 1-2$ ГэВ/c), где рождение частиц в основном обусловлено фрагментацией жестко рассеянных партонов.
3. Получены новые экспериментальные данные о факторах ядерной модификации для легких идентифицированных мезонов (π^0 , K_s^0 , η , ω , ϕ) в d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и различной центральности столкновений.
4. Получены новые экспериментальные данные для спектральных свойств легких векторных ω и ϕ - мезонов в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и различной центральности столкновений. Спектральные свойства мезонов измерялись в адронных каналах распада $\phi \rightarrow K^+K^-$ и $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$.
5. Получены новые экспериментальные данные для температур и интегральных выходов ϕ - мезонов в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 62, 200$ ГэВ и различной центральности столкновений. Измерения были выполнены в адронном $\phi \rightarrow K^+K^-$ (p+p, d+Au, Au+Au) и диэлектронном $\phi \rightarrow e^+e^-$ (Au+Au) каналах распада.
6. Впервые экспериментально обнаружен эффект охлаждения (или гашения) струй, связанный с энергетическими потерями жестко рассеянных партонов в плотной и горячей ядерной среде, образующейся в центральных Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

7. Впервые экспериментально обнаружен эффект избыточного выхода (анти)барионов относительно выхода мезонов в области промежуточных импульсов $1.5 < p_T \text{ (ГэВ/с)} < 4.5$ в центральных Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$.

8. Созданы уникальные дрейфовые камеры центральной трековой системы эксперимента ФЕНИКС, обеспечивающие высокую эффективность восстановления треков заряженных частиц ($\sim 100\%$) и высокое импульсное разрешение ($\delta p/p \sim 1\% \cdot p$) в условиях большой множественности заряженных частиц и большой частоты ядерных столкновений, реализуемых на коллайдере RHIC.

Научная и практическая значимость работы. Полученные в диссертационной работе данные свидетельствуют об образовании в центральных Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ среды, обладающей уникальными свойствами, которые не наблюдались в экспериментах по изучению взаимодействий тяжелых ядер при более низких энергиях. Данная среда характеризуется высокой начальной глюонной плотностью ($dN_g/dy \sim 1400$) и плотностью энергии ($\epsilon_0 \sim 20 \text{ ГэВ/фм}^3$) и вероятнее всего состоит из сильно взаимодействующих партонов, а не из газа квазисвободных частиц. Полученные экспериментальные результаты требуют дальнейшего теоретического описания, и необходимы для развития теоретических моделей ядро-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Полученные данные о свойствах среды вносят важный вклад в программу поиска и изучения свойств кварк-глюонной плазмы в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер.

Разработанные методики анализа экспериментальных данных, использованные для измерения выходов легких идентифицированных мезонов, широко используются в коллаборации ФЕНИКС.

Методики, разработанные при создании дрейфовой камеры эксперимента ФЕНИКС, являются универсальными и могут использоваться при разработке других газовых детекторов. В частности они были применены для настройки параметров считывающей электроники дрейфовых камер, созданных в ПИЯФ для эксперимента LAND в GSI (Германия).

Разработанные и созданные дрейфовые камеры позволяют успешно выполнять физическую программу эксперимента ФЕНИКС и могут выступать в роли прототипа для будущих детекторов.

Основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Получены новые экспериментальные данные, перечисленные в п. 1-5 раздела “Научная

новизна работы”.

2. Разработана конструкция и созданы уникальные дрейфовые камеры центральной трековой системы эксперимента ФЕНИКС, обеспечивающие высокое пространственное разрешение ($\sigma \sim 120-130$ мкм, $\sigma_{\parallel} \sim 1.5-2$ мм, $\sigma_z \sim 1.5$ мм) и эффективность ($\epsilon \sim 90-100$ %) сигнальных проволок в условиях высокой множественности заряженных частиц ($dN/dy|_{y=0} \sim 1000$) и большой частоты ядерных столкновений ($\sim 5 \cdot 10^5$ Гц). Эффективность восстановления треков заряженных частиц достигает ~ 100 % в p+p, d+Au и периферийных Au+Au столкновениях и уменьшается до ~ 80 % в центральных Au+Au взаимодействиях. Камеры имеют большой активный объем (~ 3 м³, ~ 7 м²) и обладают модульной структурой, облегчающей производство, сборку и обслуживание детектора.

3. Разработана и реализована оригинальная методика калибровки дрейфовых камер, которая позволяет достичь высокого углового разрешения $\sigma_{\alpha} = 0.84$ мрад для восстановленных треков заряженных частиц. Достигнутая величина углового разрешения соответствует импульсному разрешению $\frac{\delta p}{p} = 0.9\% \oplus 1.0\% \cdot p$ при фиксированном значении интеграла магнитного поля ($\int B dl \sim 1$ Т·м), создаваемого центральным магнитом экспериментальной установки. Первый член в выражении для импульсного разрешения соответствует вкладу многократного рассеяния в точность измерения импульсов частиц.

Основные положения, выносимые на защиту. В диссертации показано, что

1. Факторы ядерной модификации, измеренные для легких нейтральных мезонов (π^0 , K_s^0 , η , ω , ϕ) в d+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, в пределах ошибок измерений равны единице в области поперечных импульсов $p_T > 2$ ГэВ/с, что свидетельствует о слабом влиянии эффектов начального состояния на свойства рождающихся частиц, либо об их взаимной компенсации.

2. В центральных Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ выход всех мезонов подавлен в 1.5-5 раз в области поперечных импульсов $p_T > 2$ ГэВ/с относительно выходов тех же частиц, измеренных в p+p столкновениях и отмасштабированных на соответствующее число парных нуклон-нуклонных столкновений. В области больших поперечных импульсов $p_T > 5-7$ ГэВ/с выход всех адронов одинаково подавлен приблизительно в 5 раз. Отсутствие подобного подавления в d+Au и периферийных Au+Au столкновениях, а также отсутствие подавления для “прямых фотонов” в центральных Au+Au

столкновениях при той же энергии взаимодействия³ свидетельствует о том, что подавление происходит в результате энергетических потерь жестко рассеянных партонов в плотной среде, образующейся в центральных столкновениях ультррелятивистских ядер.

3. Эмпирические оценки величины энергетических потерь партонов, основанные на сравнении спектров рождения π^0 - мезонов, измеренных в p+p и Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, показывают, что в центральных столкновениях величина потерь достигает значения 0.2, что соответствует 20 % потере энергии жестко рассеянного партона. Величина потерь зависит от числа участвующих во взаимодействие нуклонов как $N_{\text{участн}}^\alpha$, где: $\alpha = 0.58 \pm 0.07$ при $p_T > 5$ ГэВ/с и $N_{\text{участн}} > 20$; $\alpha = 0.56 \pm 0.10$ при $p_T > 10$ ГэВ/с и $N_{\text{участн}} > 20$. Данные значения параметра α хорошо согласуются со значением $\alpha = 2/3$, предсказываемым моделями PQM⁴ и GLV⁵.

4. Сравнение результатов измерения степени подавления выхода π^0 - мезонов в центральных Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ с предсказаниями трех теоретических моделей (PQM, GLV и WHDG⁶) позволяет оценить значения начальной плотности глюонов dN_g/du и транспортного коэффициента \hat{q} . Соответствующие значения этих величин оказываются равными $\hat{q} = 13.2_{-3.2}^{+2.1}$ ($13.2_{-5.2}^{+6.3}$) в модели PQM, $dN_g/du = 1400_{-150}^{+270}$ (1400_{-290}^{+510}) в модели GLV и $dN_g/du = 1400_{-375}^{+200}$ (1400_{-540}^{+600}) в модели WHDG на уровне одного (двух) среднеквадратичных отклонений. Значения начальной глюонной плотности dN_g/du , соответствующие моделям GLV и WHDG, хорошо согласуются с оценками, полученными из других измерений, например множественности частиц или эллиптического потока⁷. Данные значения также позволяют оценить максимальную начальную плотность энергии в центральных Au+Au взаимодействиях, $\epsilon_0 \approx 20$ ГэВ/фм³. Данное значение на два порядка величины превышает плотность энергии в холодной ядерной материи. Очень большое значение транспортного коэффициента $\langle \hat{q} \rangle$ предполагает, что образующаяся среда наиболее вероятно состоит из сильно взаимодействующих партонов, а не из газа квазисвободных частиц.

³ Adler S.S., Riabov V. et al. Centrality dependence of direct photon production in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions // Phys. Rev. Lett. -2005. -V.94. -P.232301.

⁴ Parton Quenching Model (PQM); Dainese A., Loizides C. Leading-particle suppression in high energy nucleus-nucleus collisions // Eur. Phys. J. C -2005. -V.38. -P.461.

⁵ Модель названа по первым буквам фамилий авторов; Gyulassy M., Levai P., Vitev I. Jet quenching in thin quark gluon plasmas. 1. Formalism // Nucl. Phys. B. -2000. -V.571. -P.197.

⁶ Модель названа по первым буквам фамилий авторов; Wicks S., Horowitz W., Djordjevic M., Gyulassy M. Heavy quark jet quenching with collisional plus radiative energy loss and path length fluctuations // Nucl. Phys. A. -2007. -V.783. -P.493.

⁷ Gyulassy M., McLerran L. New forms of QCD matter discovered at RHIC // Nucl. Phys. A. -2005. -V.750. -P.30.

5. Относительный выход (анти)барионов существенно превышает выход мезонов в области промежуточных поперечных импульсов $1.5 < p_T \text{ (ГэВ/с)} < 4.5$ в центральных Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$. Данный эффект проявляется в трехкратном увеличении отношений выходов p/π и \bar{p}/π с ростом центральности столкновений, а также в существенном различии (3-5 раз) степеней подавления выходов барионов и мезонов в данной кинематической области. Эффекты начального состояния, такие как эффект Кронина, не позволяют описать наблюдаемое различие в выходах (анти)барионов и π -мезонов.
6. Степень подавления выхода ϕ -мезонов в центральных Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ в области промежуточных поперечных импульсов отличается как от более легких π^0 и η -мезонов, так и от (анти)барионов, занимая промежуточное положение (но ближе к легким мезонам, чем к (анти)барионам).
7. В d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ не наблюдается изменений спектральных свойств векторных ω и ϕ -мезонов, которые могли бы ожидать в случае восстановления киральной симметрии. Интегральные выходы ϕ -мезона, измеренные в адронном (K^+K^-) и диэлектронном (e^+e^-) каналах распада в Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$, согласуются в пределах ошибок измерений.
8. Сравнение результатов измерения температур и интегральных выходов ϕ , π и K-мезонов в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ свидетельствует о схожести механизмов рождения странных K-мезонов и ϕ -мезонов, обладающих скрытой странностью. Постоянство температуры при различной центральности столкновений говорит о слабом влиянии радиального коллективного потока на свойства рождающихся ϕ -мезонов, что является следствием малости величины сечения адронных взаимодействий. Результаты измерений также противоречат предсказаниям моделей RQMD и UrQMD⁸, в которых основным механизмом рождения ϕ -мезонов является коалесценция K-мезонов ($K\bar{K} \rightarrow \phi$).
9. Инклюзивные дифференциальные сечения рождения мезонов (π , K, η , ω , η' и ϕ), измеренные в p+p столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 200 \text{ ГэВ}$ в области поперечных импульсов $0.2 < p_T \text{ (ГэВ/с)} < 20$, в пределах статистических и систематических неопреде-

⁸ Bleicher M., Zabrodin E. et al. Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model // J. Phys. G. -1999. -V.25. -P.1859.

ленностей могут быть описаны функцией Леви⁹ при использовании всего девяти параметров. Такая аппроксимация предполагает существование жесткой связи между амплитудами жестких и мягких процессов, а также наличие универсального масштабирования измеренных спектров по поперечной массе. Сечения рождения адронов, измеренные в базовых p+p столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ, могут быть описаны расчетами, выполненными в рамках пертурбативных методов КХД. Это говорит о теоретическом понимании механизмов рождения адронов в области больших поперечных импульсов в нуклон-нуклонных столкновениях и возможности использования высокоэнергетичных частиц в качестве калибровочных пробников при изучении A+A взаимодействий.

10. Относительные выходы легких мезонов (ω/π^0 , ϕ/π^0 , K_s^0/π^0 , η/π^0 и η'/π^0) в p+p взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ в области больших поперечных импульсов $p_T > 2-3$ ГэВ/с слабо зависят от импульса рождающихся частиц. Аппроксимация отношений константой дает значения равные: $\omega/\pi^0 = 0.81 \pm 0.04$ (стат.) ± 0.07 (сист.), $\phi/\pi^0 = 0.16 \pm 0.01$ (стат.) ± 0.02 (сист.), $K_s^0/\pi^0 = 0.45 \pm 0.01$ (стат.) ± 0.05 (сист.), $\eta/\pi^0 = 0.48 \pm 0.02$ (стат.) ± 0.02 (сист.) и $\eta'/\pi^0 = 0.23 \pm 0.01$ (стат.) ± 0.01 (сист.). Измеренные отношения определяют относительные вероятности фрагментации партонов в данный тип мезонов. Измеренные отношения плохо согласуются с предсказаниями генератора событий PYTHIA¹⁰, что свидетельствует о несоответствии параметров модели экспериментальным наблюдениям.

11. Созданные дрейфовые камеры центральной трековой системы эксперимента ФЕНИКС удовлетворяют всем предъявляемым требованиям и обеспечивают высокую эффективность восстановления треков заряженных частиц ($\sim 100\%$) и высокое импульсное разрешение ($\delta p/p \sim 1\% \cdot p$) в специфических условиях, реализуемых на коллайдере RHIC.

Основные выводы диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1. Близость к единице факторов ядерной модификации, измеренных для легких нейтральных π^0 , K_s^0 , η , ω и ϕ - мезонов в d+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области поперечных импульсов $p_T > 2$ ГэВ/с, свидетельствует о слабом влиянии эффектов начального состояния на свойства рождающихся частиц, либо об их взаимной компенсации.
2. Эффект охлаждения струй, экспериментально обнаруженный в центральных Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, говорит об образовании в таких

⁹ Wilk G., Wlodarczyk Z. On the interpretation of the nonextensivity parameter q in Tsallis statistics and levy distributions // Phys. Rev. Lett. -2000. -V.84. -P.2770-2773.

¹⁰ T. Sjostrand, Lonnblad L. et al. PYTHIA 6.2 Physics and Manual // Preprint hep-ph/0108264 -2001. -P.1.

взаимодействиях плотной и горячей ядерной среды, обладающей свойствами, ранее не наблюдаемыми в экспериментах по изучению взаимодействий тяжелых ядер при более низких энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{-}20$ ГэВ. Эффект охлаждения струй возникает в результате энергетических потерь жестко рассеянных партонов при их распространении в образующейся ядерной среде, которая характеризуется высокой начальной глюонной плотностью ($dN_g/du \sim 1400$) и плотность энергии ($\epsilon_0 \sim 20$ ГэВ/фм³) и наиболее вероятно состоящей из сильно взаимодействующих партонов, а не из газа квазисвободных частиц.

3. В ядро-ядерных взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на эксперименте ФЕНИКС не наблюдается признаков восстановления киральной симметрии, которые согласно теоретическим предсказаниям должны проявляться в изменение спектральных свойств легких векторных мезонов, а также в изменение относительных выходов ϕ - мезонов в адронном ($\phi \rightarrow K^+K^-$) и диэлектронном ($\phi \rightarrow e^+e^-$) каналах распада. Полученные в работе экспериментальные данные устанавливают предел на возможные изменения масс и ширины ω и ϕ - мезонов (<1 МэВ/c²) и противоречат предсказаниям ряда теоретических моделей, предполагающих существенные модификации спектральных свойств векторных мезонов.

4. Экспериментальные измерения, выполненные в центральных Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, говорят о том, что:

- в области промежуточных поперечных импульсов $1.5 < p_T$ (ГэВ/c) < 4.5 наблюдается избыточный выход барионов (p и \bar{p});
- в области промежуточных поперечных импульсов степень подавления выхода ϕ - мезонов отличается как от более легких π^0 и η - мезонов, так и от (анти)барионов, занимая промежуточное положение;
- в области больших поперечных импульсов $p_T > 5\text{-}7$ ГэВ/c выход всех адронов (π^0 , η , ω , ϕ , p и \bar{p}) подавлен одинаково приблизительно в 5 раз.

Объяснение обнаруженных эффектов требует введения дополнительных механизмов рождения частиц в области промежуточных поперечных импульсов, отличных от фрагментации. Ряд моделей, гидродинамических и рекомбинационных, позволяют продлить диапазон доминирования мягких процессов в область промежуточных поперечных импульсов $p_T \sim 2\text{-}5$ ГэВ/c. Основное отличие между подходами заключается в том, что гидродинамические модели предполагают зависимость фактора подавления от массы частиц. В рекомбинационных моделях фактор зависит от числа валентных кварков в адроне. Рекомбинационные модели также предполагают образование теплового источника партонов в столкновениях тяжелых ядер на RHIC, что является признаком образования КГП.

Измерение факторов ядерной модификации для ω и ϕ - мезонов, имеющих два валентных кварка и массы близкие к массе протона (бариона), может позволить разделить вклады различных механизмов в рождение адронов. То, что факторы подавления, измеренные для ω и ϕ - мезонов в центральных Au+Au столкновениях, занимают промежуточное положение между более легкими мезонами и барионами, может быть качественно объяснено в рамках гидродинамических и рекомбинационных подходов. При этом остается неопределенным относительный вклад жестких процессов в рождение адронов в области промежуточных поперечных импульсов. Разрешение данной ситуации требует специального теоретического анализа.

5. Созданные дрейфовые камеры центральной трековой системы эксперимента ФЕНИКС удовлетворяют всем предъявляемым требованиям, и позволяют выполнить физическую программу эксперимента ФЕНКИС. Более 80 % всех физических результатов, полученных на эксперименте ФЕНИКС к настоящему времени, были бы недоступны без надежной работы дрейфовой камеры. Конструкция камер является перспективной для использования в других экспериментах в области ядерной физики и физики высоких энергий.

Результаты и выводы диссертации можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в физике атомного ядра и элементарных частиц, связанное с экспериментальным обнаружением эффектов охлаждения струй и избыточного выхода барионов, которые указывают на обнаружение нового типа ядерной материи в столкновениях тяжелых ядер на коллайдере RHIC.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, обуславливается следующим:

1. Измерения свойств адронов были проведены с использованием экспериментальных данных, полученных в ходе различных физических циклов работы коллайдера RHIC. Данные циклы характеризуются различными конфигурациями магнитного поля центрального магнита, а также характеристиками детекторных подсистем, использованных в анализе. Также выход частиц измерялся в различных каналах распада ($\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$ и $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$; $\eta \rightarrow \gamma \gamma$ и $\eta \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$; $K_s^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ и $(K^+ + K^-)/2$; $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ и $(\pi^+ + \pi^-)/2$), характеризующихся различной кинематикой и эффективностью восстановления в экспериментальной установке. Хорошее согласие между результатами измерений, выполненных для различных физических циклов работы коллайдера RHIC и различных каналов распада, свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов.

2. Спектры рождения ϕ - мезонов в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях измерялись в канале распада $\phi \rightarrow K^+ K^-$ в рамках трех различных подходов: с идентификацией двух каонов,

с идентификацией одного каона и без идентификации заряженных частиц. В пределах ошибок измерений результаты, полученные с использованием трех методик, хорошо согласуются друг с другом. Учитывая, что все три метода характеризуются различными источниками систематических ошибок, совпадение результатов является важным подтверждением правильности проведенных измерений.

3. Детальный анализ работы дрейфовых камер на пучке подтверждает правильность решений, принятых на этапе разработки детектора. Камеры полностью удовлетворяют предъявляемым требованиям.

4. Достоверность результатов также подтверждается их апробацией на международных конференциях и достаточным объемом публикаций в реферируемых научных изданиях.

Личное участие автора. Автор данной работы участвовал в разработке, создании и проведении эксперимента ФЕНИКС, а также в физическом анализе экспериментальных данных и их интерпретации. Автор является координатором деятельности 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. Основной вклад автора состоит в следующем:

1. Автор предложил и внес решающий вклад в реализацию нового направления исследований на эксперименте ФЕНИКС, а именно в измерение многочастичных распадов легких мезонов, таких как $\eta \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$, $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$, $\eta' \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-$, $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$ и $K_s^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях. Данное направление позволило значительно расширить число исследуемых частиц и динамическую область измерений.

2. Автор внес определяющий вклад в измерение свойств векторных ω и ϕ - мезонов в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при различных энергиях и центральных столкновениях. Им был предложен и реализован новый метод измерения ϕ - мезонов в области больших поперечных импульсов без полной идентификации частиц в конечном состоянии.

3. Автор внес существенный вклад в измерение свойств π^0 и η - мезонов в канале распада $\pi^0(\eta) \rightarrow \gamma\gamma$ в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях, а также в физическую интерпретацию полученных результатов с целью определения механизмов протекания реакций и свойств среды, образующейся в центральных столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер.

4. Автор внес определяющий вклад в разработку конструкции и проволочной структуры дрейфовых камер, внес существенный вклад в создание, испытание и запуск камер на пучке в составе экспериментальной установки. При определяющем вкладе автора были созданы системы мониторинга и контроля высокого напряжения и свойств газового наполнения

дрейфовых камер, а также их рабочих параметров в ходе эксплуатации. Роль автора в калибровке дрейфовых камер, позволившей достичь проектных рабочих параметров детектора, является решающей.

5. Автор участвовал в экспертной поддержке эксперимента и наборе экспериментальных данных в ходе всех циклов работы коллайдера RHIC.

Апробация результатов работы. Результаты работы обсуждались автором на семинарах Отделения Физики Высоких Энергий ПИЯФ РАН и кафедры “Экспериментальная ядерная физика” ГОУ ВПО СПбГПУ, на семинарах международной коллаборации ФЕНИКС в БНЛ (США). Автор представлял результаты работы от имени коллаборации ФЕНИКС на Всероссийской молодежном форуме “Интеллектуальный потенциал России – в XXI век” (С.-Петербург, Россия, 1995), Wire Chamber Conference (Вена, Австрия, 1998 г.), Quark Matter (Будапешт, Венгрия, 2005 г.), Quark Matter (Шанхай, Китай, 2006 г.), Strange Quark Matter (Левоча, Словакия, 2007 г.), Ядро (Воронеж, Россия, 2007 г.), Научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (Москва, Россия, 2007 г.), Ядро (Москва, Россия, 2008 г.), PANIC (Эйлат, Израиль, 2008).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 18 печатных работ в реферируемых журналах, перечень которых приведен в конце автореферата. В том числе 12 работ из Списка ВАК

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, перечня основных обозначений и сокращений, четырех глав, заключения и перечня цитируемой литературы. Работа содержит 341 страницы машинописного текста, 100 рисунков и 27 таблиц. Перечень цитируемой литературы содержит 410 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность, сформулированы цели, научная новизна и практическая значимость работы. Представлены основные результаты, выводы и положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание основных разделов диссертации.

Первая глава посвящена введению в проблему, дает краткое описание основных процессов и явлений, предсказываемых КХД в условиях, когда взаимодействующая ядерная система достигает высоких температур и/или барионных плотностей. Наибольший интерес из них представляют деконфайнмент партонов и восстановление киральной симметрии. Обсуждается, каким образом высокие температуры и/или барионные плотности могут быть

достигнуты в лабораторных условиях при изучении взаимодействий тяжелых ядер. Приведено описание ускорительного комплекса коллайдера RHIC и характеристик сталкиваемых пучков. Представлено описание возможностей и состав экспериментальной установки ФЕНИКС, одного из двух основных экспериментов на коллайдере RHIC. Обсуждаются основные направления физической программы эксперимента, наиболее близкие к теме проводимых в работе исследований: охлаждение струй, изменение спектральных свойств и относительных выходов легких векторных и псевдоскалярных мезонов, рождение странных частиц и другие.

Во второй главе рассмотрены вопросы разработки, создания, запуска, калибровки и эксплуатации основного детектора трековой системы эксперимента ФЕНИКС - легких фокусирующих дрейфовых камер. Основное предназначение дрейфовых камер заключается в восстановлении треков заряженных частиц и прецизионном измерении их импульсов. Особенности работы детектора заключаются в большой множественности заряженных частиц, достигаемой в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер, а также высокой частоте столкновений в случае протон-протонных взаимодействий. Создание подобного детектора являлось совершенно необходимым для успешного выполнения физической программы эксперимента ФЕНИКС.

В работе анализируются основные требования, предъявляемые к конструкции и проволочной структуре детектора и обусловленные особенностями ядро-ядерных взаимодействий на коллайдере RHIC. Представлено описание методик, использованных для решения поставленных задач, результатов моделирования работы детектора и испытания его прототипов с помощью космических мюонов, а также пучков заряженных частиц на синхрофазотроне в ПИЯФ и синхротроне AGS в БНЛ. Рассматриваются вопросы, связанные с запуском полномасштабных детекторов в составе экспериментальной установки ФЕНИКС, настройки и калибровки детектора.

Внешний вид одной из полностью собранных дрейфовых камер показан на рис. 1а). Детектор имеет большой объем и активную площадь (3 м^3 , 7 м^2). Несущая титановая ферма сверху и снизу закрыта металлизированными майларовыми окнами. Обе камеры заполнены около 20,000 проволоками различного типа. Рабочим газом камеры является смесь Ar и C_2H_6 в равной концентрации компонент с добавлением 1.6 % паров изопропилового спирта, позволяющего повысить стабильность работы и минимизировать эффекты старения детектора. Проволочная структура струйного типа, показанная на рис. 1б), формирует необходимое распределение электрического поля в активной зоне детектора с использованием четырех потенциалов, приложенных к соответствующим электродам (проволокам). Дрейфовые камеры обеспечивают высокую эффективность восстановления

треков заряженных частиц ($\sim 100\%$ в $p+p$, $d+Au$ и периферийных $Au+Au$ взаимодействиях, $\sim 80\%$ в центральных $Au+Au$ взаимодействиях) и высокое импульсное разрешение $\delta p/p \sim 1\%$. Камеры полностью соответствуют предъявляемым требованиям, внесли и продолжают вносить определяющий вклад в выполнение физической программы эксперимента.

а)



б)

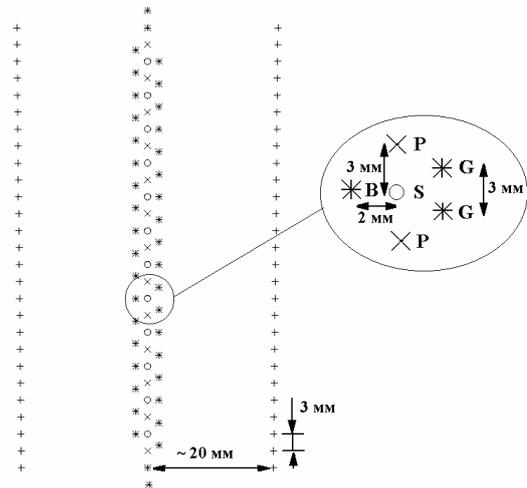


Рис. 1. а) Внешний вид полностью собранной дрейфовой камеры ФЕНИКС.

б) Проволочная структура детектора.

Третья глава посвящена вопросам измерения спектров рождения и свойств легких идентифицированных мезонов в $p+p$, $d+Au$ и $Au+Au$ взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 62, 200$ ГэВ. Данные частицы несут важную информацию о динамике взаимодействия ядер и свойствах среды, образующейся в центральных столкновениях ультррелятивистских тяжелых ядер. Приводится описание разработанных методик контроля качества экспериментальных данных, критериев отбора заряженных и нейтральных частиц, расчета эффективностей триггеров, использованных при наборе данных, анализа экспериментальных данных с целью выделения интересующих сигналов, оценки систематических неопределенностей измерений. Основные сложности проведенных измерений в центральных столкновениях тяжелых ядер связаны с уменьшением эффективности регистрации частиц, необходимостью использования большого числа детекторных подсистем для надежного измерения и идентификации частиц, высокими уровнями комбинаторных фонов, что обусловлено большой множественностью рождающихся частиц.

Представлены новые экспериментальные данные по измерению инклюзивных

спектров рождения легких мезонов (π^0 , K_s^0 , η , η' , ω и ϕ) по поперечному импульсу в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях. Выход всех частиц измерялся при энергии нуклон-нуклонных столкновений равной $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Характеристики ϕ - мезонов дополнительно измерялись при энергии взаимодействия $\sqrt{s_{NN}} = 62$ ГэВ. Во взаимодействиях тяжелых ядер (d+Au и Au+Au) характеристики частиц измерялись при различной центральности ядерных столкновений. Все измерения были выполнены в области малых быстрот $|y| < 0.5$, доступной центральным спектрометрам эксперимента ФЕНИКС.

Выход π^0 - мезонов измерялся в доминирующем канале распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ во всех взаимодействующих системах в области поперечных импульсов $0.3 < p_T$ (ГэВ/c) < 20 . Рождение K_s^0 - мезонов было измерено в p+p и d+Au взаимодействиях в канале распада $K_s^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ при $2.0 < p_T$ (ГэВ/c) < 13 . Выход η - мезонов измерялся в двух каналах распада $\eta \rightarrow \gamma\gamma$, $\eta \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$ в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях в области импульсов $2.5 < p_T$ (ГэВ/c) < 11 . Свойства η' - мезонов изучались в p+p столкновениях в канале $\omega \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ при $3.0 < p_T$ (ГэВ/c) < 13 . Характеристики ω - мезонов измерялись в двух различных каналах распада $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$ и $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$ в p+p, d+Au и Au+Au столкновениях в области импульсов $2.0 < p_T$ (ГэВ/c) < 13 . Выход ϕ - мезонов изучался в двух каналах распада $\phi \rightarrow K^+K^-$ и $\phi \rightarrow e^+e^-$ в p+p, d+Au и Au+Au столкновениях при $1.0 < p_T$ (ГэВ/c) < 7 .

Четвертая глава посвящена обсуждению полученных результатов и их значимости для качественного и количественного описания свойств ядерной материи в условиях высокой температуры, достигаемой в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер на коллайдере RHIC.

Измерения, выполненные в p+p столкновениях, использовались в качестве базовых для сравнения с более тяжелыми взаимодействующими системами. Измерения также использовались для проверки и подстройки сечений взаимодействия и функций фрагментации партонов в рамках пертурбативных методов КХД, применяемых для описания измеренных дифференциальных сечений рождения частиц в области больших поперечных импульсов¹¹. Для примера на рис. 2 представлено сравнение результатов измерения и расчета дифференциального сечения рождения π - мезонов в p+p взаимодействиях при энергии

$\sqrt{s} = 200$ ГэВ. На данном рисунке (и всех последующих рисунках) условные обозначения в виде “усов” и “прямоугольников” соответствуют статистическим и систематическим

¹¹ Aversa F., Chiappetta P. et al., Nucl. Phys. B. -1989. -V.327. -P.105.

ошибкам измерений соответственно. Видно, что в области поперечных импульсов $p_T > 2$ ГэВ/с (область “жестких процессов”) наблюдается хорошее согласие между результатами расчета и измерений. На рисунке также показано, что результаты измерения выхода заряженных пионов $(\pi^+ + \pi^-)/2$ хорошо согласуются с измерениями π^0 - мезонов в области импульсов $p_T < 3$ ГэВ/с. В работе также представлены результаты измерения относительных выходов легких мезонов (ω/π^0 , ϕ/π^0 , K_s^0/π^0 , η/π^0 и η'/π^0) в области больших поперечных импульсов, которые по точности и диапазону измерений не имеют аналогов. Относительные выходы легких мезонов в основном известны только из измерений и определяют относительные вероятности фрагментации партонов в данный тип мезонов. В области импульсов $p_T > 2-3$ ГэВ/с относительные выходы слабо зависят от импульса частиц. Аппроксимация отношений константой дает значения равные: $\omega/\pi^0 = 0.81 \pm 0.04$ (стат.) ± 0.07 (сист.), $\phi/\pi^0 = 0.16 \pm 0.01$ (стат.) ± 0.02 (сист.), $K_s^0/\pi^0 = 0.45 \pm 0.01$ (стат.) ± 0.05 (сист.), $\eta/\pi^0 = 0.48 \pm 0.02$ (стат.) ± 0.02 (сист.) и $\eta'/\pi^0 = 0.23 \pm 0.01$ (стат.) ± 0.01 (сист.). В работе также показано, что спектры рождения мезонов (π , K , η , ω , η' , ϕ), измеренные в эксперименте ФЕНИКС в $p+p$ столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ в области импульсов $0.2 < p_T$ (ГэВ/с) < 20 , могут быть описаны функцией Леви $(E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = \frac{d\sigma}{dy} \frac{(n-1)(n-2)}{2\pi n C [nC + m_0(n-2)]} \cdot (1 + E_{кин}/nC)^{-n})$, как показано на рис. 3.

Близость параметров аппроксимации позволяет описать спектры рождения всех мезонов, используя всего девять параметров, показанных в табл. 1.

Отличие ядро-ядерных взаимодействий $A+B$ от простой суперпозиции нуклон-нуклонных столкновений заключается в присутствии коллективных эффектов, оказывающих влияние на свойства рождающихся частиц. Подобные эффекты в работе изучаются с помощью так называемого фактора ядерной модификации R_{AB} , определяемого как $R_{AB} = (dN/dp_T)_{A+B} \cdot (\langle T_{AB} \rangle \cdot (d\sigma/dp_T)_{p+p})^{-1}$, где функция T_{AB} связана с числом нуклон-нуклонных столкновений как $\langle T_{AB} \rangle = \langle N_{столкн} \rangle / \sigma_{неупр}^{NN}$. Отношения R_{AB} для различных частиц получаются путем деления спектров рождения, измеренных для соответствующих частиц в $p+p$ и $A+B$ взаимодействиях при одной и той же энергии элементарных нуклон-нуклонных столкновений и различной центральности столкновений. Перед делением измеренные спектры нормируются на число парных нуклон-нуклонных столкновений $\langle N_{столкн} \rangle$, соответствующих каждому классу событий. Значения $\langle N_{столкн} \rangle$ определяются путем Монте-Карло моделирования отклика экспериментальной установки с применением модели Глаубера ядро-ядерных взаимодействий. Алгоритм описан в первой главе работы. Для

жестких процессов, являющихся точечными процессами с характерным масштабом расстояний $\sim 1/p_T$, можно предположить, что выход частицы в А+В столкновениях есть величина, пропорциональная произведению выхода частицы в р+р столкновениях и среднего числа парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений. При этом в условиях отсутствия коллективных эффектов А+В взаимодействия являются суперпозицией нуклон-нуклонных столкновений и параметр R_{AB} равен единице. Коллективные ядерные эффекты в начальном и/или конечном состоянии могут нарушать равенство $R_{AB} = 1$. Эффекты начального состояния в области малых быстрот могут быть связаны с мягким многократным перерассеянием (эффект Кронина) и модификацией функций распределения партонов в ядре. Возможные эффекты конечного состояния могут быть связаны с перерассеянием адронов, а также с образованием плотной среды в центральных столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер. Изучение свойств такой среды является основной целью исследований на коллайдере RHIC.

Таблица 1.

Значения параметров функции Леви, обеспечивающие описание дифференциальных сечений рождения мезонов в р+р столкновениях при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ.

Частица	$d\sigma/dy$	C	$n_{Леви}$
π	40.911 ± 3.628	$a + b \cdot m$	$n = 8.043 \pm 0.038,$ $\chi^2/NDF = 7.5/5.$ $n_{Леви} = -n \frac{p_T^2}{(nC - m + m_T)m_T}$ при $p_T = 6$ ГэВ/с.
K	4.958 ± 0.496	$a = 0.113 \pm 0.002$	
η	4.847 ± 0.523	$b = 0.101 \pm 0.004,$	
ω	3.453 ± 0.230	$\chi^2/NDF = 6.4/4$	
η'	0.669 ± 0.038		
ϕ	0.439 ± 0.032		

Из легких сталкивающихся систем, помимо базовых р+р столкновений, в работе рассмотрены d+Au взаимодействия при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. На рис. 4 представлены факторы ядерной модификации, измеренные для π , K , η , ω , ϕ - мезонов, а также (анти)протонов при различной центральности столкновений. Прямоугольники в левой части горизонтальной оси соответствуют неопределенности в нормировке измеренных отношений. Ярко выраженный эффект Кронина¹² наблюдается для заряженных π^\pm - мезонов, p и \bar{p} в

¹² Adler S.S., Riabov V. et al. Nuclear effects on hadron production in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV revealed by comparison with p+p data // Phys. Rev. C. -2006. -V. 74. -P.024904; Identified Charged Particle Spectra and Yields in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. -2004. -V.69. -P.034909.

области поперечных импульсов $p_T > 1.5$ ГэВ/с. Аппроксимация факторов R_{dAu} константой в области импульсов $p_T > 2.0$ (1.6) ГэВ/с дает значения равные 1.17 ± 0.04 (1.56 ± 0.04) для пионов (протонов) в случае центральных столкновений. Похожая зависимость величины эффекта Кронина от типа заряженной частицы и ее поперечного импульса также наблюдалась и при более низких энергиях взаимодействия. Для нейтральных адронов факторы ядерной модификации в пределах ошибок согласуются с единицей, свидетельствуя о слабом влиянии эффектов начального состояния на свойства рождающихся частиц.

Из тяжелых взаимодействующих систем в работе анализируются Au+Au взаимодействия при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 62, 200$ ГэВ. В нижней части рис. 5 показаны факторы ядерной модификации R_{AA} , измеренные для π^0 , η , ω , ϕ - мезонов, а также (анти)протонов в периферийных Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Из рисунка видно, что факторы ядерной модификации, измеренные для различных частиц, в пределах ошибок измерений согласуются с единицей. Это указывает на то, что такие взаимодействия можно рассматривать в виде суперпозиции нуклон-нуклонных столкновений. Некоторое отличие (анти)протонов от остальных частиц может быть связано с более выраженным эффектом Кронина (рис. 4). В верхней части рис. 5 показаны факторы R_{AA} , измеренные в центральных Au+Au столкновениях при той же энергии. Видно, что выходы π^0 и η - мезонов подавлены приблизительно в пять раз, и степень подавления остается постоянной в области поперечных импульсов $p_T > 5$ ГэВ/с. Отсутствие подавления для прямых фотонов, а также близость к единице отношений R_{dA} , измеренных в d+Au взаимодействиях, свидетельствует о том, что подавление выходов адронов с большим поперечным импульсом является эффектом не начального состояния, а происходит в результате формирования чрезвычайно плотной среды в центральных Au+Au столкновениях. Одинаковая степень подавления π^0 и η - мезонов свидетельствует о том, что подавление происходит на партонном уровне.

Обнаруженный эффект подавления выхода адронов с большим поперечным импульсом является уникальным явлением, которое никогда ранее не наблюдалось в эксперименте. До сих пор, при более низких энергиях взаимодействия ядер, наблюдался обратный эффект избыточного выхода адронов, объясняющийся эффектом Кронина. Обнаружение данного эффекта является одним из основных открытий, сделанных на коллайдере RHIC. Наиболее общепринятым объяснением обнаруженного эффекта подавления является процесс энергетических потерь жестко рассеянных партонов в результате упругих перерассеяний и излучения глюонов в плотной среде, образующейся в центральных столкновениях тяжелых ядер. Вследствие того, что спектры рождения адронов по

поперечному импульсу имеют форму степенных функций в области больших поперечных

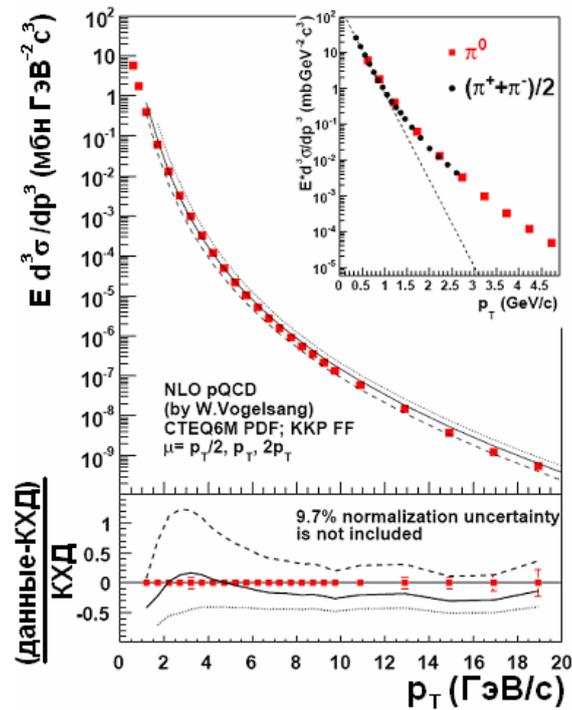


Рис. 2. Сравнение результатов измерения и теоретического расчета в следующем за главным порядке теории возмущений КХД дифференциального сечения рождения π - мезонов в $p+p$ взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ.

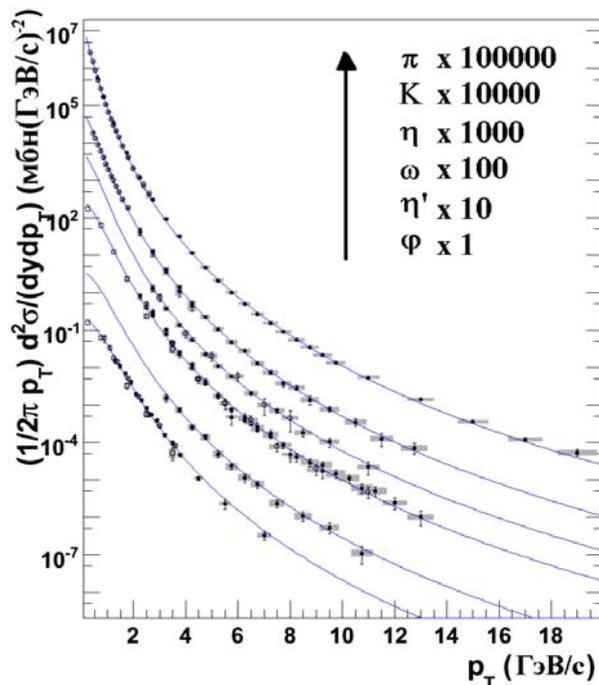


Рис. 3. Дифференциальные сечения рождения мезонов, измеренные в эксперименте ФЕНИКС в $p+p$ столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ.

импульсов, даже небольшое уменьшение энергии фрагментирующего партона может приводить к существенному уменьшению относительного выхода частиц. В данном случае степень подавления выхода адронов зависит как от величины энергетических потерь, так и от формы спектра. Охлаждение струй задолго до запуска коллайдера RHIC рассматривалось как один из признаков образования кварк-глюонной плазмы и связанного с ней деконфайнмента. Однако в недавних теоретических работах утверждается, что энергетические потери партонов чувствительны только к плотности неэкранированных цветовых зарядов и однозначной связи между энергетическими потерями и деконфайнментом не существует.

Как видно из рис. 5 измерения фактора R_{AA} для π^0 - мезонов характеризуются наименьшими неопределенностями и охватывают широкую область поперечных импульсов $2 < p_T \text{ (ГэВ/с)} < 20$. Поэтому целесообразно использовать данные измерения для получения численных оценок величин, характеризующих свойства среды, образующейся в центральных Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$.

Факторы ядерной модификации, измеренные для π^0 - мезонов в Au+Au взаимодействиях при различной центральности столкновений, не зависят от поперечного импульса частиц в области импульсов $p_T > 5 \text{ ГэВ/с}$. Это свидетельствует о том, что спектры рождения, измеренные в p+p и Au+Au взаимодействиях, имеют похожую форму в данной кинематической области. Так, спектр рождения π^0 - мезонов, измеренный в p+p взаимодействиях и показанный на рис. 2, может быть аппроксимирован степенной функцией в области поперечных импульсов $p_T > 3 \text{ ГэВ/с}$: $E \frac{d^3N}{dp^3} \sim \frac{A}{p_T^n}$, где $n = 8.22 \pm 0.09$. В случае Au+Au взаимодействий показатель степени n меняется от $n = 8.00 \pm 0.12$ в центральных столкновениях¹³ (0-5 %) до $n = 8.06 \pm 0.08$ в наиболее периферийных столкновениях (80-92 %). Во всех случаях неопределенности измерения параметра n соответствуют сумме статистических и систематических ошибок. Допустим, что эффект подавления выхода адронов с большим поперечным импульсом в основном обусловлен энергетическими потерями жестко рассеянных партонов. Тогда подавленный спектр в Au+Au взаимодействиях при определенном значении p_T был бы смещен в область больших значений импульса p'_T в неподавленном спектре, измеренном в p+p столкновениях, $p'_T = p_T + S(p_T)$. Если предположить, что энергетические потери пропорциональны p_T , то

¹³ Событие с центральностью $X\%$ означает, что среди всех возможных событий только $X\%$ из них могут иметь больше провзаимодействующих нуклонов, чем данное событие.

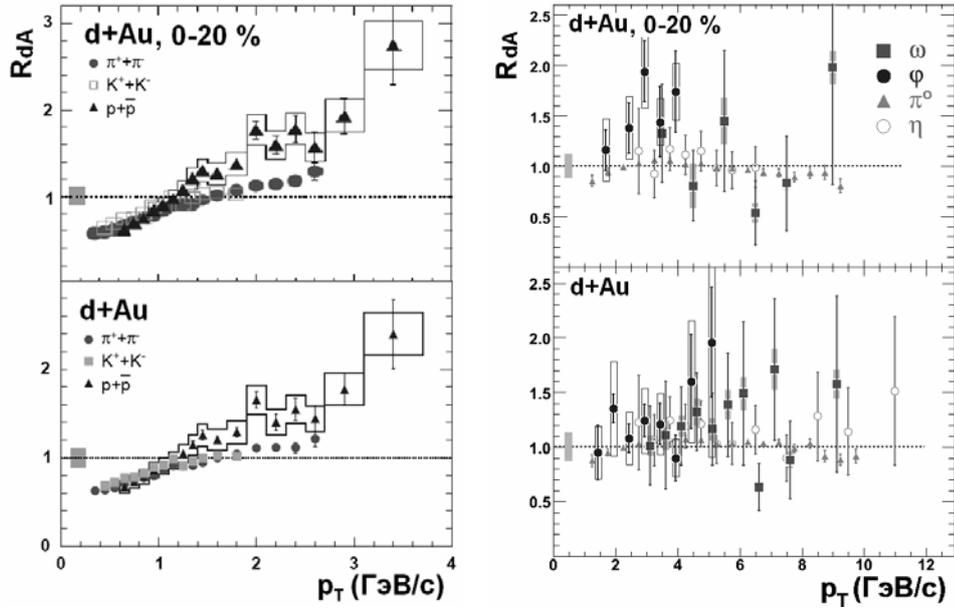


Рис. 4. Факторы ядерной модификации, измеренные для π^\pm , K^\pm , p , \bar{p} (слева) и π^0 , η , ω , ϕ (справа) в d+Au взаимодействиях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Верхние и нижние части рисунка соответствуют различным центральностям столкновений, 0-20% и 0-88%.

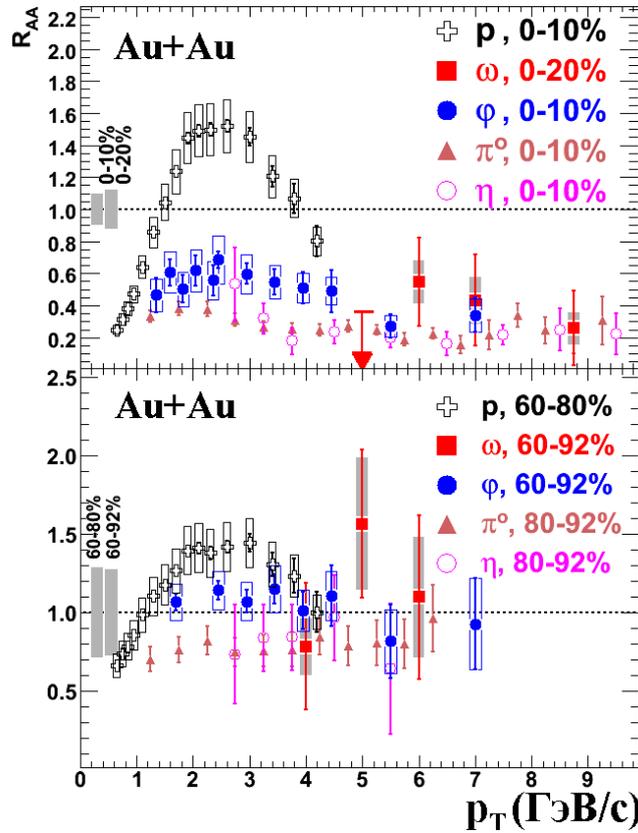


Рис. 5. Факторы ядерной модификации, измеренные для легких адронов в Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

$S(p_T) = S_0 p_T$ и $p_T' = (1+S_0) \cdot p_T$. Тогда фактор ядерной модификации становится равным: $R_{AA}(p_T) = \frac{1}{(1+S_0)^{n-2}}$. Соответственно величина энергетических потерь равна $S_{пот} = \frac{p_T' - p_T}{p_T} = 1 - \frac{1}{1+S_0} = 1 - R_{AA}^{1/(n-2)}$, где $S_0 = \frac{1}{R_{AA}^{1/(n-2)}} - 1$. Согласно полученным оценкам в центральных столкновениях величина энергетических потерь достигает значения 0.2, что соответствует 20 % потере энергии жестко рассеянного партона. Такая величина энергетических потерь позволяет описать измеренный фактор ядерного подавления для π^0 - мезонов в области поперечных импульсов $p_T > 4-5$ ГэВ/с. Величина $S_{пот}$ зависит от центральности как $N_{участн}^\alpha$, где: $\alpha = 0.58 \pm 0.07$ при $p_T > 5$ ГэВ/с и $N_{участн} > 20$; $\alpha = 0.56 \pm 0.10$ при $p_T > 10$ ГэВ/с и $N_{участн} > 20$. Модели PQM и GLV предсказывают значение параметра α равное $\alpha = 2/3$, что согласуется с результатами измерений. Величина S_0 равна $S_0 = (8.3 \pm 3.3) \cdot 10^{-3}$ и $S_0 = (9.2 \pm 4.9) \cdot 10^{-3}$ в области поперечных импульсов $p_T > 5$ ГэВ/с и $p_T > 10$ ГэВ/с соответственно.

Сравнение результатов измерения фактора ядерной модификации для π^0 - мезона с предсказаниями теоретических моделей, таких как PQM, GLV и WHDG, позволяет оценить значения начальной глюонной плотности dN_g/dy и транспортного коэффициента \hat{q} , равного квадрату импульса, переданного средой партону на единице длины его пробега. Данные величины являются свободными параметрами соответствующих моделей. В диссертации представлено краткое описание теоретических моделей, анализируются их основные отличия. Фактор ядерной модификации, измеренный для π^0 - мезонов в наиболее центральных Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, показан на рис. 6 в зависимости от поперечного импульса частиц. Кривые на рисунке соответствуют предсказаниям трех моделей при различных значениях входных параметров. Метод сравнения результатов расчета и измерений учитывает статистические и систематические неопределенности измерений. Результирующие значения транспортного коэффициента $\langle \hat{q} \rangle$ и начальной глюонной плотности dN_g/dy , обеспечивающие наилучшее описание экспериментальных измерений, показаны в табл. 2. Поскольку в расчетах не учитываются неопределенности модельных предположений, связанные с описанием временной эволюции взаимодействующей системы, аппроксимацией энергетических потерь и т.д., результаты оценок содержат только ошибки, связанные с ограниченной точностью экспериментальных измерений. Значения начальной глюонной плотности dN_g/dy хорошо согласуются с оценками, полученными из других измерений, например множественности частиц или

эллиптического потока. Данные значения также позволяют оценить максимальную начальную плотность энергии, достигаемую в центральных Au+Au взаимодействиях, $\epsilon_0 \approx 20$ ГэВ/фм³. Такая плотность на два порядка превышает плотность энергии в холодной ядерной материи. Очень большое значение транспортного коэффициента $\langle \hat{q} \rangle$ предполагает, что образующаяся среда вероятнее всего состоит из сильно взаимодействующих партонов, а не из газа квазисвободных частиц.

Результаты экспериментальных измерений, представленные на рис. 5, говорят о том, что сравнительно простая картина энергетических потерь жестко рассеянных партонов не позволяет описать факторы подавления, измеренные для различных адронов во всем динамическом диапазоне. Как уже отмечалось, выходы π^0 и η - мезонов подавлены в пять раз, и степень подавления остается постоянной вплоть до очень больших значений поперечного импульса. Измерения для более тяжелых ω и ϕ - мезонов, имеющих массы близкие к массе протона, указывают на меньшую степень подавления. Подобное различие в поведении легких и более тяжелых мезонов может быть связано с различием в массах частиц, а также их кварковых составов.

Таблица 2.

Значения транспортного коэффициента $\langle \hat{q} \rangle$ и начальной глюонной плотности dN_g/dy , обеспечивающие наилучшее описание экспериментальных измерений в рамках моделей PQM, GLV и WHDG.

Модель	Параметр	Неопределенность (1 σ)	Неопределенность (2 σ)
PQM	$\langle \hat{q} \rangle = 13.2$	+2.1 -3.2	+6.3 -5.2
GLV	$dN_g/dy = 1400$	+270 -150	+510 -290
WHDG	$dN_g/dy = 1400$	+200 -375	+600 -540

В области промежуточных поперечных импульсов $1.5 < p_T$ (ГэВ/с) < 4.5 также наблюдается большая разница в относительных выходах мезонов и (анти)барионов, в данном случае $(p + \bar{p})/2$. Степень подавления выхода (анти)барионов и легких мезонов в данной области поперечных импульсов отличается в 3-5 раз. Данный эффект также хорошо виден на рис. 7, где показаны отношения выходов p/π и \bar{p}/π , измеренные в Au+Au взаимодействиях при различной центральности столкновений. Из рисунка видно, что отношение выхода (анти)барионов к мезонам увеличивается примерно в три раза по мере роста центральности Au+Au столкновений. При этом в периферийных Au+Au столкновениях поведение барионов и мезонов практически идентично. Сравнение факторов R_{AA} для

неидентифицированных адронов $(h^+ + h^-)/2$ и π^0 - мезонов показывает, что в области поперечных импульсов $p_T > 5-7$ ГэВ/с столь яркое различие между мезонами и (анти)барионами уменьшается и постепенно исчезает¹⁴. Открытие подобного различия в поведении (анти)барионов и мезонов является одним из наиболее важных результатов, полученных на коллайдере RHIC при изучении Au+Au взаимодействий. Данный эффект никогда ранее не наблюдался в столкновениях тяжелых ядер и никогда не предсказывалось теоретиками.

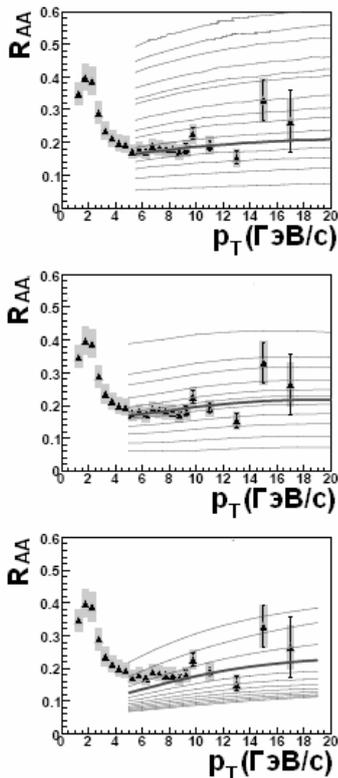


Рис. 6. Сравнение результатов измерения фактора R_{AA} для π^0 - мезонов в центральных (0-5 %) Au+Au столкновениях с результатами расчетов в рамках моделей PQM, GLV и WHDG.

Теоретические кривые соответствуют различным значениям входных параметров:

PQM (сверху), $\langle \hat{q} \rangle = 0.3, 0.9, 1.2, 1.5, 2.1, 2.9, 4.4, 5.9, 7.4, 10.3, 13.2, 17.7, 25.0, 40.5, 101.4$ ГэВ²/(с²фм);

GLV (в центре), $dN_g/dy = 600, 800, 900, 1050, 1175, 1300, 1400, 1500, 1800, 2100, 3000, 4000$;

WHDG (снизу), $dN_g/dy = 500, 800, 1100, 1400, 1700, 2000, 2300, 2600, 2900, 3200, 3500, 3800$.

В рамках пертурбативной КХД отношения p/π и \bar{p}/π в области больших поперечных импульсов ($p_T > 2$ ГэВ/с) определяются фрагментацией высокоэнергетичных партонов, и не зависят от взаимодействующей системы. Подтверждением данного утверждения является согласие результатов измерения отношений p/π и \bar{p}/π в p+p столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 53$ ГэВ, в e^+e^- взаимодействиях и периферийных Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Большая разница в относительных выходах легких мезонов и барионов также не может быть объяснена влиянием лишь эффекта Кронины. Из рис. 5 видно, что в области импульсов ~ 3 ГэВ/с степень подавления частиц

¹⁴ Adler S.S., Riabov V. et al. High- p_T charged hadron suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. -2004. -V.69. -P.034910.

различается более чем в 3-5 раз. С другой стороны из измерений в d+Au взаимодействиях известно, что асимметрия в выходе протонов и мезонов не превышает 30-50 % (рис. 4). Поэтому можно предположить, что эффекты начального состояния не способны объяснить асимметрию, обнаруженную в выходе мезонов и (анти)протонов в центральных Au+Au взаимодействиях в области промежуточных поперечных импульсов.

Для объяснения эффектов избыточного выхода барионов, а также различия факторов подавления для легких и более тяжелых мезонов требуется введение дополнительных механизмов рождения частиц отличных от фрагментации. Ряд моделей, гидродинамических и рекомбинационных, позволяют продлить диапазон доминирования мягких процессов в область промежуточных поперечных импульсов 2-5 ГэВ/с. Основное отличие между подходами заключается в том, что гидродинамические модели предполагают зависимость фактора R_{AA} от массы частиц. В рекомбинационных моделях R_{AA} зависит от числа валентных кварков в адроне. Тем не менее, в настоящее время не существует модели, которая бы позволяла в полной мере описать всю совокупность наблюдаемых в эксперименте эффектов. Результаты измерений требуют дальнейшего теоретического изучения.

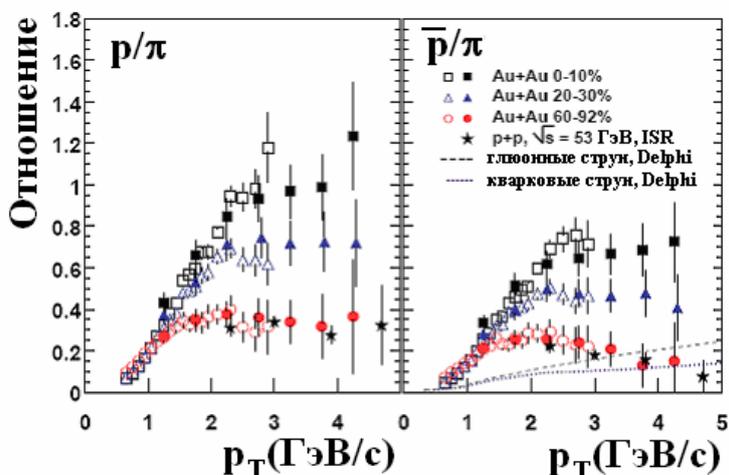


Рис. 7. Отношения p/π и \bar{p}/π , измеренные в Au+Au взаимодействиях при различной центральности столкновений, 0-10 %, 20-30 % и 60-92 %. Заполненные и пустые маркеры соответствуют случаям, когда в качестве делителя используются результаты измерения

выхода π^\pm или π^0 .

Измерения спектральных свойств векторных ω и ϕ - мезонов, а также относительных выходов ϕ - мезона в адронном ($\phi \rightarrow K^+K^-$) и дилептонном ($\phi \rightarrow e^+e^-$) каналах распада используются в работе для поиска возможных признаков восстановления киральной

симметрии, которое согласно расчетам КХД на решетке должно сопровождать фазовый переход. Легкие векторные мезоны обладают малыми временами жизни равными $\tau = 1.3$ фм/с, $\tau = 23$ фм/с и $\tau = 46$ фм/с для ρ , ω и ϕ - мезонов соответственно. Их распады могут происходить во времена, когда взаимодействующая система все еще находится в исследуемом фазовом состоянии ($\tau \sim 10$ фм/с), и нести отпечаток воздействия среды на параметры частиц. Ряд теоретических моделей предсказывает, что спектральные свойства векторных мезонов, такие как масса и ширина, могут быть подвержены изменениям в условиях высокой плотности и температуры, а сами изменения могут служить важными сигналами восстановления киральной симметрии. Особый интерес к ϕ - мезону также обусловлен тем, что его масса лишь немногим больше массы двух К - мезонов ($\Delta m \sim 32.6$ МэВ/с²). Поэтому даже небольшие изменения в спектральных свойствах ϕ или К - мезонов могут повлиять на относительный выход ϕ - мезонов в K^+K^- и e^+e^- каналы распада. Уникальное свойство эксперимента ФЕНИКС заключается в возможности измерения как лептонных, так и адронных распадов легких векторных мезонов. Поиск возможных модификаций базовых параметров легких векторных мезонов входит в физическую программу многих экспериментов, предназначенных для изучения $p+A$ и $A+A$ взаимодействий при различных энергиях. В работе представлен обзор современного состояния дел в данной области исследований. На рис. 8 представлены результаты измерения местоположения максимума и ширины пика ϕ - мезона в спектрах инвариантной массы двух каонов K^+K^- , измеренных в $d+Au$ и $Au+Au$ взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Данные параметры измерялись в зависимости от центральности столкновений. При определении параметров использовались интегральные инвариантные спектры двух каонов K^+K^- , полученные после вычитания комбинаторного фона. Доминирующий вклад в инвариантные спектры вносят распады мягких ϕ - мезонов ($p_T \sim 1$ ГэВ/с), наиболее чувствительных к возможным изменениям спектральных параметров. Статистические ошибки измерений показаны усами. Систематические неопределенности измерений показаны либо прямоугольниками в верхней части, либо горизонтальными линиями в нижней части рисунка. Как видно из рисунка, измеренные значения массы и ширины ϕ - мезона в пределах ошибок измерений согласуются со свойствами мезона, измеренными в вакууме¹⁵. Данные измерения противоречат предсказаниям ряда теоретических моделей, предполагающих существенные модификации массы и/или ширины ϕ - мезона. Измерение массы и ширины пика ϕ - мезона в $d+Au$ столкновениях также вводит ограничения на возможные эффекты холодной ядерной среды на спектральные свойства ϕ - мезона, наблюдаемые в канале

¹⁵ Eidelman S., Hayes K.G. et al. Review of particle physics // Phys. Lett. B -2004. -V.592. -P.1.

распада $\phi \rightarrow K^+K^-$. В работе также представлены результаты измерения массы ω - мезона в зависимости от поперечного импульса частицы в канале распада $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$ в p+p и d+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Как и в предыдущем случае в пределах ошибок измерений восстановленная масса ω - мезона хорошо согласуется с табличным значением. Проведенные измерения массы ω - мезона демонстрируют возможности экспериментальной установки и устанавливают предел на изменение массы ω - мезона в имеющемся диапазоне измерений 2-10 ГэВ/с.

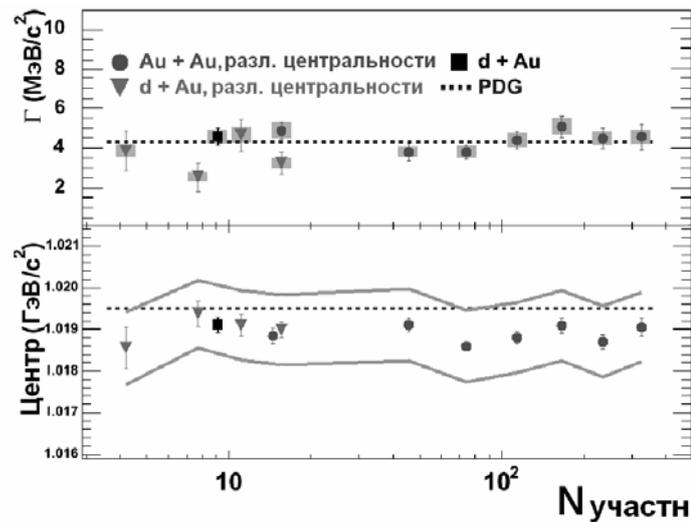


Рис. 8. Ширина (сверху) и положение максимума (снизу) пика ϕ - мезона в спектрах инвариантной массы двух каонов K^+K^- , измеренных в d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и различной центральности столкновений.

Измеренные спектры рождения ϕ - мезонов также использовались для определения температуры и интегрального выхода частиц в p+p, d+Au и Au+Au взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 62, 200$ ГэВ. Параметры измерялись в зависимости от центральности столкновений. В работе показано, что интегральный выход ϕ - мезонов, приходящийся на пару взаимодействующих нуклонов, возрастает приблизительно в два раза при переходе от p+p столкновений к центральным Au+Au взаимодействиям при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Похожая тенденция сохраняется и при меньшей энергии взаимодействия $\sqrt{s_{NN}} = 62$ ГэВ. При этом температура практически не зависит от размера взаимодействующей системы и лишь немного увеличивается при переходе к более высокой энергии взаимодействия. В пределах достаточно больших неопределенностей в измерение интегрального выхода ϕ - мезона в

диэлектронном канале распада не наблюдается различий в выходах ϕ - мезонов в e^+e^- и K^+K^- каналах распада. Таким образом, при достигнутых точности и диапазоне измерений на эксперименте ФЕНИКС не наблюдается признаков изменения спектральных свойств легких векторных мезонов, которые могли бы быть связаны с восстановлением киральной симметрии во взаимодействиях тяжелых ультрарелятивистских ядер.

Сравнение температур и интегральных выходов, измеренных для π , K и ϕ - мезонов в $p+p$, $d+Au$ и $Au+Au$ взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, используется в работе для изучения механизмов рождения частиц. В элементарных $p+p$ столкновениях рождение ϕ - мезона подавлено вследствие действия правила Okubo-Zweig-Iizuka. В столкновениях релятивистских тяжелых ядер наблюдается существенное увеличение выхода ϕ - мезонов по сравнению с $p+p$ столкновениями. Природа данного эффекта пока не достаточно хорошо понята. В ряде моделей, таких как RQMD и UrQMD, основным механизмом рождения ϕ - мезонов является коалесценция K - мезонов ($K\bar{K} \rightarrow \phi$). При этом предсказывается, что отношение ϕ/K должно увеличиваться с ростом центральности столкновений. Кроме того, ϕ - мезон обладает малым сечением адронных взаимодействий и покидает область взаимодействия преимущественно без перерасеяния с вторичными адронами. Все это делает ϕ - мезон привлекательным объектом для изучения механизмов рождения частиц.

В работе показано, что отношение ϕ/π не испытывает существенных изменений и остается постоянным в независимости от центральности $Au+Au$ взаимодействий. Подобное поведение отношения ϕ/π сильно отличается от того, что наблюдалось при более низких энергиях взаимодействия $\sqrt{s_{NN}} = 4-20$ ГэВ. Отношение ϕ/π при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ резко увеличивается при переходе от $p+p$ и $d+Au$ столкновений к периферийным $Au+Au$ взаимодействиям. Подобный скачок не наблюдается в отношении K/π . Отношение ϕ/K также не претерпевает существенных изменений с увеличением центральности столкновений, что находится в противоречии с предсказанием моделей RQMD и UrQMD, в которых предполагается, что 60-70 % ϕ - мезонов рождается в результате рекомбинации каонов в конечном состоянии и в которых отношение ϕ/K непрерывно увеличивается с возрастанием центральности столкновений. Постоянство отношения ϕ/K свидетельствует о малом различии между механизмами рождения странных K - мезонов и ϕ - мезонов, обладающих скрытой странностью. Показано, что относительный выход ϕ - мезонов возрастает более чем в 10 и 2 раза при переходе от энергии AGS и SPS к энергии RHIC. Измеренные значения температуры возрастают в 1.5-2 раза при переходе от AGS и SPS к RHIC. Постоянство температуры, измеренной в $p+p$, $d+Au$ и $Au+Au$ взаимодействиях при различной

центральности столкновений, свидетельствует о слабом влиянии радиального потока на форму спектров рождения ϕ - мезона, что не характерно для других адронов, таких как π^\pm , K^\pm , p и \bar{p} . Такое отличие в поведении ϕ - мезонов возникает вследствие малого сечения их взаимодействия с окружающим адронной средой. В этом случае из-за большой длины пробега ϕ - мезоны могут покидать зону взаимодействия до полного развития радиального коллективного потока. При этом характеристики ϕ - мезонов должны слабо зависеть от адронных процессов, происходящих на конечных стадиях реакций, что опять же противоречит предсказаниям модели RQMD.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

Основные публикации, содержащие результаты диссертационной работы:

1. Riabov V.G. Drift chambers for the PHENIX central tracking system // Nucl. Instr. Meth. -1998. -V.419. -P.363-369.
2. Adcox K, Riabov V. et al. PHENIX detector overview // Nucl. Instr. Meth. -2003. -V.499. -P.469-479.
3. Adcox K., Riabov V. et al. PHENIX central arm tracking detectors // Nucl. Instr. Meth. -2003. -V.499. -P.489-507.
4. **Adler S.S., Riabov V. et al. Absence of suppression in particle production at large transverse momentum in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV d+Au collisions // Phys. Rev. Lett. -2003. -V.91. -P.072303.**
5. **Adler S.S., Riabov V. et al. Suppressed π^0 production at large transverse momentum in central Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. -2003. pV.91. -P.072301.**
6. **Adler S.S., Riabov V. et al. Scaling properties of proton and antiproton production in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions // Phys. Rev. Lett. -2003. -V.91. -P.172301.**
7. **Adler S.S., Riabov V. et al. Production of ϕ - mesons at mid-rapidity in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at RHIC // Phys. Rev. C. -2005. -V.72. -P.014903.**
8. Ryabov V. First measurement of the omega-meson production at RHIC by PHENIX // Nucl. Phys. A. -2006. -V.774. -P.774-738.
9. **Adler S.S., Riabov V. et al. Common suppression pattern of high p_T η and π^0 in Au+Au at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. -2006. -V.96. -P.202301.**
10. **Adler S.S., Riabov V. et al. Production of omega meson at large transverse momenta in p+p and d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. -2007. -V.75. -P.051902.**

11. Adler S.S., Riabov V. et al. High transverse momentum η -meson production in p+p, d+Au and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. -2007. -V.75. -P.024909.
12. Adare A., Riabov V. et al. Inclusive cross section and double helicity asymmetry for π^0 production in p+p collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV // Phys. Rev. D. -2007. -V.76. -P.051106.
13. Riabov V. Measurement of the multi-hadron decays of omega, K_s^0 and η -mesons in heavy ion collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV in the PHENIX experiment at RHIC // Int. J. Mod. Phys. E. -2007. -V.16. -P.1864-1869.
14. Riabov V. Measurement of the light mesons by the PHENIX experiment at RHIC // J. Phys. G. -2008. -V.35. -P.044030.
15. Adare A., Riabov V. et al. Suppression pattern of neutral pions at high transverse momentum in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and constraints on medium transport coefficients // Phys. Rev. Lett. -2008. -V.101. -P.232301.
16. Adare A., Riabov V. et al. Quantitative constraints on the transport properties of the hot partonic matter from semi-inclusive single high transverse momentum pion suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. C. -2008. -V.77. -P.064907.
17. Иванищев Д.А., Рябов В.Г. и др. Измерение легких скалярных мезонов через многочастичные каналы распада на эксперименте ФЕНИКС // Известия РАН. Серия физическая, -2008. -V.72. -P.766-772.
18. Иванищев Д.А., Рябов В.Г. и др. Рождение легких векторных мезонов в ядроядерных столкновениях на ускорителе RHIC, измеренное спектрометром PHENIX // Известия РАН. Серия физическая, -2008. -V.72. -P.1592-1598.