

На правах рукописи

Радзевич Павел Владиславович

**РОЖДЕНИЕ ЛЕГКИХ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ  
В  $U+U$  ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ  
ЭНЕРГИИ  $\sqrt{s_{NN}}=192$  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 Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «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

**Тихомиров Владимир Олегович**,  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук,  
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.

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/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020г.  
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.** Расчеты квантовой-хромодинамики (КХД) предсказали переход ядерной материи в состояние кварк-глюонной плазмы (КГП) в условиях экстремальных энергетических плотностей и/или температур ( $\varepsilon \sim 1 \text{ ГэВ/фм}^3$ ,  $T \sim 170 \text{ МэВ}$ ) [1–5]. Уникальной возможностью для изучения фазового перехода от бесцветной адронной материи к состоянию КГП в лабораторных условиях является исследование столкновений ядер при релятивистских энергиях. Изучение свойств КГП позволяет более детально исследовать процессы эволюции Вселенной, так как считается, что Вселенная находилась в состоянии КГП ( $T \sim 10^{12} \text{ К}$ ) в течение нескольких микросекунд после Большого Взрыва [6]. Ожидается, что изучение данного состояния ядерного вещества поможет дать ответы на вопросы физики высоких энергий о природе сильных взаимодействий между кварками и глюонами, космологии нейтронных звезд, а также позволит проверить теоретические основы КХД [7; 8].

Важное значение имеет изучение столкновений сферически несимметричных тяжёлых ядер урана (U+U), так как они имеют особую геометрию перекрытия по сравнению с симметричными системами (Au+Au, Cu+Cu, Pb+Pb) и несимметричными системами (Cu+Au). Также система U+U дает возможность исследовать геометрию столкновений тяжелых ионов с наибольшей плотностью энергии в центральных столкновениях [9]. Изучение сферически несимметричных тяжелых систем позволит дать дополнительное ограничение на значения параметров существующих моделей и более точно описать процессы потери энергии партонов в горячей и плотной ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ядер.

Изучение подавления выходов легких нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $K_S$ ) в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 \text{ ГэВ/}c$ ), в которой основным процессом их рождения является фрагментация жестких партонов, также вызывают большой интерес [10; 11]. Партоны теряют свою энергию в горячей и плотной среде, возникающей в столкновениях тяжёлых релятивистских ядер, что приводит к смещению инвариантных спектров их рождения в область меньших значений поперечного импульса и, соответственно, подавлению их выходов по сравнению с выходами в элементарных p+p столкновениях.

Тема настоящей диссертации посвящена изучению рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192 \text{ ГэВ}$  и является важной частью систематического изучения свойств КГП.

**Целью** данной работы является экспериментальное изучение свойств ядерной материи при экстремальных значениях температуры и плотности энергии при переходе от адронной материи к КГП, исследование процессов рождения легких нейтральных мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $K_S$ ) в столкновениях рекордных по массе ядер U+U при энергии столкновения  $\sqrt{s_{NN}}=192 \text{ ГэВ}$ .

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка методики, основанной на использовании двух систем (PbSc и PbGl) электромагнитного калориметра (EMCal) эксперимента PHENIX и измерения спектров рождения и вычисления факторов ядерной модификации с использованием различных легких мезонов, рождающихся в результате столкновения ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ.
2. Измерение спектров  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса и центральности сталкивающихся ядер.
3. Измерение факторов ядерной модификации ( $R_{AA}$ )  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса и центральности сталкивающихся ядер.
4. Измерение интегральных факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от общего числа нуклонов, участвующих во взаимодействии ( $\langle N_{уч.} \rangle$ ).
5. Измерение отношения спектров  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$  в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса и центральности сталкивающихся ядер.

### Научная новизна:

1. Впервые разработана методика исследования рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ.
2. Впервые измерены инвариантные спектры рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса, в пяти классах по центральности для  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов и в четырех классах по центральности для  $K_S$ -мезонов.
3. Впервые получены факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса, в пяти классах по центральности для  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов и в четырех классах по центральности для  $K_S$ -мезонов.
4. Впервые получены интегральные факторы ядерной модификации в зависимости от числа нуклонов, участвующих во взаимодействии, для  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ.
5. Впервые измерены отношения спектров  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$  в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от

- поперечного импульса, в пяти классах по центральности для  $\eta/\pi^0$  и в четырех классах по центральности для  $K_S/\pi^0$ .
6. Впервые наблюдается, 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.
  7. Впервые наблюдается, что отношения спектров  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$ , измеренных в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ, совпадают в пределах систематических и статистических погрешностей во всех классах по центральности, а также с отношениями, измеренными ранее в p+p, p+A и A+A, что говорит об отсутствии зависимости фрагментации партонов от присутствия КПП в U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ.
  8. Впервые наблюдается, что поведение зависимости выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов от поперечного импульса в столкновениях ядер U+U, Au+Au и Cu+Cu при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ и  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ в области поперечных импульсов  $p_T > 5-6$  ГэВ/c совпадает, что говорит об отсутствии зависимости эффекта гашения адронных струй от кваркового состава и массы  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов.

### **Практическая значимость**

Разработанную автором методику измерения рождающихся  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U можно использовать при анализе данных, полученных в различных системах столкновений тяжелых ядер. Новые результаты (спектры, отношения спектров, факторы ядерной модификации) являются частью систематического исследования рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновении ультрарелятивистских ядер и позволяют оценить влияние плотной и горячей среды на рождение частиц при формировании КПП. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при сравнительном анализе свойств КПП в экспериментах PHENIX, STAR, ALICE, ATLAS, в институтах и университетах МГУ, СПб-ГУ, ТПУ, ВГУ, МИФИ, ФИАН, ОИЯИ, НИЦ Курчатовский институт, а также для проверки феноменологических моделей.

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

1. Разработана новая методика исследования особенностей рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в U+U столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ.
2. Получены новые зависимости инвариантных спектров  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ.
3. Получены новые зависимости факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов от поперечного импульса в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ.

4. В центральных столкновениях ядер U+U в области малых и промежуточных поперечных импульсов ( $p_T = 1-5$  ГэВ/c) выход  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов подавлен и в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5-6$  ГэВ/c) выход  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов подавлен на 70-80 %. В периферийных столкновениях выход  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ - мезонов в области больших поперечных импульсов в пределах систематических погрешностей не зависит от поперечного импульса и подавлен на 40-50 %.
5. В столкновениях ядер U+U поведение факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в области больших поперечных импульсов совпадает в пределах систематической и статистической неопределенности.
6. Поведение факторов ядерной модификации  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов, измеренных в столкновениях ядер U+U, в пределах систематической и статистической неопределенности совпадает с поведением факторов ядерной модификации  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов, измеренных в столкновениях ядер Au+Au.
7. Поведение факторов ядерной модификации  $K_S$ -мезонов, измеренных в столкновениях ядер U+U, в пределах систематической и статистической неопределенности совпадает с поведением факторов ядерной модификации  $K_S$ -мезонов, измеренных в столкновениях ядер Au+Au и Cu+Cu.
8. Зависимости интегральных факторов ядерной модификации от среднего числа нуклонов, участвующих во взаимодействии ( $\langle N_{уч.} \rangle$ ), измеренные для  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U, Au+Au и Cu+Cu, совпадают в пределах систематической и статистической неопределенности.
9. Поведение отношения спектров  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$  в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в пределах систематических и статистических погрешностей совпадает во всех измеренных классах по центральности и во всем измеренном диапазоне поперечного импульса.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается:

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 проводится при идентификации дочерних  $\pi^0$ -мезонов, прошедших перекрестную проверку в двух системах электромагнитного калориметра (PbSc и PbGl).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на: семинарах международной коллаборации PHENIX в BNL (Брукхейвенская Национальная Лаборатория), конференции «Ядро 2017» (Алма-Ата, Казахстан), конференции «Ядро 2018» (Воронеж, Россия),

конференции «ФизикаА.СПб 2017» (Санкт-Петербург, Россия), конференции «ФизикаА.СПб 2018» (Санкт-Петербург, Россия), конференции 12th International Workshop on High-pT Physics in the RHIC/LHC Era (Берген, Норвегия), а также на конференциях «Неделя Науки 2016» (Санкт-Петербург, Россия), «Неделя Науки 2017» (Санкт-Петербург, Россия), «Неделя Науки 2018» (Санкт-Петербург, Россия).

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие в проведении научной работы по исследованию рождения легких мезонов и лично получил все результаты, представленные в данной диссертационной работе.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных работах, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 индексируемых в Web of Science и 4 включены в перечень SCOPUS.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации 106 страниц текста с 45 рисунками и 13 таблицами. Список литературы содержит 97 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Выделяются основные цели и задачи диссертационной работы. Показывается научная новизна полученных результатов диссертационного исследования и подчеркивается их практическая значимость. Отмечаются основные положения, вносимые на защиту. Отражается личное участие автора в получении результатов исследований, связанных с темой диссертационной работы. Выполняется краткое изложение разделов диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена краткому описанию частиц, исследуемых в рамках диссертационной работы, и теоретических моделей, использующихся для описания ядерного вещества, рождающегося в релятивистских столкновениях тяжелых ядер. Описана эволюция представлений о КГП и основные параметры для её изучения. Обоснована необходимость исследования рождения легких мезонов ( $\pi^0$ ,  $\eta$  и  $K_S$ ) в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ.

Во **второй главе** описывается экспериментальная установка PHENIX и релятивистский коллайдер тяжелых ионов RHIC. Представлено краткое описание детекторных подсистем экспериментальной установки и отражены основные программные пакеты, использующиеся для моделирования спектрометра PHENIX.

**Третья глава** посвящена описанию методик обработки экспериментальных данных [12; 19]. В первой части данной главы представлен общий для всех исследуемых частиц ( $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ - мезон) пункт – подготовка экспериментальных данных, который включает в себя анализ качества работы

электромагнитного калориметра, определение основных критериев отбора событий и тонкую калибровку. Вторая часть третьей главы посвящена описанию методик экспериментальной обработки каждой исследуемой частицы ( $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезон). Методика исследования легких мезонов после подготовки экспериментальных данных состоит из пяти основных этапов: измерение выхода частиц, вычисление эффективности регистрации частиц в электромагнитном калориметре, измерение инвариантных спектров рождения, оценка систематической и статистической неопределенности измерений, вычисление факторов ядерной модификации.

В **четвертой главе** приведены результаты диссертационного исследования и выделены обоснования полученных результатов.

На рисунке 1 изображены инвариантные спектры  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов, рожденных в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ [12–20]. На рисунке 1 и следующих рисунках условные обозначения на точках в виде вертикальных «усов» и горизонтальных «прямоугольников» отвечают статистическим и систематическим погрешностям измерений соответственно. Спектры измерены в широком диапазоне по поперечному импульсу в разных классах по центральности. Измерение в более широком диапазоне по поперечному импульсу ограничено возможностями детектирующего оборудования в области малых поперечных импульсов и доступной статистикой в области больших поперечных импульсов.

Зависимости факторов ядерной модификации от поперечного импульса  $\pi^0$ -мезонов, измеренных в U+U [12; 15; 16; 18; 20] и Au+Au [21] столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ и  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ в разных классах по центральности с близкими значениями среднего числа парных нуклон-нуклонных столкновений  $\langle N_{\text{столкн.}} \rangle$ , показаны на рисунке 2.

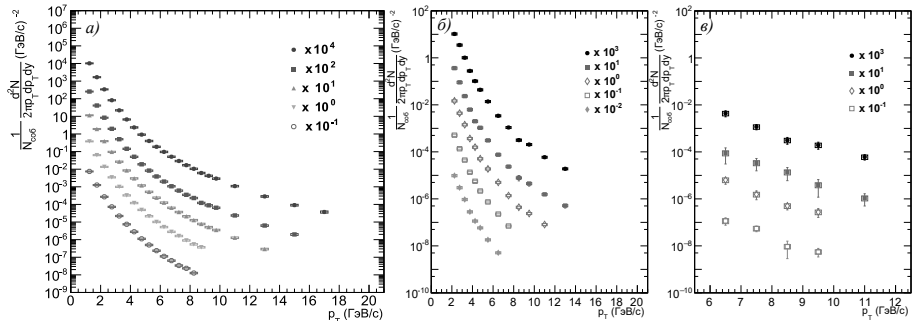


Рис. 1 — Спектры рождения по поперечному импульсу  $\pi^0$ -(a),  $\eta$ -(б) и  $K_S$ -мезонов(в) в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ [12–20]. Зависимости приведены для различных классов по центральности: 0-80% (●); 0-20% (■); 20-40% (▲) и (б,в) (◇); 40-60% ((а (▼), б (□)) и 40-80% (в) (□); 60-80% (а) (○) и (б) (◆).



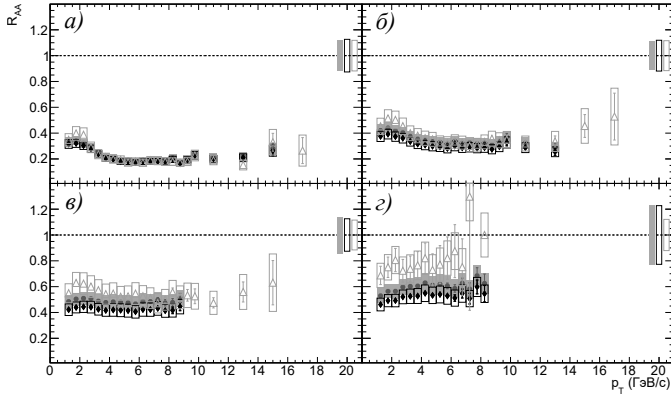


Рис. 2 — Зависимость величины факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -мезонов от поперечного импульса в U+U взаимодействиях ( $\bullet$  - 1 набор,  $\blacklozenge$  - 2 набор) при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ и Au+Au взаимодействиях ( $\triangle$ ) при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ [12; 15; 16; 18; 20; 21]. Зависимости приведены для различных классов по центральности: 0-20% ( $\bullet$ ,  $\blacklozenge$ ) и 0-5% ( $\triangle$ ) (a); 20-40% ( $\bullet$ ,  $\blacklozenge$ ) и 20-30% ( $\triangle$ ) (б); 40-60% ( $\bullet$ ,  $\blacklozenge$ ) и 40-50% ( $\triangle$ ) (в); 60-80% (z). Условные обозначения вертикальных прямоугольников вблизи оси ординат соответствуют систематической погрешности числа парных, нуклон-нуклонных столкновений  $\langle N_{\text{столкн.}} \rangle$ .

На рисунке 2 и следующих рисунках условные обозначения вертикальных «прямоугольников» вблизи оси ординат соответствуют систематической погрешности среднего числа парных, нуклон-нуклонных столкновений  $\langle N_{\text{столкн.}} \rangle$ . При больших  $\langle N_{\text{столкн.}} \rangle$  значения факторов ядерной модификации, измеренные в разных сталкивающихся системах, совпадают, что указывает на независимость степени подавления  $\pi^0$ -мезонов от формы области перекрытия ядер. При малых значениях наблюдается незначительное различие в величинах факторов ядерной модификации, полученных в столкновениях ядер U+U и Au+Au.

На рисунке 3 представлена зависимости факторов ядерной модификации от поперечного импульса  $\eta$ -мезонов, измеренных в U+U и Au+Au столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ и  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ в диапазонах по центральности с близкими значениями среднего числа парных нуклон-нуклонных столкновений  $\langle N_{\text{столкн.}} \rangle$  [17; 19; 22; 23]. При больших  $\langle N_{\text{столкн.}} \rangle$  значения факторов ядерной модификации, измеренные в разных сталкивающихся системах, совпадают, что указывает на независимость степени подавления  $\eta$ -мезонов от формы области перекрытия ядер. При малых значениях наблюдается незначительное различие между значениями факторов ядерной модификации, полученными в столкновениях ядер U+U и Au+Au.

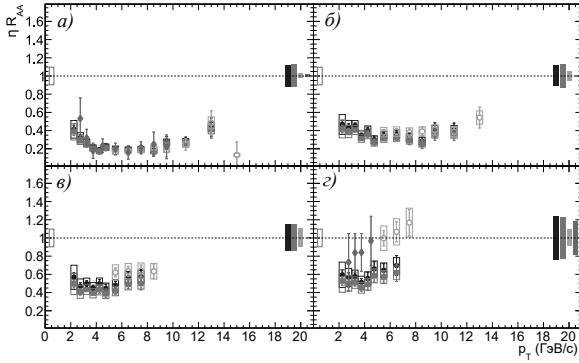


Рис. 3 — Зависимость величины факторов ядерной модификации  $\eta$ -мезонов от поперечного импульса в U+U взаимодействиях ( $\bullet$  - 1 набор,  $\blacksquare$  - 2 набор) при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ и Au+Au взаимодействиях ( $\circ$ ,  $\blacklozenge$ ) при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ [13; 17; 19; 22; 23]. Зависимости приведены для различных классов по центральности: 0-20% ( $\bullet$ ,  $\blacksquare$ ), 0-5% ( $\circ$ ) и 0-10% ( $\blacklozenge$ ) (а); 20-40% (б); 40-60% ( $\bullet$ ,  $\blacklozenge$ ) и 40-50% ( $\circ$ ) (в); 60-80% ( $\bullet$ ,  $\blacksquare$ ) и 60-92% ( $\circ$ ,  $\blacklozenge$ ) (г).

Зависимости факторов ядерной модификации от поперечного импульса  $K_S$ -мезонов, измеренных в U+U, Au+Au и Cu+Cu [12–19; 24; 25] столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ и  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ в диапазонах по центральности с близкими значениями числа парных нуклон-нуклонных столкновений  $\langle N_{\text{столкн.}} \rangle$ , показаны на рисунке 4.

Значения факторов ядерной модификации, измеренные в разных сталкивающихся системах, совпадают в пределах систематических и статистических погрешностей, что указывает на независимость степени подавления  $K_S$ -мезонов от формы области перекрытия ядер.

На рисунке 5 представлены зависимости факторов ядерной модификации от поперечного импульса  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов, рожденных в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ [12–19], в четырех классах по центральности. Поведение факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов совпадает во всем диапазоне по поперечному импульсу в пределах систематической и статистической неопределенности, что свидетельствует о слабой зависимости эффектов конечного состояния от кваркового состава и массы рождающихся мезонов.

Отношения спектров  $\eta/\pi^0$  [17; 19] и  $K_S/\pi^0$  [14] в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в 4 классах центральности изображены на рисунке 6. Отношения спектров не зависят от поперечного импульса и класса центральности в пределах систематической и статистической неопределенности.

На рисунке 7 представлено сравнение интегральных факторов ядерной модификации для  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов, рожденных в столкновениях

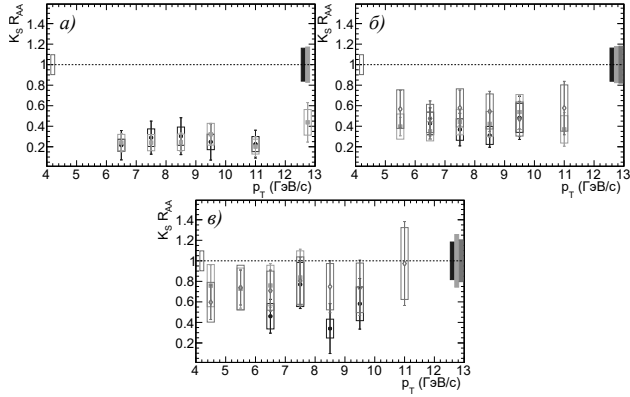


Рис. 4 — Зависимость величины факторов ядерной модификации  $K_S$ -мезонов от поперечного импульса в U+U взаимодействиях (●) при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ, Au+Au (○) и Cu+Cu (◇) взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ [13; 14; 24; 25]. Зависимости приведены для различных классов по центральности: 0-20% (а); 20-40% (●), 20-60% (○) и 0-20% (◇) (б); 40-80% (●), 60-92% (○) и 20-60% (◇) (в).

ядер U+U [12–19], Au+Au [21–23] и Cu+Cu [24; 25] столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ и  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ. Интегрирование произведено в области поперечных импульсов  $p_T > 5$  ГэВ/с. Зависимость интегральных факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов, рожденных в столкновениях ядер U+U в пределах систематической и статистической погрешности совпадает с зависимостью интегральных факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов, рожденных в столкновениях ядер Cu+Cu и Au+Au, что указывает на одинаковое значение энергетических потерь для u-, d- и s- кварков.

В **заклЮчении** приведены основные результаты и выводы, полученные в диссертационном исследовании:

Результаты диссертационной работы:

1. Методика исследования рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ.
2. Инвариантные спектры рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса, в пяти классах по центральности для  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов и в четырех классах по центральности для  $K_S$ -мезонов.
3. Факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ - мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса, в пяти классах по центральности для  $\pi^0$ - и  $\eta$ - мезонов и в четырех классах по центральности для  $K_S$ -мезонов.

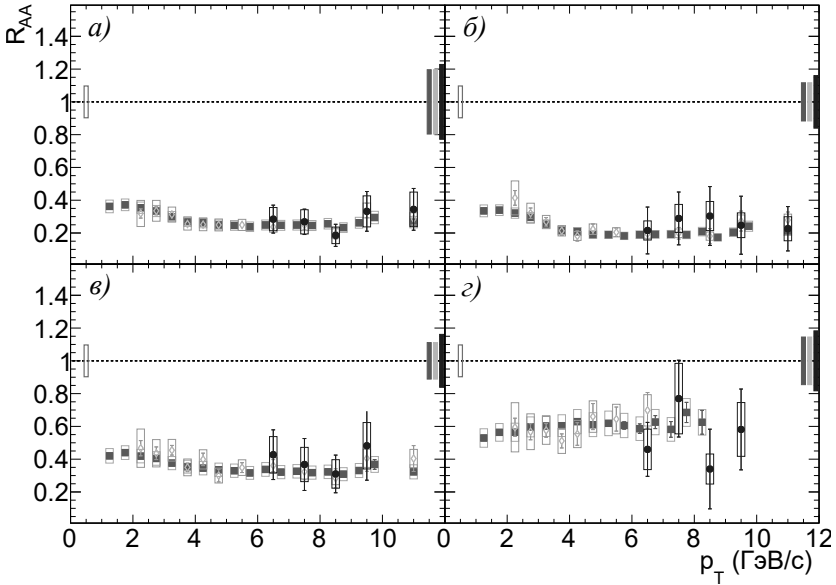


Рис. 5 — Зависимость величины факторов ядерной модификации  $\pi^0$ - (■),  $\eta$ - (◇) и  $K_S$ -мезонов (●) от поперечного импульса в U+U взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ [12–20]. Зависимости приведены для различных классов по центральности: 0-20% (а); 20-40% (б); 60-80% (■, ◇) и 40-80% (в); 0-80% (г).

4. Интегральные факторы ядерной модификации в зависимости от числа нуклонов, участвующих во взаимодействии ( $N_{уч}$ ), измеренные для  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ - мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 192$  ГэВ, Au+Au и Cu+Cu при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.
5. Отношения спектров  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$ , измеренных в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса, в пяти классах по центральности для  $\eta/\pi^0$  и в четырех классах по центральности для  $K_S/\pi^0$ .

Выводы:

1. В центральных столкновениях ядер U+U в области малых и промежуточных поперечных импульсов ( $p_T = 1-5$  ГэВ /c) выход  $\pi^0$ - и  $\eta$ - мезонов и в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5-6$  ГэВ /c) выход  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов подавлен на 70-80 %. В периферийных столкновениях выходы  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в пределах систематических и статистических погрешностей не зависят от поперечного импульса и подавлены на 40-50 %. Совпадение величины фактора ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов, вычисленных для систем сталкивающихся с ядер U+U, говорит об

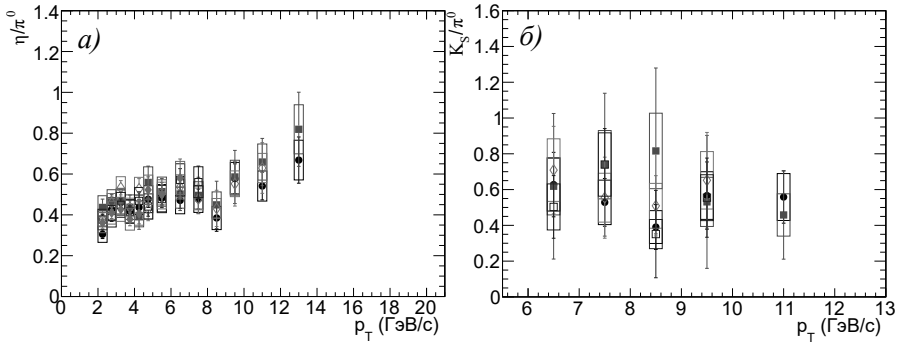


Рис. 6 — Отношения спектров  $\eta/\pi^0$  (а) и  $K_S/\pi^0$  (б) [13; 17; 19], измеренных в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ, в зависимости от поперечного импульса. Зависимости приведены для различных классов по центральности: 0-80% (●); 0-20% (■); 20-40% (◇); 40-60% (а) и 40-80% (б) (□); 60-80% (◆).

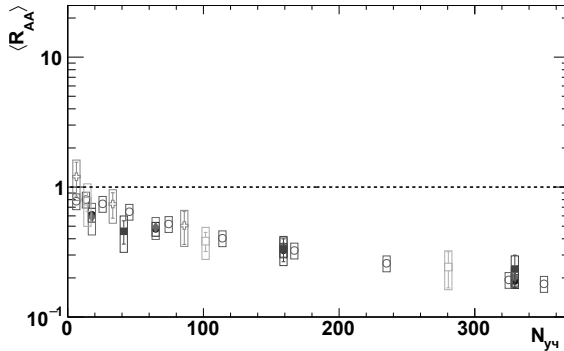


Рис. 7 — Зависимости интегральных факторов ядерной модификации от  $\langle N_{yч.} \rangle$  для  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов [12–25]. Интегрирование произведено в области поперечных импульсов  $p_T > 5$  ГэВ/с для  $\pi^0$ - (●),  $\eta$ - (◆) и  $K_S$ -мезонов (■), рожденных в столкновениях ядер U+U;  $p_T > 5$  ГэВ/с для  $\pi^0$ - (○) и  $p_T > 6$  ГэВ/с для  $K_S$ -мезонов (□), рожденных в столкновениях ядер Au+Au;  $p_T > 6$  ГэВ/с для  $K_S$ -мезонов (+), рожденных в столкновениях ядер Cu+Cu.

отсутствии или слабой зависимости эффектов гашения адронных струй от кваркового состава и массы исследуемых частиц.

2. Подавление выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $K_S$ -мезонов в столкновении 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.

3. Отношения спектров  $\eta/\pi^0$  и  $K_S/\pi^0$ , измеренных в столкновениях ядер U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ, совпадают в пределах систематических и статистических погрешностей во всех классах по центральности, а также с отношениями, измеренными ранее в p+p, p+A и A+A, что говорит об отсутствии зависимости фрагментации партонов от присутствия КГП в U+U при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=192$  ГэВ.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Изучение эффекта гашения струй в системе ультрарелятивистских столкновений ядер урана на эксперименте ФЕНИКС / П. В. Радзевич [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2018. — Т. 11, № 2. — С. 119–129.
2. Experimental Study of Pion Production in U + U interactions at 192 GeV / P. V. Radzevich [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2018. — Oct. — Vol. 82. — P. 1262–1265.
3. Измерение факторов ядерной модификации эта-мезонов при парных столкновениях ядер урана / П. В. Радзевич [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2019. — Т. 12, № 2. — С. 101–110.
4. Подавление выходов адронов в столкновениях ядер урана при различном кварковом составе рождающихся частиц / П. В. Радзевич [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2019. — Т. 12, № 2. — С. 111–120.
5. Experimental research of  $\pi^0$  meson production in U+U collision at 192 GeV / P. V. Radzevich [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — June. — Vol. 1038. — P. 012067.
6. Nuclear modification factors of  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons in U+U collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=192$  GeV / P. V. Radzevich [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Dec. — Vol. 1135. — P. 012046.
7. *Radzevich, P.* Recent results on high-pT particles and jets from PHENIX experiment / P. Radzevich // Proceedings, 12th International Workshop on High-pT Physics in the RHIC/LHC Era (HPT 2017): Bergen, Norway, October, 2-5, 2017. High-pT2017. — 2019. — P. 007.

## Список литературы

1. *Greutz, M.* Gauge fixing, the transfer matrix, and confinement on a lattice / M. Greutz // Phys. Rev. D. — 1977. — Vol. 15. — P. 1128–1136.

2. *Wilson, K. G.* Confinement of quarks / K. G. Wilson // Phys. Rev. D. — 1974. — Oct. — Vol. 10, issue 8. — P. 2445–2459.
3. Nonperturbative QCD: A weak-coupling treatment on the light front / K. G. Wilson [et al.] // Phys. Rev. D. — 1994. — Jan. — Vol. 49, issue 12. — P. 6720–6766.
4. *Laermann, E.* The Status of Lattice QCD at Finite Temperature / E. Laermann, O. Philipsen // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 2003. — Mar. — Vol. 53. — P. 163–198.
5. Formation of Dense Partonic Matter in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at RHIC: Experimental Evaluation by the PHENIX Collaboration / K. Adcox [et al.] // Nucl. Phys. A. — 2005. — Vol. 757. — P. 184–283.
6. *Karsch, F.* Lattice QCD at High Temperature and Density / F. Karsch // Lecture Notes in Physics. — 2002. — Vol. 583. — P. 209–249.
7. *Collins, J. C.* Superdense Matter: Neutrons or Asymptotically Free Quarks? / J. C. Collins, M. J. Perry // Phys. Rev. Lett. — 1975. — May. — Vol. 34, issue 21. — P. 1353–1356.
8. *Rajagopal, K.* The phases of QCD in heavy ion collisions and compact stars / K. Rajagopal // AIP Conference Proceedings. — 2000. — Vol. 549, no. 1. — P. 95–119.
9. *Iordanova, A.* U+U and Cu+Au results from PHENIX / A. Iordanova // Journal of Physics: Conference Series. — 2013. — Aug. — Vol. 458. — P. 012004.
10. *Sahlmüller, B.* Measurement of pi0 and eta Mesons with PHENIX in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au + Au Collisions at RHIC / B. Sahlmueller // Indian J. Phys. — 2011. — T. 85. — C. 981–985.
11. Measurement of  $K_S^0$  and  $K^{*0}$  in  $p + p, d + Au$ , and Cu + Cu collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV / A. Adare [et al.] // Phys. Rev. C. — 2014. — Nov. — Vol. 90, issue 5. — P. 054905.
12. Изучение эффекта гашения струй в системе ультрарелятивистских столкновений ядер урана на эксперименте ФЕНИКС / П. В. Радзевич [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2018. — Т. 11, № 2. — С. 119–129.
13. Измерение факторов ядерной модификации эта-мезонов при парных столкновениях ядер урана / П. В. Радзевич [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2019. — Т. 12, № 2. — С. 101–110.
14. Подавление выходов адронов в столкновениях ядер урана при различном кварковом составе рождающихся частиц / П. В. Радзевич [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2019. — Т. 12, № 2. — С. 111–120.

15. *В. Радзевич, П.* Факторы ядерной модификации нейтральных пи-мезонов в U+U столкновениях при энергии 192 ГэВ / П. В. Радзевич, Д. О. Котов // Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. — 2017. — С. 358–360.
16. Experimental Study of Pion Production in U + U interactions at 192 GeV / P. V. Radzevich [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2018. — Oct. — Vol. 82. — P. 1262–1265.
17. *В. Радзевич, П.*  $\eta$ -мезоны в столкновениях ядер U+U при энергии 192 ГэВ / П. В. Радзевич, Д. О. Котов // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. — 2018. — С. 315–317.
18. Experimental research of  $\pi^0$  meson production in U+U collision at 192 GeV / P. V. Radzevich [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — June. — Vol. 1038. — P. 012067.
19. Nuclear modification factors of  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons in U+U collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=192$  GeV / P. V. Radzevich [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Dec. — Vol. 1135. — P. 012046.
20. *Radzevich, P.* Recent results on high-pT particles and jets from PHENIX experiment / P. Radzevich // Proceedings, 12th International Workshop on High-pT Physics in the RHIC/LHC Era (HPT 2017): Bergen, Norway, October, 2-5, 2017. High-pT2017. — 2019. — P. 007.
21. 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 / A. Adare [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Vol. 101. — P. 232301.
22. High transverse momentum  $\eta$  meson production in  $p+p$ ,  $d+Au$  and  $Au+Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV / S. S. Adler [et al.] // Phys. Rev. C. — 2007. — Vol. 75. — P. 024909.
23. Transverse momentum dependence of  $\eta$  meson suppression in  $Au+Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV / A. Adare [et al.] // Phys. Rev. C. — 2010. — Vol. 82. — P. 011902.
24. Measurement of  $K_S^0$  and  $K^{*0}$  in  $p + p$ ,  $d + Au$ , and  $Cu + Cu$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV / A. Adare [et al.] // Phys. Rev. — 2014. — Vol. C90, no. 5. — P. 054905.
25. *Adare, A. e. a.* Production of  $\omega$  mesons in  $p + p$ ,  $d + Au$ ,  $Cu + Cu$ , and  $Au + Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV / A. e. a. Adare // Phys. Rev. C. — 2011. — Oct. — Vol. 84, issue 4. — P. 044902.

Результаты настоящей работы были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 3.1498.2017/4.6.



*Радзевич Павел Владиславович*

РОЖДЕНИЕ ЛЕГКИХ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ В  $U+U$   
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ  $\sqrt{s_{NN}}=192$  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 \_\_\_\_\_

