

На правах рукописи

**Жарко Сергей Вячеславович**

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ  
МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР МЕДИ И  
ЗОЛОТА ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГЭВ**

Специальность 01.04.16 —  
«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2020

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

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

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

**Лохтин Игорь Петрович**,  
доктор физико-математических наук,  
НИИЯФ МГУ,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «13» апреля 2020 г. в 12 час., 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук» по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук» и на сайте <https://lebedev.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.023.04.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года.

Телефон для справок: +7 (499) 132-65-54.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 002.023.04,  
д-р физ.-мат. наук

Баранов Сергей Павлович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Кварк-глюонная плазма (КГП) – это состояние квантово-хромодинамической (КХД) материи при значениях температуры,  $T \gtrsim 155 \text{ МэВ}$ , в котором кварки и глюоны (партоны) находятся в состоянии асимптотической свободы (деконфайнмента). Указания на возможность фазового перехода КХД-материи в состояние КГП при увеличении температуры впервые были представлены Э.В. Шурыком в 1980 г. Начиная с 2005 г., опытное наблюдение КГП неоднократно проводилось в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер ( $A+A$ ) на Коллайдере релятивистских тяжелых ионов (RHIC, БНЛ) при максимальной энергии в системе центра масс в пересчете на один нуклон,  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ . Позже, факт рождения КГП подтвердился на Большом адронном коллайдере (LHC, ЦЕРН) в столкновениях ядер свинца при максимальной  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ ТэВ}$ .

Среди различных проявлений КГП в  $A+A$  выделен эффект гашения адронных струй, который проявляется в уменьшении выхода адронов в  $A+A$  по сравнению с нормированным выходом адронов в протон-протонных столкновениях ( $p+p$ ). Данный эффект является следствием энергетических потерь в кварк-глюонной среде партонов, рожденных в результате процессов глубоко-неупругого рассеяния (далее, жестких партонов). Эффект гашения адронных струй и механизмы взаимодействия партонов с кварк-глюонной средой могут быть объяснены с помощью феноменологических моделей, использующих опытные результаты анализа ядерной модификации спектров различных адронов для определения своих внутренних параметров.

Основным инструментом изучения эффекта гашения адронных струй является исследование особенностей рождения легких мезонов (например,  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $K_S$ ,  $\omega$ ) в  $A+A$ , измерение которого может быть проведено в широком диапазоне поперечного импульса (при  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$  до значений порядка  $20 \text{ ГэВ}/c$ ) с относительно небольшой неопределенностью измерений. Особенно интересно провести измерение рождения мезонов различного типа в рамках одной системы  $A+A$  для изучения зависимости эффекта гашения адронных струй от таких характеристик, как масса покоя, спин, странность и т.д. Например,  $\pi^0$ -мезоны обладают нулевым спином (являясь псевдоскалярами) и состоят из кварков первого поколения ( $u$  и  $d$ );  $\eta$ -мезоны обладают теми же спином и проекцией изоспина, что и  $\pi^0$ -мезоны, но при этом содержат странный кварк и обладают втрое большей массой покоя по сравнению с  $\pi^0$ -мезонами;  $K_S$ -мезоны имеют массу, близкую к массе  $\eta$ -мезона, но являются странными;  $\omega$ -мезоны так же, как и  $\pi^0$  состоят из кварков первого поколения, но при этом являются векторными частицами, обладающими единичным спином.

Использование различных А+А систем является особенностью экспериментов на RHIC, позволяющей провести исследование свойств КПП в зависимости от начальных параметров ядро-ядерного взаимодействия. Ранее на RHIC спектры рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов были измерены в симметричных А+А системах: столкновениях ядер золота (Au+Au) и ядер меди (Cu+Cu) при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Особый интерес для изучения свойств КПП представляет несимметричная система столкновений ядер меди и золота (Cu+Au) при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, которая характеризуется особой геометрией перекрытия взаимодействующих ядер, отличной от геометрии симметричных Au+Au и Cu+Cu систем. В центральных Cu+Au столкновениях ядро меди полностью поглощается ядром золота, что приводит к уменьшению числа нуклон-нуклонных взаимодействий в области «короны» (нуклоны из которой испытывают однократные взаимодействия). Область перекрытия ядер в полу-центральных Cu+Au столкновениях обладает дополнительной асимметрией в направлении, соединяющем центры взаимодействующих ядер, что дает уникальную возможность провести сравнение свойств двух кварк-глюонных сред, соответственно, полученных в Au+Au/Cu+Cu и Cu+Au и обладающих одинаковым объемом, но различной формой.

Таким образом, настоящая работа, посвященная исследованию особенностей рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, актуальна и является важной составляющей систематического исследования свойств КПП.

**Целью** данной работы является экспериментальное изучение рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

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

1. Разработать методику измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в эксперименте PHENIX.
2. Измерить инвариантные спектры рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
3. Измерить отношения выходов мезонов:  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
4. Измерить факторы ядерной модификации,  $R_{AA}$ ,  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

### **Научная новизна:**

1. Разработана методика измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в эксперименте PHENIX.

2. Впервые измерены инвариантные спектры рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -мезонов в семи классах центральности и  $\eta$ -,  $K_S$ -,  $\omega$ -мезонов в пяти классах центральности Cu+Au столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
3. Впервые получены отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$ ,  $\omega/\pi^0$  в пяти классах центральности Cu+Au столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
4. Впервые получены факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -мезонов в семи классах центральности и  $\eta$ -,  $K_S$ -,  $\omega$ -мезонов в пяти классах центральности Cu+Au столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

### **Практическая значимость**

1. Разработанная в диссертации методика измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов может быть адаптирована для получения выхода этих мезонов с помощью электромагнитного калориметра в других системах сталкивающихся ядер, а также измерения выхода мезонов в цепочках распада, содержащих в конце  $\gamma$ -кванты в экспериментах на RHIC (БНЛ), LHC (ЦЕРН) и NICA (Дубна).
2. Величины измеренных отношений  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$ ,  $\omega/\pi^0$  могут быть использованы для моделирования процессов фрагментации адронов в ряде Монте-Карло генераторов, например, HIJING, PYQUEN, JEWEL, YAJEM и др.
3. Анализ полученных значений факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ позволит получить дополнительные ограничения параметров для ряда феноменологических моделей, описывающих потери энергии партонов в кварк-глюонной среде, например, DGLV-CUJET, HT-BW, HT-M, McGill-AMY, MARTINI, LBT, SCET, PYQUEN, JEWEL, YAJEM и др.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
2. Инвариантные спектры рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
3. Отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$ ,  $\omega/\pi^0$  в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ:
  - а) отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$ ,  $\omega/\pi^0$  в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ не зависят от центральности в пределах неопределенности измерений;
  - б) аппроксимация константой в области  $p_T > 4$  ГэВ/с дает значения отношений  $R_{\eta/\pi^0} = 0.48-0.52$ ,  $R_{K_S/\pi^0} = 0.41-0.50$ ,  $R_{\omega/\pi^0} = 0.75-0.89$  в разных классах центральности Cu+Au столкновений;
  - в) отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$ ,  $\omega/\pi^0$  в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ равны в пределах неопределенности

отношениям тех же мезонов, измеренным ранее в  $e^+e^-$ ,  $hh$ ,  $hA$ ,  $AA$  столкновениях.

4. Факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в  $Cu+Au$  столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ:
- а) В разных классах центральности  $Cu+Au$  столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ - мезонов равны между собой в пределах неопределенности в разных интервалах поперечного импульса и равны в пределах неопределенности факторам ядерной модификации адронных струй в области  $p_T > 10$  ГэВ/с. Это говорит о том, что подавление адронов в  $Cu+Au$  столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ происходит на партонном уровне до фрагментации;
  - б) В центральных  $Cu+Au$  столкновениях выход  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов подавлен по сравнению с  $p+p$  примерно в два раза в области  $p_T = 4-10$  ГэВ/с, в области больших значений  $p_T$  степень подавления слабо уменьшается с ростом поперечного импульса;
  - в) Факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов равны в пределах неопределенности измерений среди  $Cu+Au$ ,  $Au+Au$  и  $Cu+Cu$  столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и близких значениях  $N_{уч.}$  во всем диапазоне поперечного импульса.

**Достоверность.** Методика измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в  $Cu+Au$  столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ разработана на основе методических указаний, принятых в коллаборации PHENIX. Для измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в  $Cu+Au$  столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ использовались различные модификации методики. Выход  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов измерен независимо в различных подсистемах электромагнитного калориметра. Результаты обсуждались на семинарах коллаборации PHENIX и международных конференциях: «HSQCD 2016» (Гатчина, РФ), «Hard Probes 2016» (Ухань, Китай), «PhysicA.SPb 2016» (Санкт-Петербург, РФ), «Quark Matter 2017» (Чикаго, США), «ЯДРО 2017» (Алматы, Казахстан), «PhysicA.SPb 2017», (Санкт-Петербург, РФ), «ЯДРО 2018» (Воронеж, РФ), «PhysicA.SPb 2018» (Санкт-Петербург, РФ). Результаты опубликованы в рецензируемых журналах баз ВАК и SCOPUS/WebOfScience.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на: международной конференции «HSQCD 2016» (Гатчина, РФ), международной конференции «Hard Probes 2016» (Ухань, Китай), «PhysicA.SPb 2016» (Санкт-Петербург, РФ), «Quark Matter 2017» (Чикаго, США), «ЯДРО 2017» (Алматы, Казахстан), «PhysicA.SPb 2017»

(Санкт-Петербург, РФ), «ЯДРО 2018» (Воронеж, РФ), «PhysicA.SPb 2018» (Санкт-Петербург, РФ).

Кроме того, результаты работы были доложены на университетских конференциях «Неделя науки СПбПУ» (2016–2018 гг.) (Санкт-Петербург, РФ), а также на школах «51-я зимняя школа ПИЯФ 2017», «53-я зимняя школа ПИЯФ 2019» (Роцино, РФ).

**Личный вклад.** Автор внес определяющий вклад в разработку методики измерений, работу по отбору и анализу данных, моделированию, созданию программ для анализа данных, получению физического результата и оценке систематических неопределенностей измерений. Кроме того, автор внес определяющий вклад в написание статьи [1] от коллаборации PHENIX.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 публикациях [1–11], индексированных в базах Web-of-Science/SCOPUS и рекомендованных ВАК.

## Содержание работы

Диссертация состоит из введения, основной части и заключения. Основная часть состоит из четырех глав. Объем диссертации составляет 136 страниц, 55 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 150 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, поставлены ее цели и задачи, показана практическая значимость и новизна, сформулированы основные положения, выносимые на защиту диссертации, а также отражен личный вклад автора в работу и приведено краткое содержание глав основной части.

В **первой главе** основной части кратко изложены базовые положения физики столкновений ультрарелятивистских тяжелых ядер; кратко описаны проблемы деконфайнмента КХД-материи и фазового перехода между КГП и адронным газом; приведены описание геометрии и принципиальная схема эволюции ядро-ядерных взаимодействий; приведены основные наблюдаемые признаки рождения КГП в столкновениях тяжелых ядер; рассмотрены основные результаты, полученные в экспериментах на RHIC и LHC, в том числе результаты измерения факторов ядерной модификации адронов в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер (Au+Au, Cu+Cu, Pb+Pb).

Во **второй главе** приведено описание коллайдера релятивистских тяжелых ионов RHIC и основных детекторных подсистем спектрометра PHENIX; приведено описание триггеров реального времени, используемых для получения выборок данных; приведены конструкционные особенности системы электромагнитных калориметров, используемых для регистрации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов.

В третьей главе описана методика измерения инвариантных спектров рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов; приведено описание подготовки выборок данных к физическому анализу, полученных в цикле Cu+Au столкновений; обоснован выбор критериев отбора данных; приведено описание измерения первичного выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов, оценки эффективности регистрации мезонов в электромагнитном калориметре, приведена классификация систематических неопределенностей измерений.

В четвертой главе приведены результаты измерения инвариантных спектров рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов, отношений  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$ , а также факторов ядерной модификации этих мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Представлены сравнения факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Au+Au, Cu+Cu и Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

На рисунке 1 представлены инвариантные спектры по поперечному импульсу рождения  $\pi^0$ - [1; 5; 7],  $\eta$ - [1; 6; 7],  $K_S$ - [2; 11] и  $\omega$ -мезонов [3] в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. «Усы» и «прямоугольники» обозначают абсолютные величины статистической и систематической неопределенности, соответственно.

На рисунке 2 изображены отношения  $\eta/\pi^0$  [1; 6; 10],  $K_S/\pi^0$  [2; 11] и  $\omega/\pi^0$  [3] в зависимости от поперечного импульса мезонов, измеренные в разных классах центральности Cu+Au столкновений. «Усы» и «прямоугольники» изображают статистическую и систематическую неопределенности измерений, соответственно. Измеренные значения отношений  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  в пределах неопределенности не зависят от центральности Cu+Au столкновений, а также в области  $p_T > 4$  ГэВ/с не зависят от поперечного импульса. Для разных значений поперечного импульса измеренные отношения  $\eta/\pi^0$  равны в пределах неопределенности значениям функции  $m_T$ -скейлинга, нормированной на величину  $R_{\eta/\pi^0}^{\text{inf}} = 0.5$  при  $p_T \gg 1$ , и функции  $R_{\eta/\pi^0}(p_T)$ , полученной в  $p+p$  взаимодействиях с помощью генератора RYTHIA, использующего представление фрагментации в модели Лунда.

Аппроксимация отношений постоянной функцией поперечного импульса в разных классах центральности дает значения  $R_{\eta/\pi^0} = 0.48\text{--}0.51$ ,  $R_{K_S/\pi^0} = 0.41\text{--}0.50$  и  $R_{\omega/\pi^0} = 0.75\text{--}0.82$ . Измеренные величины отношений совпадают в пределах неопределенности с ранее полученными результатами в  $e^+e^-$ ,  $hh$ ,  $hA$ ,  $A+A$  взаимодействиях. Независимость величин измеренных отношений от центральности столкновений, а также их равенство в разных системах столкновений говорит о независимости (либо слабой зависимости) состава адронной струи в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ/с от присутствия КГП.

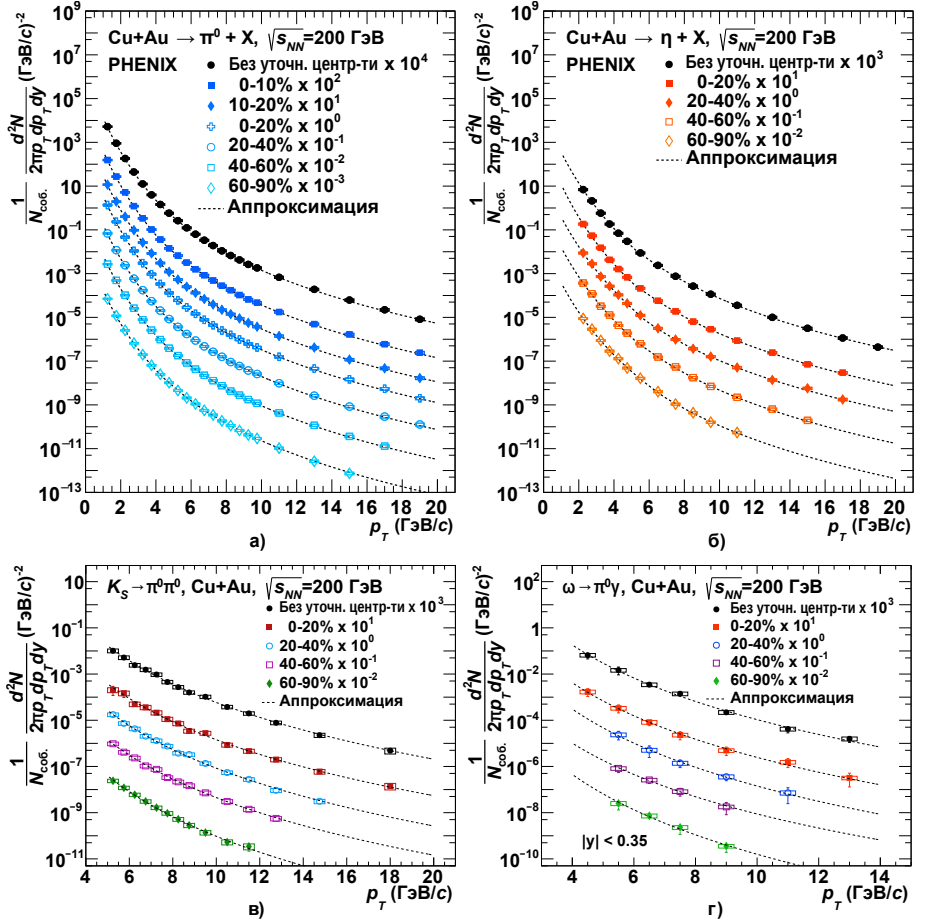
Фактор ядерной модификации частиц в A+A используется для изучения коллективных эффектов, влияющих на инвариантные спектры рож-



дения частиц, и вычисляются в соответствии с формулой:

$$R_{AA}(p_T) = \frac{dN_{AA}(p_T)}{\langle T_{AA} \rangle \times d\sigma_{pp}(p_T)}, \quad (1)$$

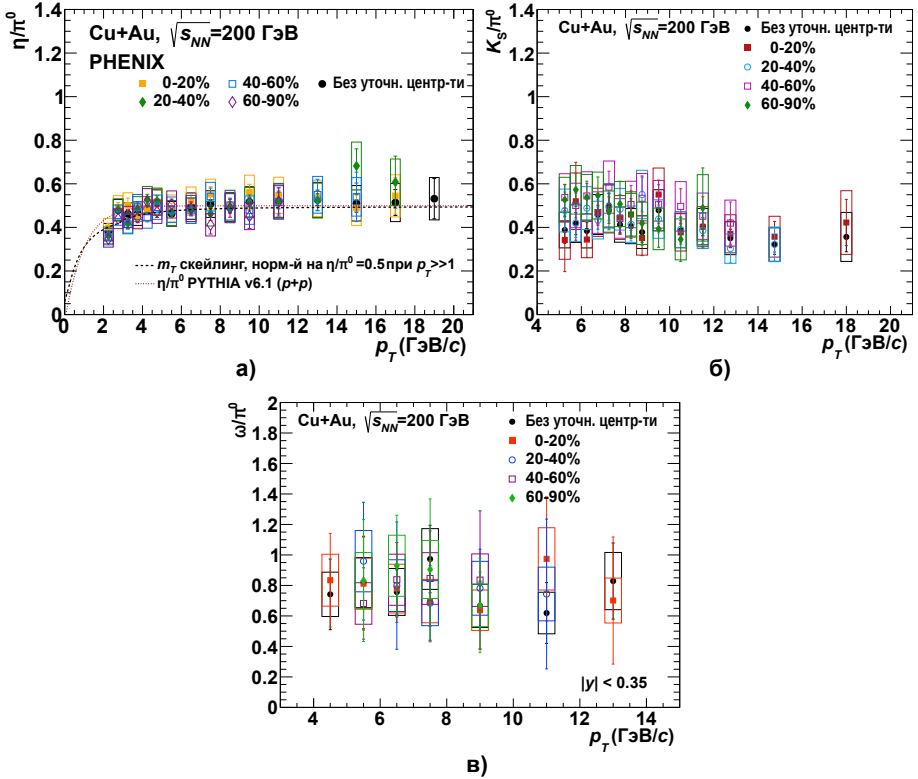
где  $dN_{AA}$  – выход частиц в А+А,  $d\sigma_{pp}$  – дифференциальное сечение рождения тех же частиц в  $p+p$  взаимодействиях,  $\langle T_{AA} \rangle$  – среднее значение толщины ядерного перекрытия в данном классе центральности. На рисунке 3 изображены факторы ядерной модификации  $\pi^0$ - [1–11],  $\eta$ - [1–3; 6; 7; 10; 11],  $K_S^-$ - [2; 3; 11] и  $\omega$ -мезонов [3], измеренные в зависимости от поперечного



Разные маркеры обозначают разные классы центральности.

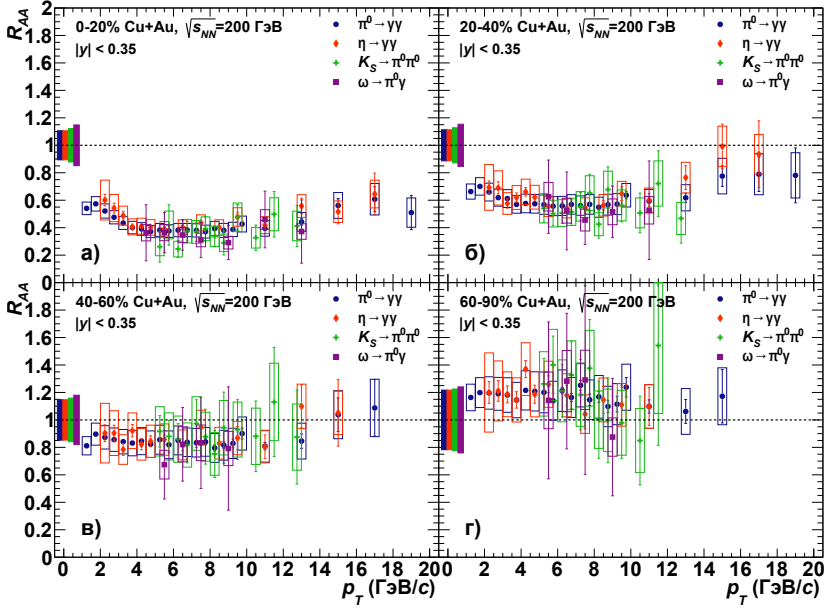
Рис. 1 – Инвариантные спектры по поперечному импульсу рождения  $\pi^0$ - [1; 5; 7],  $\eta$ - [1; 6; 7],  $K_S^-$  [2; 11] и  $\omega$ -мезонов [3] в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

импульса в разных классах центральности Cu+Au столкновений. «Усы» и «прямоугольники» изображают абсолютные величины статистической и систематической неопределенностей измерений, соответственно; «прямоугольники» на уровне  $R_{AA} = 1$  изображают относительную систематическую неопределенность, полностью некоррелированную по поперечному импульсу. Факторы ядерной модификации  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $K_S$  и  $\omega$ -мезонов равны в пределах неопределенности измерений в разных интервалах поперечного импульса и классах центральности Cu+Au столкновений. В центральных Cu+Au столкновениях в области  $4 < p_T < 10$  ГэВ/с  $R_{AA} \approx 0.4$  и медленно увеличивается до  $R_{AA} \approx 0.6$  при  $p_T > 16$  ГэВ/с. В области  $p_T > 10$  ГэВ/с



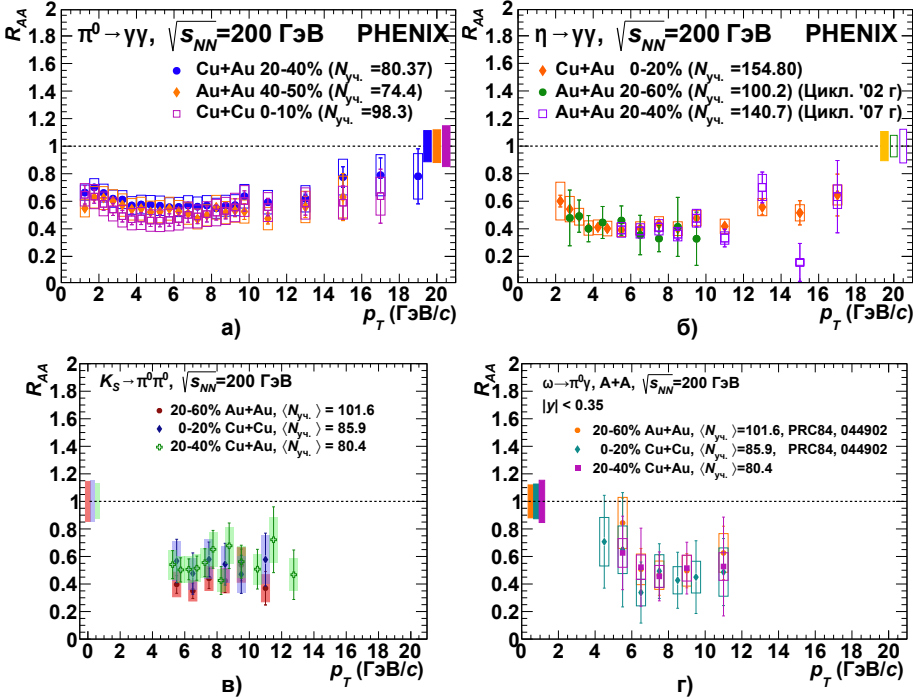
Разные маркеры обозначают разные классы центральности. В блоке (а) пунктиром изображена функция  $m_T$ -скейлинга для  $\eta/\pi^0$ , нормированная на величину  $R_{\eta/\pi^0}^{\text{inf}} = 0.5$  при  $p_T \gg 1$ , точечным пунктиром изображена зависимость  $R_{\eta/\pi^0}(p_T)$ , полученная в  $p+p$  взаимодействиях с помощью генератора PYTHIA.

Рис. 2 — Отношения  $\eta/\pi^0$  [1; 6; 10](а),  $K_S/\pi^0$  [2; 11](б) и  $\omega/\pi^0$  [3](в) в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.



Разные маркеры обозначают разные изучаемые каналы мезонных распадов. На панелях (а)-(г) соответственно представлены результаты измерений в 0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-90% классах центральности. Рис. 3 — Факторы ядерной модификации  $\pi^0$  [1–11],  $\eta$ - [1–3; 6; 7; 10; 11],  $K_S$ - [2; 3; 11] и  $\omega$ -мезонов [3] в зависимости от их поперечного импульса, измеренные в разных классах Cu+Au столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. величины факторов ядерной модификации  $\pi^0$ ,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов равны в пределах неопределенности измерениям факторам ядерной модификации адронных струй в Cu+Au столкновениях. Равенство факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов между собой, а также их равенство факторам ядерной модификации адронных струй свидетельствует о том, что подавление адронных выходов в Cu+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ/с происходит на партонном уровне до фрагментации.

На рисунке 4 представлено сравнение факторов ядерной модификации  $\pi^0$  [1; 8–10],  $\eta$ - [1; 6; 7; 10],  $K_S$ - [2; 11] и  $\omega$ -мезонов в зависимости от их поперечного импульса, измеренных в Cu+Au, Au+Au и Cu+Cu столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и близких значениях  $N_{yч}$ . Факторы ядерной модификации мезонов равны в пределах неопределенности измерений среди Cu+Au, Cu+Cu и Au+Au столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и близких значениях  $N_{yч}$ , в разных интервалах поперечного импульса, что говорит о независимости (либо слабой зависимости) эффекта гашения адронных струй от формы области перекрытия в Cu+Au, Au+Au и Cu+Cu столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.



Разные маркеры обозначают разные A+A системы. На панелях (а)-(г), соответственно, представлены результаты измерений для  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$  и  $\omega$ -мезонов.

Рис. 4 — Сравнение факторов ядерной модификации  $\pi^0$ - [1; 8–10],  $\eta$ - [1; 6; 7; 10],  $K_S$ - [2; 11] и  $\omega$ -мезонов, измеренных в Cu+Au, Au+Au и Cu+Cu системах при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

В **заклЮчении** сформулированы основные выводы диссертационной работы. По итогам диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Разработана методика измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
2. Впервые измерены инвариантные спектры рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов по поперечному импульсу в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
3. Впервые измерены отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$ ,  $\omega/\pi^0$  в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Аппроксимация отношений константой в области  $p_T > 4$  ГэВ/с дает значения  $R_{\eta/\pi^0} = 0.48\text{--}0.52$ ,  $R_{K_S/\pi^0} = 0.41\text{--}0.50$ ,  $R_{\omega/\pi^0} = 0.75\text{--}0.89$  в разных классах центральности Cu + Au столкновений.

4. Впервые измерены факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

По результатам работы сделаны следующие **выводы**:

1. Отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ не зависят от центральности в пределах неопределенности измерений.
2. Отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ равны в пределах неопределенности отношениям тех же мезонов, измеренным ранее в  $e^+e^-$ ,  $hh$ ,  $hA$ ,  $AA$  столкновениях, что говорит о независимости (либо о слабой зависимости) состава адронной струи в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ от присутствия КГП.
3. В разных классах центральности Cu+Au с при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов равны между собой в пределах неопределенности в разных интервалах  $p_T$  и классах центральности и равны в пределах неопределенности факторам ядерной модификации адронных струй в области  $p_T > 10$  ГэВ/ $c$  в той же системе. Это говорит о том, что подавление адронов в Cu+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ происходит на партонном уровне до фрагментации.
4. В центральных Cu+Au столкновениях выход  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов подавлен по сравнению с  $p+p$  примерно в два раза в области  $p_T = 4-10$  ГэВ/ $c$ , в области больших значений поперечного импульса степень подавления слабо уменьшается с ростом  $p_T$ .
5. Факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов равны в пределах неопределенности измерений среди Cu+Au, Au+Au и Cu+Cu столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и близких значениях  $N_{уч.}$  в разных интервалах  $p_T$ , что говорит о независимости (либо о слабой зависимости) эффекта гашения адронных струй от формы области перекрытия в Cu+Au, Au+Au и Cu+Cu столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобр-науки России 3.1498.2017/4.6.

## Список литературы

1. Production of  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons in Cu+ Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV / C. Aidala [et al.] // Physical Review C. — 2018. — Vol. 98, no. 5. — P. 054903.
2. Особенности рождения короткоживущих нейтральных каонов в Cu + Au столкновениях при энергии 200 ГэВ / А. Бердников [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного

- го политехнического университета. Физико-математические науки. — 2019. — Т. 12, № 3. — С. 131–142.
3. Исследование эффекта гашения адронных струй в системе столкновений ультрарелятивистских ядер меди и золота при энергии 200 ГэВ с помощью омега-мезонов / А. Бердников [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. — 2019. — Т. 12, № 3. — С. 143–154.
  4. Изучение эффекта гашения струй в несимметричной системе ультрарелятивистских ядер Cu+Au с помощью нейтральных пионов на эксперименте ФЕНИКС / А. Бердников [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 10. — С. 1321–1324.
  5. Свойства легких мезонов во взаимодействиях тяжелых ядер в эксперименте ФЕНИКС / А. Бердников [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2018. — Т. 82, № 10. — С. 1381–1385.
  6. Экспериментальные исследования рождения эта-мезонов и каонов в Cu + Au-взаимодействиях при энергии 200 ГэВ / А. Бердников [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2018. — Т. 82, № 10. — С. 1386–1390.
  7. *Zharko S.* Studying Parton Energy Loss Using Meson Production in Large Collision Systems with PHENIX / S. Zharko // Nuclear Physics A. — 2017. — Vol. 967. — P. 552–555.
  8. *Zharko S.* Hard Probe Measurements in Cu+Au Collisions at PHENIX: Jets and Leading Particles / S. Zharko // Nuclear and particle physics proceedings. — 2017. — Vol. 289. — P. 113–116.
  9. Neutral meson production in Cu+Au collisions at 200 GeV / A. Berdnikov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 929, no. 1. — P. 012061.
  10. Nuclear modification factors of light mesons in Cu+Au collisions / A. Berdnikov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 1038, no. 1. — P. 012068.
  11. Nuclear modification factors of  $K_S$  and  $\omega$  mesons in Cu+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV / A. Berdnikov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 1135, no. 1. — P. 012048.

*Жарко Сергей Вячеславович*

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ В  
СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР МЕДИ И ЗОЛОТА ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГЭВ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

