

## УТВЕРЖДАЮ

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

С.В.Микушев

2020 года



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» о диссертационной работе Радзевича Павла Владиславовича «Рождение легких нейтральных мезонов в  $U+U$  взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  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»

В диссертации П.В. Радзевича проводится анализ новых экспериментальных данных по рождению легких нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$ - и  $K_S$ ) в релятивистских  $U+U$  взаимодействиях при энергии в системе центра масс на пару нуклонов  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ в эксперименте PHENIX на коллайдере RHIC. В работе измерены инвариантные спектры рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов, отношения выходов  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$ , факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -и  $K_S$ -мезонов в зависимости от поперечного импульса и в разных классах по центральности  $U+U$  столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ.

### Актуальность темы диссертации

Одной из основных задач коллайдеров RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) и LHC в Европейском центре ядерных исследований (Швейцария) является исследование свойств горячей

сильновзаимодействующей материи, образующейся при столкновении релятивистских тяжелых ядер – кварк-глюонной плазмы (КГП). Одним из признаков образования кварк-глюонной среды во взаимодействиях релятивистских тяжелых ионов является эффект гашения адронных струй, который проявляется в уменьшении выхода адронов по сравнению с их выходом в протон-протонных столкновениях. Данный эффект связан с энергетическими потерями партонов в кварк-глюонной плазме, что приводит к смещению инвариантных спектров рождения адронов в область меньших значений поперечного импульса и, соответственно, уменьшению их выходов по сравнению с выходами в элементарных протон-протонных столкновениях.

П.В. Радзевич исследовал эффект гашения адронных струй с помощью измерения факторов ядерной модификации легких нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $K_S$ ) в столкновениях ядер урана при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ. Различные индивидуальные характеристики (спин, четность, масса, кварковый состав и т.д.) исследуемых частиц позволяют провести сравнительный анализ рождающихся частиц в рамках одной изучаемой системы сталкивающихся ядер, а также дает возможность более точно настроить различные теоретические модели и подробно изучить энергетические потери кварков и глюонов в кварк-глюонной среде.

Зондирование кварк-глюонной среды, рождающейся в А+А столкновениях, проводится с помощью исследования особенностей рождения частиц различного рода: адронов, лептонов и фотонов, и их сравнения с результатами, полученными в элементарных протон-протонных столкновениях. Для изучения влияния геометрии сталкивающихся тяжелых ядер на свойства кварк-глюонной среды на RHIC используются различные системы сталкивающихся ядер. Система  $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$  столкновений представляет большой интерес для исследования процессов рождения частиц, потому что форма ядер урана-238 и, как следствие, плотность распределения в них нуклонов не является сферически симметричной. Также в столкновениях ядер урана достигается максимально возможная на сегодняшний день на коллайдере RHIC плотность

энергии. Исследование особенностей рождения различных частиц в системе U+U столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ может позволить провести дополнительную дискриминацию значений параметров различных моделей, описывающих свойства КГП.

Таким образом, тема диссертации, посвященная исследованию рождения легких нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$  и  $K_S$ ) в U+U взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ, **актуальна** и является неотъемлемой частью систематического изучения свойств ядерной материи в экстремальных условиях температуры и энергетической плотности, создаваемой в столкновениях релятивистских ионов.

### **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 106 страниц, 45 рисунков и 13 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 97 наименований.

Во введении выделены актуальность и достоверность диссертационного исследования. Представлены основные цели и задачи диссертационной работы. Сформулирована научная новизна полученных результатов диссертационного исследования и подчеркнута их практическая значимость. Отражено личное участие автора в получении результатов исследований, связанных с темой диссертационной работы. Представлено краткое изложение основных разделов диссертационной работы.

В первой главе представлено краткое описание свойств частиц, исследуемых в диссертационной работе, выделены основные положения физики столкновений релятивистских тяжелых ионов, сформулированы основные проблемы определения границ фазового перехода между кварк-глюонной и адронной материей, приведены главные характеристики и схема ядро-ядерных столкновений. Определены основные наблюдаемые признаки образования кварк-глюонной среды в столкновениях релятивистских тяжелых ядер.

Во второй главе приведено подробное описание коллайдера RHIC и спектрометра PHENIX. Представлено краткое описание детекторных подсистем экспериментальной установки и отражены основные программные пакеты, использующиеся для моделирования спектрометра PHENIX, приведены конструкционные особенности системы электромагнитных калориметров, которые используются для регистрации  $\gamma$ -квантов, рождающихся при распаде исследуемых легких нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$  и  $K_S$ ).

В третьей главе подробно изложена методика, используемая для обработки экспериментальных данных. В частности, представлен алгоритм подготовки экспериментальных данных, который включает в себя анализ качества работы электромагнитного калориметра, определение основных критериев отбора событий и тонкую калибровку. Описаны методы оценки эффективности регистрации мезонов и классификация систематических неопределенностей измерений. Представлен алгоритм измерения инвариантных спектров рождения и факторов ядерной модификации исследуемых частиц ( $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезон) в U+U столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ.

В четвертой главе описаны результаты измерения инвариантных спектров рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов, отношений выходов мезонов  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$ , факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов и интегральных факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в U+U столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ. Также проведено сравнение факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в U+U столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ и Au+Au и Cu+Cu столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Содержание диссертации отражает научные результаты и положения, выносимые на защиту. В целом, диссертация Радзевича П.В. представляет собой завершённое исследование актуальной задачи. Работа выполнена на высоком уровне, поставленные задачи решены.

## Научная новизна и практическая значимость диссертации

В диссертационной работе автором **впервые** получены инвариантные спектры рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу в разных классах центральности U+U столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ. **Впервые** получены отношения выходов мезонов  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$  в разных диапазонах по поперечному импульсу и классах центральности U+U столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ. Радзевичем П.В. **впервые** получены факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу и интегральные факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в различных классах по центральности U+U столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ. **Впервые** разработана методика исследования  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ.

В диссертации **впервые** показано, что подавление  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U, Au+Au и Cu+Cu при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ и  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в основном зависит от среднего числа парных нуклон-нуклонных столкновений, а не от геометрических свойств сталкивающихся ядер. **Впервые** наблюдается, что отношения выходов  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$ , измеренных в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ, совпадают в пределах систематических и статистических неопределенностей во всех классах по центральности, а также с отношениями, измеренными ранее в p+p, p+A и A+A, на основании чего сделан вывод об отсутствии зависимости или слабой зависимости фрагментации партонов от присутствия КГП в U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ. **Впервые** наблюдается, что подавление выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ и Au+Au и Cu+Cu при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ при близких значениях числа парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений одинаково в области поперечных импульсов ( $p_T > 4-6$  ГэВ/с), на основании чего сделан вывод об отсутствии зависимости эффекта гашения адронных струй от кваркового состава и массы исследуемых легких нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$  и  $K_S$ ).

Сформулированную в данной работе методику измерения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ можно адаптировать для исследования легких нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$  и  $K_S$ ) в других системах сталкивающихся ядер в аналогичных экспериментах, направленных на исследования свойств горячей и плотной ядерной материи (PHENIX, STAR, ALICE, ATLAS. и др.). Значения факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в U+U столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ позволят получить дополнительные ограничения параметров для ряда феноменологических моделей, описывающих потери энергии партонов в кварк-глюонной среде. Величины измеренных отношений  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$  в столкновениях U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ могут быть использованы для настройки Монте-Карло генераторов. Вычисленные значения факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов и отношений спектров рождения  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$  могут быть использованы для сравнительного анализа свойств КГП в экспериментах PHENIX, STAR, ALICE, ATLAS и др., в институтах и университетах МГУ, СПбГУ, ТПУ, ВГУ, МИФИ, ФИАН, ОИЯИ, НИЦ Курчатовский институт и др.

### **Обоснованность и достоверность результатов и выводов.**

Достоверность основных выводов диссертационной работы обеспечена высоким уровнем и статистической обеспеченностью экспериментальных данных, полученных в эксперименте PHENIX, использованием стандартного программного обеспечения установки PHENIX, проведением полного моделирования методом Монте-Карло. Методика измерения выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в U+U взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ разработана на основе методических указаний, принятых в коллаборации PHENIX. Инвариантные спектры рождения и факторы ядерной модификации  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов измерялись в двух разных типах электромагнитного калориметра (PbSc и PbGl), что позволило произвести перекрестную проверку результатов. Измерение спектров рождения  $K_S$ -мезонов проводилось при идентификации дочерних  $\pi^0$ -мезонов, прошедших перекрестную проверку в двух системах электромагнитного

калориметра. Результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в рецензируемых журналах.

### **Замечания к диссертации**

В целом работа выполнена на высоком профессиональном уровне, написана хорошим языком и оставляет очень положительное впечатление. Проведен тщательный и высококвалифицированный анализ экспериментальных данных по U+U столкновения на коллайдере RHIC. Полученные результаты, в свою очередь, выдвигают широкий спектр задач для развития теоретических моделей рождения легких нейтральных мезонов. К работе можно высказать несколько общих комментариев, а также замечаний стилистического характера:

1. В разделе 2 обсуждается вопрос о том, что допущения модели Глаубера могут приводить к искажениям значений параметров  $\langle \sigma_{\text{столкн.}} \rangle$  и  $\langle \sigma_{\text{уч.}} \rangle$ , однако в дальнейшем не обсуждается, как это может повлиять на интерпретацию итоговых экспериментальных данных.
2. В тексте диссертации не дано определение двух наборов параметров классов центральности ядро-ядерных соударений, в связи с чем не ясна ценность таких утверждений, как: “Факторы ядерной модификации, измеренные с использованием двух разных наборов, совпадают друг с другом в пределах неопределенности измерений” на странице 73 и аналогичных на страницах 75 и 78.
3. В работе желательно было бы увидеть сравнение результатов измерений с предсказаниями генераторов событий и иных теоретических моделей.

Стилистические и технические замечания:

4. Так на странице 70 указано: “Статистические и систематические ошибки факторов ядерной модификации вычислены как сумма квадратов статистических и систематических ошибок числителя и знаменателя

формулы 3.11.”. Тут, видимо, содержится опечатка, так как факторы ядерной модификации определяются формулами 3.10 и 3.12.

5. Рисунки 1 - 7, 3.1 выполнены слишком мелко. Текст в подписях на осях плохо виден.

6. На рисунке 2.9 неправильно указан прицельный параметр. Прицельный параметр - это расстояние между центрами ядер. Отмеченное же на рисунке расстояние намного меньше.

7. Фраза на стр.20: “Также в столкновениях ядер урана достигается максимально возможная на сегодняшний день плотность энергии [9]”, видимо, не совсем корректная, так как в максимальные значения сегодня дает коллайдер LHC.

8. Стр.39: При первом упоминании программы PISA на стр. 39 нужно было привести ссылку на нее ([93]) (эта ссылка появляется только на странице 53).

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 Радзевича Павла Владиславовича «Рождение легких нейтральных мезонов в U+U взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  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, Радзевич Павел Владиславович, 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 П.В. Радзевича «Рождение легких нейтральных мезонов в U+U взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  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

ЛИЧНУЮ ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ №3

Н. И. МАШТЕПА



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, « $\Lambda_3$  and  $\Lambda_3^-$  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.