

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной  
работе Федерального  
государственного  
бюджетного  
образовательного  
учреждения высшего  
образования «Санкт-  
Петербургский  
государственный  
университет»  
к.ф.-м.н.



\_\_\_\_\_ 2020

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» о диссертационной работе Жарко Сергея Вячеславовича «Особенности образования нейтральных мезонов в столкновениях ядер меди и золота при энергии 200 ГэВ», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 физика атомного ядра и элементарных частиц, в диссертационный совет Д002.023.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук»

Диссертация С.В. Жарко посвящена экспериментальному исследованию рождения легких нейтральных  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S^0$ - и  $\omega$ -мезонов во взаимодействиях ядер меди и золота в эксперименте PHENIX на

коллайдере RHIC при энергии ( $\sqrt{s_{NN}}$ ) 200 ГэВ, приходящейся на одну нуклонную пару в системе центра масс. В работе представлены результаты измерения: инвариантных спектров по поперечному импульсу образующихся  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов; отношений их выходов  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$ ; и факторов ядерной модификации ( $R_{AA}$ ) для  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в зависимости от поперечного импульса и центральности Cu+Au столкновения.

### **Актуальность темы диссертации**

Интенсивное изучение кварк-глюонной плазмы - состояния деконфайнмента ядерной материи в условиях экстремально высоких значений температуры и плотности энергии проводится в столкновениях релятивистских тяжелых ионов на коллайдерах RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) и LHC в Европейском центре ядерных исследований (Швейцария). Основная цель данных исследований состоит в определении свойств кварк-глюонной плазмы, а также в установлении границ и характера фазового перехода между кварк-глюонной и адронной материей. Одним из признаков образования кварк-глюонной среды во взаимодействиях релятивистских тяжелых ионов является эффект гашения адронных струй («jet-quenching»), который проявляется в сильном подавлении выхода высокоэнергичных адронов по сравнению с их выходом в протон-протонных взаимодействиях при той же энергии столкновения. Данный эффект связан с увеличенными по сравнению с адронной материей энергетическими потерями быстрых кварков и глюонов в кварк-глюонной плазме, характеризующими ее транспортные свойства.

В диссертационной работе эффект гашения адронных струй исследуется экспериментально, посредством измерения фактора ядерной модификации легких нейтральных мезонов разного типа ( $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $K_S$ ,  $\omega$ ). Эти мезоны имеют различные массу, спин, четность и кварковый состав, и поэтому сравнение их выходов при столкновении релятивистских тяжелых ионов дает возможность более точно настроить различные теоретические модели и таким образом получить более детальную информацию об энергетических потерях кварков и глюонов в кварк-глюонной плазме.

В настоящее время единственной несимметричной системой, доступной для анализа данных по взаимодействию релятивистских тяжелых ионов при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, является система, возникающая при столкновениях ядер меди и золота (Cu+Au). Эта система характеризуется особой геометрией ядерного перекрытия, отличной от геометрии симметричных систем, таких как Au+Au и Cu+Cu. В центральных Cu+Au взаимодействиях ядро меди поглощается ядром золота, что приводит к уменьшению числа нуклон-нуклонных взаимодействий. В полу-центральных Cu+Au взаимодействиях область ядерного перекрытия обладает дополнительной асимметрией в направлении, соединяющем центры взаимодействующих ионов. Сравнение факторов ядерной модификации для рождения легких нейтральных  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ с соответствующими результатами, полученными ранее в симметричных Au+Au и Cu+Cu столкновениях, позволяет изучить влияние особенностей геометрии ядерного перекрытия во взаимодействиях тяжелых релятивистских ионов на эффект гашения адронных струй и наложить дополнительные ограничения на параметры ряда теоретических

моделей, используемых для описания энергетических потерь кварков и глюонов в кварк-глюонной среде.

Таким образом, тема диссертации, посвященной исследованию особенностей образования легких нейтральных  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в системе Cu+Au столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, актуальна и является неотъемлемой частью систематического изучения свойств ядерной материи в экстремальных условиях температуры и энергетической плотности, создаваемой в столкновениях релятивистских ионов.

### **Научная новизна и практическая значимость диссертации**

В диссертации автором впервые были получены экспериментальные физические результаты по рождению легких нейтральных  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в системе Cu+Au столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ на установке PHENIX. Конкретно, впервые были получены инвариантные спектры рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в разных классах центральности Cu+Au столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и отношения выходов мезонов  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  в разных интервалах поперечного импульса мезонов и классах центральности Cu+Au столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Также впервые были получены факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в разных интервалах поперечного импульса и центральности Cu+Au столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

В диссертации впервые показано, что отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  в Cu+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ не зависят от центральности столкновений, значения этих отношений равны значениям

отношений тех же мезонов, измеренных ранее в других системах: в электрон-позитронных, адрон-адронных, адрон-ионных и ион-ионных взаимодействиях, на основании чего автор сделал вывод о независимости (либо слабой зависимости) состава начальной адронной струи в Cu+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ от присутствия кварк-глюонной среды. Впервые показано, что выходы  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ подавлены одинаковым образом в разных интервалах поперечного импульса мезонов и центральности столкновений по сравнению с их выходом в протон-протонных столкновениях при тех же энергиях. Кроме того, полученные автором значения факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях совпадают с ранее полученными результатами для Au+Au и Cu+Cu систем при тех же значениях энергии и близких значениях числа нуклонов, участвующих в конкретном ядро-ядерном взаимодействии, в результате чего автор сделал вывод о независимости (либо слабой зависимости) эффекта гашения адронных струй от формы ядерного перекрытия, реализуемой в Cu+Au, Au+Au и Cu+Cu системах при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

Полученные автором результаты о рождении  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ могут быть использованы для сравнительного анализа свойств ядерной материи в экспериментах на ускорителях RHIC и LHC, а также в будущих экспериментах на ускорительных комплексах NICA (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна) и FAIR (Центр по изучению тяжелых ионов, Германия), тестирования различных Монте-Карло генераторов и уточнения различных феноменологических моделей этих

реакций. Реализованная автором методика измерения выходов  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ на установке PHENIX может быть адаптирована для измерения выходов тех же мезонов в других системах ион-ионных взаимодействий, а также для измерения выходов адронов, в цепочках распада, оканчивающихся на  $\gamma$ -квантах.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена использованием методик и программ анализа данных, общепринятых в экспериментах физики высоких энергий. Методика измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в Cu+Au взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ разработана на основе методических указаний, принятых в коллаборации PHENIX, при этом были использованы различные модификации методики. Выход  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов был измерен независимо с помощью различных типов электромагнитного калориметра. Полученные автором результаты обсуждались на семинарах коллаборации PHENIX и на международных конференциях, изложены в 11 публикациях индексируемых в базах SCOPUS и Web Of Science в изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 136 страниц, 55 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 150 наименований.

Во введении сформулированы цели и задачи диссертации, обоснованы актуальность, новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, отражен личный вклад в работу.

Обоснована достоверность полученных результатов и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе кратко изложены базовые положения физики столкновений релятивистских тяжелых ионов, включая проблемы деконфайнмента в квантовой хромодинамике и фазового перехода между кварк-глюонной и адронной материей, приведены описания геометрии и принципиальной схемы эволюции ядро-ядерных взаимодействий. Обсуждаются основные наблюдаемые признаки образования кварк-глюонной среды в столкновениях релятивистских тяжелых ядер, а также рассмотрены основные результаты полученные на RHIC и LHC, в том числе результаты изучения эффекта гашения адронных струй в этих экспериментах.

Во второй главе представлено описание коллайдера RHIC и спектрометра PHENIX, приведено описание триггеров реального времени, используемых для получения 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 к физическому анализу, обоснован выбор критериев отбора данных, приведены описание измерения первичного выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов, методика оценки эффективности регистрации мезонов и классификация систематических неопределенностей измерений.

В четвертой главе представлены результаты измерения инвариантных спектров рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов, отношений выходов мезонов  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  и факторов

ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S^-$  и  $\omega$ -мезонов в системе столкновений ядер меди и золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ на нуклон-нуклонную пару. 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.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

### **Замечания к диссертации**

В рамках диссертационного исследования проведен очень тщательный и высококвалифицированный анализ экспериментальных данных коллаборации PHENIX. Так, отдельно можно отметить подробнейший анализ систематических погрешностей, который обычно является наиболее сложной частью при обработке экспериментальных данных, поиск проблемных сегментов данных, составление карт эффективностей различных детекторных подсистем. Высокий научный уровень проведенной экспериментальной работы убеждает в абсолютной надежности полученных новых результатов и вызывает интерес к их более детальной теоретической интерпретации, которая, конечно, выходит за рамки данного экспериментального исследования.

Несмотря на очень последовательное изложение материала исследования ряд моментов в диссертации вызывает вопросы:

1. В разделе 1.4.1 приводятся важные замечания о том, что в классической модели Глаубера не учитываются коллективные эффекты, но нигде далее в работе не обсуждается вклад этой неточности в финальные результаты.



2. В определении функций распределения (3.12) на странице 91 в левой части в знаменателе стоит  $dy$ , которое означает, что выходы мезонов рассчитываются на единицу быстроты. Это обозначение используется во многих рисунках с результатами исследования (рис. 4.1-4.4). К сожалению, в работе нет пояснений как выбирался этот интервал и являются ли полученные распределения нейтральных мезонов однородными в пределах этого интервала быстроты.
3. В разделе 3.6 производится аппроксимация спектров мезонов распределениями Цаллиса и Леви, при этом не дана никакая мотивация, почему именно эти распределения применимы в данных случаях, причем в Главе 4 (Результаты) используется уже другая функция - формула (4.1). Из работы не очень понятно, чем мотивируется такой выбор и насколько это влияет на получаемые результаты.
4. Полученные результаты сравнивались с результатами, полученными для других реакций при энергии 200 ГэВ. К сожалению в работе отсутствует сравнение с результатами экспериментов при других энергиях и поэтому не ясно, выполняется ли обнаруженное свойство независимости состава струи от типа сталкивающихся систем при других энергиях.
5. Любопытно также было бы провести сравнение полученных в работе спектров, факторов ядерной модификации и отношений выходов нейтральных пионов и каонов с заряженными.

Впрочем последние два замечания можно рассматривать скорее как пожелания на будущее. Перечисленные замечания никак не умаляют факта высочайшего качества проведенного экспериментального исследования.

Диссертационная работа в целом хорошо оформлена, однако, все-таки содержит некоторые стилистические и технические неточности:

1. На странице 4 автореферата делается утверждение: “Использование различных А+А систем является исключительной особенностью экспериментов на RHIC.” Это предложение не является точным, т.к. аналогичная программа ведется, например, в эксперименте NA61/SHINE в ЦЕРН и в экспериментах на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.
2. На рисунке 1 автореферата отсутствует единообразие в цветовых обозначениях для разных классов центральности.
3. В разделе 1.3.1 диссертационной работы приводится обзор экспериментальных результатов по измерению подавления выхода адронных струй. Он написан несколько эклектично, на рисунках используются всевозможные цвета и новые обозначения, что затрудняет восприятие. В этом же разделе на странице 22 вставлен рисунок 1.5, который вообще никак не обсуждается и даже не упоминается в тексте диссертации.
4. В диссертационной работе имеется ряд опечаток. На странице 15 и 136 вместо “характеристики” должно быть “характеристики”. На странице 25 вместо “релятивиской” должно быть “релятивистской”. На странице 28 вместо “функцией” - “функцией”. На странице 31 вместо “конценсуса” - “консенсуса”. На странице 44 вместо “исползуются” - “используются”. На странице 53 вместо “хотябы” - “хотя бы”. На странице 97 вместо “в области значений поперечного меньше” - “в области значений поперечного импульса меньше”. На странице 110 и странице 135 вместо “нулонов” - “нуклонов”.

Изложенные выше замечания не влияют на положительную оценку диссертации и научной ценности полученных в ней результатов. Диссертация является законченным научным исследованием, выполнена на высоком научном уровне и содержит ряд новых и актуальных результатов. Полученные результаты достоверны, сформулированные научные положения и выводы хорошо обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях, соответствующих списку ВАК, и докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации достаточно полно отображает содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемыми к авторефератам диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата наук.

### **Заключение**

Диссертационная работа Жарко Сергея Вячеславовича «Особенности образования нейтральных мезонов в столкновениях ядер меди и золота при энергии 200 ГэВ», соответствует специальности 01.04.16 - «Физика атомного ядра и элементарных частиц» и полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации, Жарко Сергей Вячеславович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Отзыв ведущей организации на диссертацию С.В. Жарко «Особенности образования нейтральных мезонов в столкновениях ядер меди и золота при энергии 200 ГэВ» составил доцент Кафедры физики высоких энергий и элементарных частиц, к.ф.-м.н., доцент Г.А. Феофилов.

Отзыв обсужден 10 марта 2020 года на заседании Кафедры физики высоких энергий и элементарных частиц Физического факультета СПбГУ, протокол № 7/2 от 10.03.2020.

Заведующий Кафедрой физики высоких энергий

и элементарных частиц,

д.ф.-м.н., профессор



Михаил Вульфович Иоффе

Доцент Кафедры физики высоких энергий

и элементарных частиц,

к.ф.-м.н., доцент



Григорий Александрович Феофилов

Подписи М.В. Иоффе и Г.А. Феофилова заверяю

ЛИЧНЫЙ ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ

Н. И. МАШЕНА

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9; эл.почта: [pbu@spbu.ru](mailto:pbu@spbu.ru); Вэб-сайт: <http://spbu.ru>; тел.: +7 (812) 328-20-00.



Список публикаций в рецензируемых научных изданиях по теме  
диссертации за последние 5 лет:

1. Acharya S., Adamová D., Adhya S.P. et. al, « $H\Lambda_3$  and  $H\Lambda_3^-$  lifetime measurement in Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV via two-body decay», 2019, Phys. Lett. B, v. 797, p. 134905.
2. Acharya S., Adamová D., Adhya S.P. et. al, «One-dimensional charged kaon femtoscopy in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV», 2019, Phys. Rev. C, v. 100, i. 2, p. 024002.
3. Acharya S., Adamová D., Adhya S.P. et. al, «Measurement of the production of charm jets tagged with  $D^0$  mesons in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV», 2019, Journal of High Energy Physics, v. 2019, i. 8, p. 133.
4. Acharya S., Adamová D., Adhya S.P. et. al, «Azimuthally-differential pion femtoscopy relative to the third harmonic event plane in Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV», 2018, Phys. Lett. B, v. 785, p.320-331.
5. Acharya S., Acosta F.T., Adamová D., «Inclusive  $J/\psi$  production in Xe–Xe collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.44$  TeV», 2018, Phys. Lett. B, v. 785, p.419-428.
6. Acharya S., Acosta F.T., Adamová D., «Anisotropic flow in Xe–Xe collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.44$  TeV», 2018, Phys. Lett. B, v. 784, p. 82-95.