

на правах рукописи

**Иванищев Дмитрий Александрович**

**Рождение нейтральных короткоживущих каонов в столкновениях  
ультрарелятивистских ядер при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Самсонов Владимир Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
**Водопьянов Александр Сергеевич**  
кандидат физико-математических наук,  
**Феофилов Григорий Александрович**

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «21» декабря 2011 г. в 17 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, II уч. корп., ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «9» ноября 2011 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.229.29

кандидат физико-математических наук

доцент

Ермакова Н.Ю.

## **Актуальность темы диссертационной работы**

Квантовая хромодинамика (КХД) предсказывает, что при достаточно высокой температуре и/или плотности ядерная материя переходит в состояние со свободными кварками и глюонами и образуется так называемая кварк-глюонная плазма (КГП). Данный фазовый переход реализуется при температуре адронной среды  $T \sim 170$  МэВ ( $10^{12}$  К), что соответствует плотности энергии  $\varepsilon \sim 1$  ГэВ/фм<sup>3</sup>. Считается, что такое состояние материи существовало первые  $10^{-6}$  секунд после Большого взрыва. Экспериментальное исследование фазового перехода адронной материи в КГП и изучение свойств нового состояния вещества позволит лучше понять процессы эволюции Вселенной, строения нейтронных звезд, а также проверить основы КХД.

Поскольку диссертационная работа посвящена исследованию свойств плотной и горячей ядерной среды, образующейся в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер, с помощью измерения особенностей рождения  $K_S$ -мезонов, тема диссертационной работы является, безусловно, актуальной.

## **Цели диссертационной работы**

Основной целью диссертационной работы является экспериментальное исследование влияния плотной и горячей ядерной среды, образующейся в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер, на рождение  $K_S$ -мезонов.

## **Задачи диссертационной работы**

Задачи диссертационной работы заключаются в разработке методики исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер и измерении на её основе инвариантных спектров по поперечному импульсу и факторов ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер дейтерия и золота, ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

## **Научная новизна результатов диссертационной работы**

Автором разработана новая методика исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер, позволяющая эффективно измерять инвариантные спектры по поперечному импульсу и факторы ядерной

модификации для  $K_S$ -мезонов в условиях большой множественности частиц, достигаемой в столкновениях ультрарелятивистских ядер, даже в условиях малой статистической обеспеченности выборки экспериментальных данных. Автором впервые в мире получены результаты исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в области поперечных импульсов  $p_T > 3$  ГэВ/с. Автором впервые в мире получены дифференцированные по центральности столкновений результаты измерений инвариантных спектров по поперечному импульсу и факторов ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

### **Личное участие автора**

При активном и плодотворном участии автора диссертационной работы были поставлены и сформулированы цели и задачи исследования. Им была разработана методика исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер. Автор принимал участие в наборе и обработке экспериментальных данных и осуществлял их физический анализ с целью исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер. Вклад автора в научные работы, которые были опубликованы по теме диссертации, является определяющим.

### **Достоверность результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы были получены путем анализа экспериментальных данных с применением различных модификаций методики исследования рождения  $K_S$ -мезонов. Согласие результатов, полученных с использованием разных модификаций методики, свидетельствует об их достоверности.

### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

Разработанную автором методику исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер можно использовать при анализе данных, накопленных другими экспериментами, например экспериментом

ATLAS или ALICE на ускорителе LHC. Новые результаты, полученные автором, являются систематическим исследованием рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер, позволяют оценить влияние плотной и горячей среды на рождение странных частиц и вносят заметный вклад в выполняемые мировым научным сообществом исследования нового состояния вещества, называемого кварк-глюонной плазмой.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Разработана новая методика исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер.

2. Получены новые физические результаты об инвариантных спектрах  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу в столкновениях ядер дейтерия и золота, ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

3. Получены новые физические результаты о факторах ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер дейтерия и золота, ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

3.1. В центральных столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в области промежуточных поперечных импульсов ( $2 - 5$  ГэВ/ $c$ ) наблюдается 10 % избыток выхода  $K_S$ -мезонов, а в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/ $c$ ) выход  $K_S$ -мезонов подавлен на 10 – 20 %. В периферийных столкновениях ядер дейтерия и золота подавления или избытка выхода  $K_S$ -мезонов не наблюдается.

3.2. В столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ поведение факторов ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в области промежуточных и больших поперечных импульсов в пределах ошибок измерений согласуется с поведением факторов ядерной модификации, измеренных для  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов.

3.3. В центральных столкновениях ядер меди при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/ $c$ ) выход  $K_S$ -

мезонов подавлен примерно в два раза. С уменьшением центральности столкновений эффект подавления уменьшается и в периферийных столкновениях значения фактора ядерной модификации близки к единице во всей области измерений.

3.4. В центральных столкновениях ядер золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) выход  $K_S$ -мезонов подавлен в 4 – 5 раз. В периферийных столкновениях ядер золота наблюдается 20 % подавление выхода  $K_S$ -мезонов во всей области измерений.

3.5. В столкновениях ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ поведение факторов ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в области больших поперечных импульсов в пределах ошибок измерений согласуется с поведением факторов ядерной модификации, измеренных для  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов.

3.6. Зависимости интегральных факторов ядерной модификации от числа нуклонов, участвующих во взаимодействии, измеренные для  $K_S$ -мезонов в области поперечных импульсов  $p_T > 6$  ГэВ/с в столкновениях ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ, хорошо согласуются в пределах ошибок измерений.

4. Сформулированы выводы, сделанные на основе новых физических результатов.

4.1. В периферийных столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ не наблюдается коллективных эффектов, оказывающих влияние на рождение  $K_S$ -мезонов в области поперечных импульсов  $p_T > 2$  ГэВ/с.

4.2. Эффекты начального состояния в столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ слабо зависят от массы мезонов и их кваркового состава.

4.3. Подавление выхода  $K_S$ -мезонов в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) в центральных столкновениях тяжелых ядер (Cu +

Cu, Au + Au) при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ является эффектом конечного состояния и возникает в результате энергетических потерь жёстко рассеянных партонов, проходящих через плотную цветовую среду.

4.4. Величина подавления выхода  $K_S$ -мезонов в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер (Cu + Cu, Au + Au) при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в основном определяется количеством нуклонов, участвующих во взаимодействии, и не зависит от геометрии перекрытия ядер.

4.5. Подавление выхода мезонов в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер (Cu + Cu, Au + Au) при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/ $c$ ) происходит на партонном уровне, и величина энергетических потерь для  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков приблизительно одинакова.

#### **Публикации и апробация диссертационной работы**

По результатам настоящей диссертационной работы опубликовано три печатные работы [1, 2, 3] в журнале, включенном в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, рекомендованные Высшей аттестационной комиссией («Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета»). Автором представлены результаты диссертационной работы на VII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (Харьков, Украина, 2010 г.), IX международной конференции по ядерной физике «Ядро 2010. Методы ядерной физики для фемто- и нанотехнологий» (Санкт-Петербург, 2010 г.) и конференции по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 2010 г.).

#### **Содержание и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертационной работы составляет 128 стр., 47

рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 75 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлены её цели и задачи. Показана научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы, обоснована их достоверность. Отражено личное участие автора, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и кратко изложено содержание её разделов.

Первая глава посвящена состоянию и перспективам развития исследования кварк-глюонной плазмы на ускорителе RHIC на момент начала работ по теме диссертации. Рассмотрены эффекты начального и конечного состояний и их влияние на рождение адронов в столкновениях ультрарелятивистских ядер. Показан существующий результат измерения дифференциального сечения рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях протонов при энергии  $\sqrt{S} = 200$  ГэВ. Обоснована необходимость и актуальность исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер дейтерия и золота, ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

Во второй главе представлено описание ускорителя тяжелых ионов на встречных пучках RHIC и экспериментальной установки PHENIX. Рассмотрена возможность регистрации установкой PHENIX рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер путем регистрации мезонов в канале распада  $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$ . Подробно описаны особенности и характеристики системы внутренних детекторов, электромагнитного калориметра и триггерной системы (триггера первого уровня и  $\gamma$ -триггера) установки PHENIX, позволяющие производить подобные измерения в широкой области поперечных импульсов для столкновений различной центральности.

Третья глава посвящена описанию новой методики экспериментального исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер. Методика состоит из семи этапов, подробно описанных в этой главе [1 – 3]: анализ экспериментальных данных, определение центральности столкновений, оптимизация критериев отбора нейтральных частиц, измерение



выхода  $K_S$ -мезонов, вычисление эффективности регистрации  $K_S$ -мезонов в экспериментальной установке, вычисление эффективностей триггерных систем, определение инвариантных выходов и факторов ядерной модификации, оценка систематических ошибок измерений.

В четвертой главе представлены результаты исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер и их обсуждение. Инвариантные спектры  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу в столкновениях ядер дейтерия и золота [1], ядер меди [2, 4 – 6] и ядер золота [3 – 6] при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ показаны на рисунке 1.

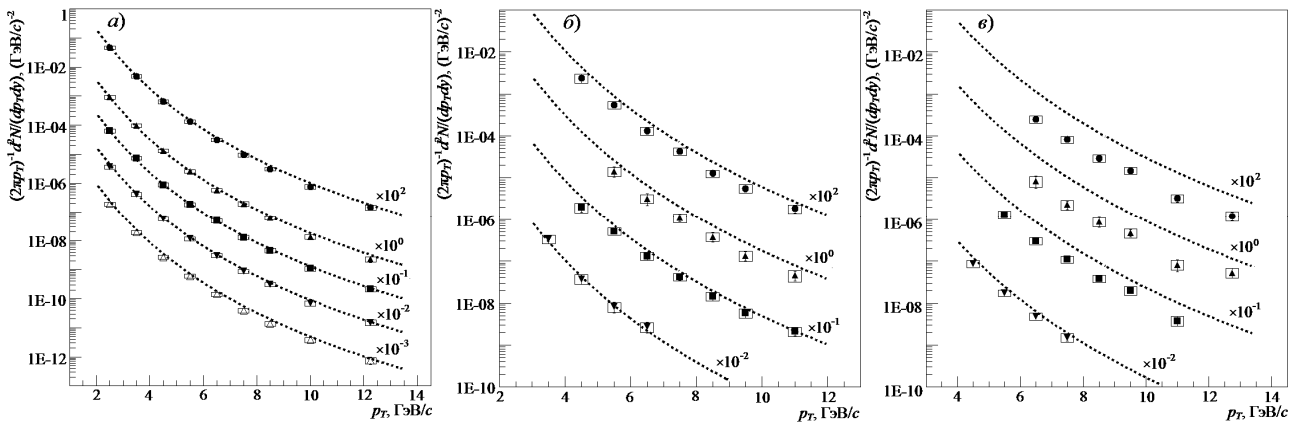


Рисунок 1 – Инвариантные спектры  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу в столкновениях ядер дейтерия и золота (а), ядер меди (б) и ядер золота (в) при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ [1 – 6]. Измерения выполнены для различных классов событий по центральности, %: 0 – 88, 94, 93 (●); 0 – 20 (▲); 20 – 40 (а – ■); 20 – 60 (б, в – ■); 40 – 60 (а – ▼); 60 – 88 (Δ); 60 – 94, 93 (б, в – ▼). Пунктиры – аппроксимации спектров  $(p + p) \times \langle N_{ст} \rangle$  [7]

Пунктирные линии – результат аппроксимации инвариантного спектра  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу в протон-протонных взаимодействиях функцией Тсаллиса [7], умноженный на соответствующее число парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений ( $\langle N_{ст} \rangle$ ). На этом и на следующих рисунках вертикальные «усы» и прямоугольники вокруг символов соответствуют статистическим и систематическим ошибкам измерений. Быстрота  $|\nu| < 0,35$ . Измерения выполнены для различных классов событий по центральности в диапазоне поперечных импульсов от 2 до 13,5 ГэВ/с. Диапазон

измерений в области малых поперечных импульсов ограничен быстро уменьшающимся аксептансом экспериментальной установки, а в области больших поперечных импульсов – доступной статистикой.

На рисунке 2 представлено сравнение факторов ядерной модификации ( $R_{AA}$ ), измеренных для  $K_S^-$  [1],  $\pi^0$  [8],  $\eta$ - [8],  $\omega$ - [9],  $\phi$ -мезонов [10] и протонов [11] в периферийных и центральных столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

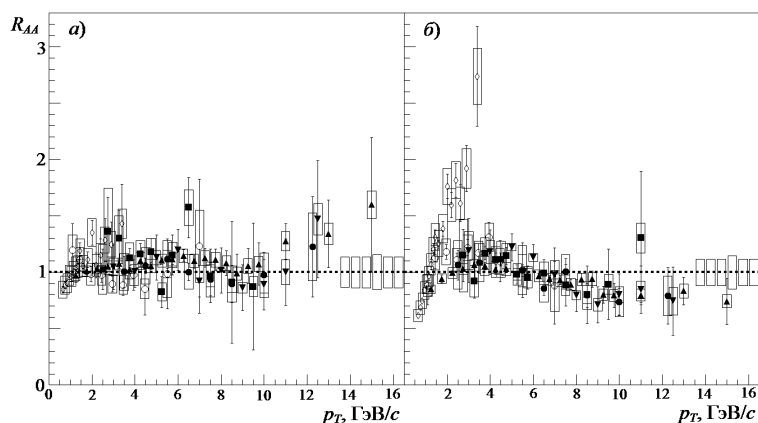


Рисунок 2 – Зависимости факторов ядерной модификации для  $K_S^-$  (●),  $\pi^0$  (▲),  $\eta$ - (■),  $\omega$ - (▼),  $\phi$ -мезонов (○) и протонов (◇) от поперечного импульса в периферийных (а) и центральных (б) столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ [1, 8 – 11]. Шесть вертикальных прямоугольников вблизи оси ординат соответствуют систематическим ошибкам типа С для  $K_S^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\eta$ -,  $\omega$ -,  $\phi$ -мезонов и протонов (справа налево)

Поведение факторов ядерной модификации для  $K_S^-$ -мезонов в области промежуточных (2 – 5 ГэВ/с) и больших ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) поперечных импульсов в пределах ошибок измерений согласуется с поведением факторов ядерной модификации, ранее измеренных для  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов. В периферийных столкновениях факторы ядерной модификации близки к единице для всех адронов. В области промежуточных поперечных импульсов в центральных столкновениях наблюдается избыточный выход адронов. Для барионов эффект более выражен чем для мезонов. В то же время степень избыточности выходов всех мезонов одинакова (10 – 15 %). В области больших поперечных импульсов в центральных столкновениях выходы мезонов

одинаково подавлены (10 – 20 %). Одинаковость степени избыточности и степени подавления мезонов свидетельствует о том, что эффекты начального состояния слабо зависят от массы мезонов и их кваркового состава.

На рисунке 3 представлено сравнение факторов ядерной модификации, измеренных для  $K_s^-$ - [3 – 6],  $\pi^0$ - [12],  $\eta$ - [13],  $\omega$ - [9] и  $\phi$ -мезонов [10] в периферийных и центральных столкновениях ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

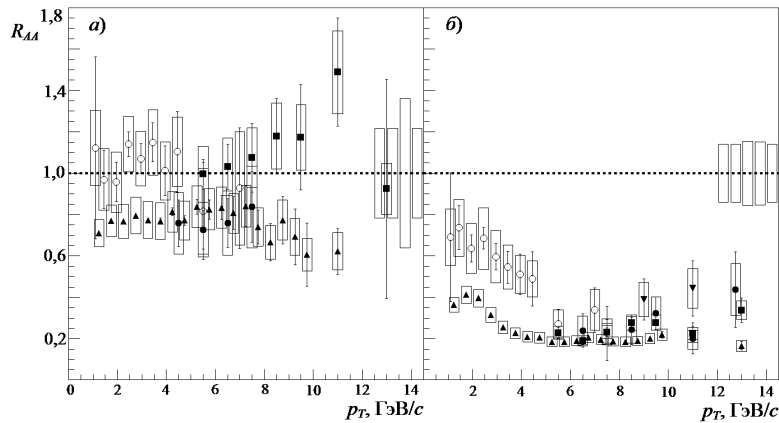


Рисунок 3 – Зависимости факторов ядерной модификации для  $K_s^-$  (●),  $\pi^0$  (▲),  $\eta$  (■),  $\omega$  (▼) и  $\phi$ -мезонов (○) от поперечного импульса в периферийных (а) и центральных (б) столкновениях ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ [3 – 6, 12, 13, 9, 10]. Пять вертикальных прямоугольников вблизи оси ординат соответствуют систематическим ошибкам типа С для  $K_s^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов (справа налево)

Как и выход  $K_s^-$ -мезонов, выходы  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов подавлены приблизительно в пять раз при  $p_T > 5$  ГэВ/с в центральных столкновениях ядер золота. Степень подавления остаётся постоянной в области поперечных импульсов 5 – 14 ГэВ/с. В периферийных столкновениях наблюдается 10 – 20 % подавление выходов мезонов.

На рисунке 4 представлено сравнение факторов ядерной модификации, измеренных для  $K_s^-$  [2, 4 – 6],  $\pi^0$  [14],  $\omega$  [9] и  $\phi$ -мезонов [10] в периферийных и центральных столкновениях ядер меди при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ. Анализ этих данных показывает, что степень подавления выходов  $K_s^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов при  $p_T > 5$  ГэВ/с в центральных столкновениях ядер меди одинакова и

составляет 40 – 60 %. Степень подавления остаётся постоянной в области поперечных импульсов 5 – 12 ГэВ/с. В периферийных столкновениях выходы мезонов не подавлены.

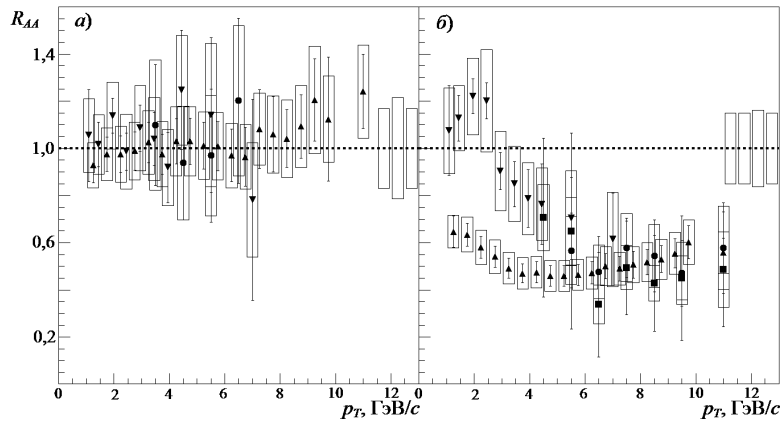


Рисунок 4 – Зависимости факторов ядерной модификации для  $K_s^-$  (●),  $\pi^0$  (▲),  $\omega$  (■) и  $\phi$ -мезонов (▼) от поперечного импульса в периферийных (а) и центральных (б) столкновениях ядер меди при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ [2, 4 – 6, 14, 9, 10]. Четыре вертикальных прямоугольника вблизи оси ординат соответствуют систематическим ошибкам типа С для  $K_s^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов (справа налево)

Слабое влияние эффектов начального состояния на рождение  $K_s^-$ -мезонов не позволяет описать измеренное в данной работе подавление выхода  $K_s^-$ -мезонов в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) в центральных столкновениях тяжелых ядер (Cu + Cu, Au + Au) при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ. Одинаковые степени подавления мезонов в центральных столкновениях ядер золота и ядер меди свидетельствует о том, что подавление возникает в результате энергетических потерь жёстко рассеянных партонов, проходящих через плотную цветовую среду.

На рисунке 5 произведено сравнение интегральных факторов ядерной модификации, измеренных для  $K_s^-$  [2, 3],  $\pi^0$  [12],  $\eta$ - [13] и  $\omega$ -мезонов [9] в столкновениях ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ. Интегрирование проведено в области поперечных импульсов  $p_T > 6$  ГэВ/с для  $K_s^-$ -мезонов и  $p_T > 7$  ГэВ/с – для  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $\omega$ -мезонов. Точки, представленные на

рисунке 5, были аппроксимированы следующей функциональной зависимостью [12]:

$$\langle R_{AA} \rangle(N_{\text{уч}}) = \left(1 - S_0 N_{\text{уч}}^{a_0}\right)^{n-2}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{уч}}$  – число нуклонов, участвующих во взаимодействии;  $S_0$ ,  $a_0$  – свободные параметры;  $n$  – показатель степенной функции, равный 8,1 – был оценён путем аппроксимации инвариантного спектра  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу, измеренного в протон-протонных взаимодействиях, степенной функцией [7]. Были получены следующие значения для свободных параметров:  $S_0 = (9,9 \pm 0,7) \cdot 10^3$  и  $a_0 = 0,55 \pm 0,01$ . Величина  $\chi^2$ , деленная на число степеней свободы, для результата аппроксимации была меньше трех. В рамках моделей GLV и PQM для параметра  $a_0$  было получено значение  $\sim 2/3$ , что находится в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями. Таким образом, результаты измерения интегральных факторов ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов, полученные в настоящей диссертационной работе, подтверждают тот факт, что подавление мезонов в области больших поперечных импульсов происходит на партонном уровне, и что величина энергетических потерь для  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков приблизительно одинакова.

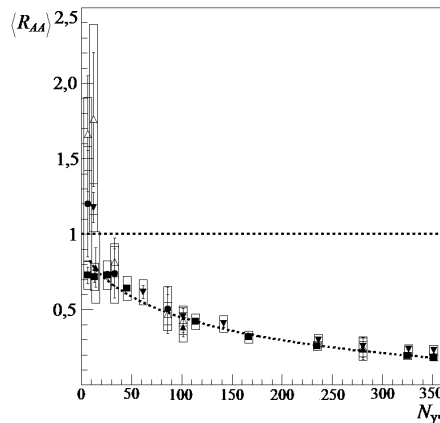


Рисунок 5 – Зависимости интегральных факторов ядерной модификации от  $N_{\text{уч}}$ , для  $K_S$ - ( $\bullet$ ,  $\blacktriangle$ ),  $\pi^0$ - ( $\blacksquare$ ),  $\eta$ - ( $\blacktriangledown$ ) и  $\omega$ -мезонов ( $\triangle$ ) [2, 3, 12, 13, 9]. Измерения выполнены в Cu + Cu ( $\bullet$ ,  $\triangle$ ) и Au + Au ( $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangledown$ ,  $\triangle$ ) столкновениях при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ. Интегрирование проведено в области поперечных импульсов  $p_T > 6$  ГэВ/ $c$  для  $K_S$ -мезонов и  $p_T > 7$  ГэВ/ $c$  – для  $\pi^0$ -,  $\eta$ - и  $\omega$ -мезонов. Пунктир – аппроксимация интегральных факторов зависимостью (1)

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

### **Основные результаты диссертационной работы**

1. Разработана и применена новая методика исследования рождения  $K_S$ -мезонов в столкновениях ультррелятивистских ядер, позволяющая эффективно измерять инвариантные спектры по поперечному импульсу и факторы ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в условиях большой множественности частиц, достигаемой в столкновениях ультррелятивистских ядер, даже в условиях малой статистической обеспеченности выборки экспериментальных данных.

2. Измерены инвариантные спектры  $K_S$ -мезонов по поперечному импульсу в столкновениях ядер дейтерия и золота, ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

3. Измерены факторы ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в столкновениях ядер дейтерия и золота, ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ.

3.1. В центральных столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в области промежуточных поперечных импульсов ( $2 - 5$  ГэВ/с) наблюдается 10 % избыток выхода  $K_S$ -мезонов, а в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) выход  $K_S$ -мезонов подавлен на 10 – 20 %. В периферийных столкновениях ядер дейтерия и золота подавления или избытка выхода  $K_S$ -мезонов не наблюдается.

3.2. В столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ поведение факторов ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в области промежуточных и больших поперечных импульсов в пределах ошибок измерений согласуется с поведением факторов ядерной модификации, измеренных для  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов.

3.3. В центральных столкновениях ядер меди при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) выход  $K_S$ -мезонов подавлен примерно в два раза. С уменьшением центральности столкновений эффект подавления уменьшается и в периферийных столкновениях значения фактора ядерной модификации близки к единице во всей области измерений.

3.4. В центральных столкновениях ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) выход  $K_S$ -мезонов подавлен в 4 – 5 раз. В периферийных столкновениях ядер золота наблюдается 20 % подавление выхода  $K_S$ -мезонов во всей области измерений.

3.5. В столкновениях ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ поведение факторов ядерной модификации для  $K_S$ -мезонов в области больших поперечных импульсов в пределах ошибок измерений согласуется с поведением факторов ядерной модификации, измеренных для  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов.

3.6. Зависимости интегральных факторов ядерной модификации от числа нуклонов, участвующих во взаимодействии, измеренные для  $K_S$ -мезонов в области поперечных импульсов  $p_T > 6$  ГэВ/с в столкновениях ядер меди и ядер золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ, хорошо согласуются в пределах ошибок измерений.

**Выводы диссертационной работы**, сделанные на основе новых физических результатов:

1. В периферийных столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ не наблюдается коллективных эффектов, оказывающих влияние на рождение  $K_S$ -мезонов в области поперечных импульсов  $p_T > 2$  ГэВ/с.

2. Близость факторов ядерной модификации, измеренных для  $K_S$ -,  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов в столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии  $\sqrt{S_{NN}} =$

200 ГэВ свидетельствует о том, что эффекты начального состояния слабо зависят от массы мезонов и их кваркового состава.

3. Подавление выхода  $K_s$ -мезонов в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) в центральных столкновениях тяжелых ядер (Cu + Cu, Au + Au) при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ является эффектом конечного состояния и возникает в результате энергетических потерь жёстко рассеянных партонов, проходящих через плотную цветовую среду.

4. Величина подавления выхода  $K_s$ -мезонов в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер (Cu + Cu, Au + Au) при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в основном определяется количеством нуклонов, участвующих во взаимодействии, и не зависит от геометрии перекрытия ядер.

5. Подавление выхода мезонов в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер (Cu + Cu, Au + Au) при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5 - 6$  ГэВ/с) происходит на партонном уровне, и величина энергетических потерь для  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков приблизительно одинакова.

### Публикации автора

1. **Бердников, Я.А.** Рождение короткоживущих нейтральных каонов в столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии 200 ГэВ [Текст] / Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, В.М. Самсонов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.–2011.–№ 3(129).–С. 134–139.

2. **Бердников, Я.А.** Рождение короткоживущих нейтральных каонов в столкновениях ядер меди при энергии 200 ГэВ [Текст] / Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, В.М. Самсонов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.–2011.–№ 2(122).–С. 116–121.

3. **Бердников, А.Я.** Подавление выхода короткоживущих нейтральных каонов в центральных столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ [Текст] / А.Я. Бердников, Д.А. Иванищев, В.М. Самсонов [и др.] // Научно-технические



ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.–2011.–№ 2(122).–С. 111–116.

4. **Berdnikov, Ya.A.** Recent results on intermediate and high- $p_T$  production of light hadrons relativistic heavy ion collisions at RHIC [Text] / Ya.A. Berdnikov, D. Ivanischev, V. Samsonov [et al.] // Book of abstracts of LX international conference on nuclear physics «Nucleus 2010», July 6–9, 2010, Saint-Petersburg, Russia.–2010.–P. 148.

5. **Бердников, Я.А.** Зависимость величины подавления выхода лёгких адронов от энергии взаимодействия тяжёлых ядер на эксперименте PHENIX [Текст] / Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, В.М. Самсонов [и др.] // Сборник тезисов докладов VII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. Харьков: Изд-во ННЦ ХФТИ.–2010.–С. 47.

6. **Бердников, Я.А.** Обзор последних результатов по измерению легких адронов в области промежуточных и больших поперечных импульсов в столкновениях тяжелых релятивистских ядер на коллайдере RHIC [Текст] / Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, В.М. Самсонов [и др.] // Сборник тезисов докладов конференции по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика.СПб». 27–28 октября 2010 года. Санкт-Петербург.–2010.–С. 40.

#### Список литературы

7. **Adare, A.** Measurement of neutral mesons in  $p + p$  collisions at  $\sqrt{S} = 200$  GeV and scaling properties of hadron production [Text] / A. Adare, D. Ivanischev, V. Samsonov [et al.] // Phys. Rev. D.–2011.–Vol. 83.–P. 052004.

8. **Adler, S.S.** Centrality dependence of  $\pi^0$  and  $\eta$  production at large transverse momentum in  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV  $d + Au$  Collisions [Text] / S.S. Adler, Y. Berdnikov, V. Samsonov [et al.] // Phys. Rev. Lett.–2007.–Vol. 98.–P. 172302.

9. **Adare, A.** Production of  $\omega$ -mesons in  $p + p$ ,  $d + Au$ ,  $Cu + Cu$ , and  $Au + Au$  collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV [Text] / A. Adare, D. Ivanischev, V. Samsonov [et al.] // Preprint arXiv:1105.3467.–2011.–P. 1–13.

10. **Adare, A.** Nuclear modification factors of  $\phi$  mesons in  $d + \text{Au}$ ,  $\text{Cu} + \text{Cu}$ , and  $\text{Au} + \text{Au}$  collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV [Text] / A. Adare, D. Ivanischev, V. Samsonov [et al.] // Phys. Rev. C.–2011.–Vol. 83.–P. 024909.
11. **Adler, S.S.** Nuclear effects on hadron production in  $d + \text{Au}$  collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV revealed by comparison with  $p + p$  data [Text] / S.S. Adler, Y. Berdnikov, V. Samsonov [et al.] // Phys. Rev. C.–2006.–Vol. 74.–P. 024904.
12. **Adare, A.** Suppression pattern of neutral pions at high transverse momentum in  $\text{Au} + \text{Au}$  collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV and constraints on medium transport coefficients [Text] / A. Adare, Y. Berdnikov, V. Samsonov [et al.] // Phys. Rev. Lett.–2008.–Vol. 101.–P. 232301.
13. **Adare, A.** Transverse momentum dependence of  $\eta$  meson suppression in  $\text{Au} + \text{Au}$  collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 200$  GeV [Text] / A. Adare, D. Ivanischev, V. Samsonov [et al.] // Phys. Rev. C.–2010.–Vol. 82.–P. 011902.
14. **Adare, A.** Onset of  $\pi^0$  suppression studied in  $\text{Cu} + \text{Cu}$  collisions at  $\sqrt{S_{NN}} = 22.4$ , 62.4 and 200 GeV [Text] / A. Adare, D. Ivanischev, V. Samsonov [et al.] // Phys. Rev. Lett.–2008.–Vol. 101.–P. 162301.

---

Подписано в печать 28.10.11	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Цифровая Печ. л. 1.25
Уч.-изд. л. 1.25	Тираж 70	Заказ 12/10
		печать

---

Отпечатано в типографии «Фалкон Принт»

(197101, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, д. 54, офис 2)