

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора РАН Лохтина Игоря Петровича на диссертационную работу Жарко Сергея Вячеславовича «Особенности образования нейтральных мезонов в столкновениях ядер меди и золота при энергии 200 ГэВ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 (физика атомного ядра и элементарных частиц)

Целью настоящей диссертационной работы является экспериментальное изучение рождения нейтральных  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в соударениях ионов меди и золота при энергии в системе центра масс 200 ГэВ на пару нуклонов. В работе проведено измерение инвариантных импульсных спектров  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов, получены отношения выходов мезонов различных типов  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  и факторы ядерной модификации для  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в зависимости от поперечного импульса. Измерения проведены в различных классах центральности соударений Cu+Au. Экспериментальное изучение механизмов множественного рождения частиц в релятивистских соударениях тяжелых ионов позволяет получить важную информацию о свойствах субъядерной материи в режимах экстремально высоких плотностей энергий и температур и является одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной физики высоких энергий. Одним из основных признаков формирования плотной и горячей сильновзаимодействующей материи («кварк-глюонной плазмы», КГП) является подавление выхода жестких адронов в ядро-ядерных взаимодействиях по сравнению с соответствующими протон-протонными соударениями, что наблюдалось в экспериментах на коллайдерах RHIC и LHC. Система Cu+Au при энергии в системе центра масс 200 ГэВ на пару нуклонов является единственной доступной для анализа несимметричной системой ион-ионных взаимодействий, обладая дополнительной асимметрией в направлении, соединяющем центры сталкивающихся ядер. Изучение особенностей рождения легких адронов (в частности,  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов) и сравнение полученных результатов с соответствующими данными для симметричных систем при тех же энергиях может позволить установить характер зависимости эффекта «гашения адронных струй» от формы области перекрытия сталкивающихся ядер и наложить дополнительные ограничения на значения параметров различных феноменологических моделей,

описывающих энергетические потери высокоэнергичных кварков и глюонов в горячей среде. Таким образом, тема диссертационной работы является весьма **актуальной**. Результаты работы важны для понимания природы сильных взаимодействий и вносят значимый вклад в развитие релятивистской ядерной физики.

Степень **научной новизны** работы представляется высокой. Автором были получены и проанализированы новые экспериментальные данные для соударений Cu+Au при энергии в системе центра масс 200 ГэВ на пару нуклонов: инвариантные импульсные спектры  $\pi^0$ -мезонов в семи классах центральности и  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в пяти классах центральности; отношения выходов мезонов различных типов  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  в пяти классах центральности; факторы ядерной модификации  $\pi^0$ -мезонов в семи классах центральности и  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в пяти классах центральности. В диссертации впервые показано, что отношения  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  в соударениях Cu+Au в пределах погрешностей измерений не зависят от центральности взаимодействий и, более глобально, от типа сталкивающихся систем (включая ядро-ядерные, адрон-ядерные, адрон-адронные взаимодействия и электрон-позитронную аннигиляцию). Еще одним важным новым результатом является наблюдение равной степени подавления различных типов нейтральных мезонов ( $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ ) в разных интервалах поперечного импульса и классах центральности соударений Cu+Au; при этом соответствующие факторы ядерной модификации в пределах погрешностей измерений для соударений Cu+Au, Au+Au и Cu+Cu также совпадают (при близких значениях чисел «нуклонов-участников»), что может свидетельствовать о независимости (либо слабой зависимости) эффекта гашения струй от формы области перекрытия сталкивающихся ядер. Результаты представленных измерений в дальнейшем могут быть использованы для тестирования различных теоретических моделей ядро-ядерных взаимодействий.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (последний содержит 150 наименований).

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

В **первой главе** кратко изложены базовые положения релятивистской ядерной физики. Рассмотрены проблемы деконфайнмента в Квантовой хромодинамике и

фазового перехода между КГП и адронной материей, приведены описание геометрии и принципиальная схема эволюции ядро-ядерных взаимодействий, обсуждены основные признаки формирования КГП в столкновениях тяжелых ионов, дан обзор ряда экспериментальных результатов, полученных на коллайдерах RHIC и LHC (включая результаты измерения факторов ядерной модификации адронов в соударениях Au+Au, Cu+Cu, Pb+Pb).

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

В **третьей главе** подробно описана методика измерения инвариантных спектров по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов. Рассмотрена подготовка выборок данных к физическому анализу, обоснован выбор критериев отбора данных, приведено описание измерения первичного выхода  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов, сделаны оценки эффективности регистрации мезонов и приведена классификация систематических погрешностей проводимых измерений.

В **четвертой главе** приведены результаты измерений инвариантных спектров по поперечному импульсу  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов, отношений выходов мезонов различных типов  $\eta/\pi^0$ ,  $K_S/\pi^0$  и  $\omega/\pi^0$  и факторов ядерной модификации этих мезонов в соударениях Cu+Au при энергии в системе центра масс 200 ГэВ на пару нуклонов. Представлены сравнения факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в соударениях Au+Au, Cu+Cu и Cu+Au для данной энергии.

В **заключении** сформулированы основные полученные результаты и выводы.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов основывается на использовании и адаптации общепринятых методик анализа данных и современного программного обеспечения, применяемых в физике высоких энергий. При этом учтена специфика эксперимента PHENIX. Методика регистрации  $\pi^0$ -,  $\eta$ -,  $K_S$ - и  $\omega$ -мезонов в соударениях Cu+Au разработана на основе методических указаний, принятых в коллаборации PHENIX; при этом использовались различные модификации методики. Выход  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов был измерен независимо в различных подсистемах электромагнитного калориметра. Результаты обсуждались на семинарах коллаборации PHENIX и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

В качестве **замечаний** к диссертации можно отметить следующее.

1. Во вводной части диссертации написано, что «начиная с 2005 г., опытное наблюдение КГП неоднократно проводилось в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер ( $A+A$ ) на Коллайдере релятивистских тяжелых ионов (RHIC, БНЛ)». При этом, однако, не упомянуто, что первые указания на формирование КГП, такие как аномальное подавление выхода  $J/\psi$ -мезонов, тепловое излучение фотонов и лептонных пар и усиленный выход «странных» адронов, были получены в предыдущих экспериментах с фиксированной мишенью на ускорителе SPS (см., например, U.Heinz, M.Jacob, arXiv:nucl-th/0002042).
2. При обзоре признаков формирования КГП в разделе 1.3 можно было бы для полноты картины упомянуть эффект подавления выхода связанных состояний тяжелых кварков (кваркониев) и эффект усиления выхода странных адронов.
3. Одной из целей данной работы является разработка методики регистрации нейтральных мезонов в соударениях  $Cu+Au$  при энергии 200 ГэВ в эксперименте PHENIX. Данная методика подробно описана в разделе 3 диссертации, но из текста не очень понятно, есть ли какие-то качественные особенности и, соответственно, необходимы ли принципиальные модификации в данной методике (связанные, например, с несимметричностью системы сталкивающихся ионов) по сравнению с методикой, использованной ранее при проведении аналогичных измерений в эксперименте PHENIX для других систем ( $Au+Au$ ,  $Cu+Cu$ ,...), или имеет место прямое обобщение уже разработанных ранее подходов.
4. На основе того, что измеренные соотношения между выходами различных нейтральных мезонов в пределах погрешностей измерений не зависят от типа сталкивающихся систем (включая ядро-ядерные, адрон-ядерные и адрон-адронные взаимодействия, а также электрон-позитронную аннигиляцию), сделан вывод «о независимости (или о слабой зависимости) состава адронной струи... от присутствия КГП». Полагаю, что для однозначных выводов о модификации (или не модификации) состава адронных струй в соударениях тяжелых ионов измерений только нейтральных мезонов недостаточно, т.к. помимо них в струях присутствуют заряженные мезоны и барионы, измерение различных соотношений между которыми в таком случае также необходимо.

Однако вышеуказанные замечания не влияют на основные результаты работы и не снижают общей высокой оценки диссертации. Диссертационная работа является законченным исследованием, которое выполнено на высоком научном уровне и содержит ряд новых и актуальных результатов. Полученные результаты достоверны, сформулированные научные выводы обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях, соответствующих списку ВАК РФ, и докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК, адекватно отражает основное содержание диссертации и содержит необходимые формулировки цели и задач исследований, выносимых на защиту.

Считаю, что данная диссертационная работа полностью соответствует предъявляемым к кандидатским диссертациям требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор Жарко Сергей Вячеславович заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 «физика атомного ядра и элементарных частиц».

18 марта 2020 года

Доктор физико-математических наук, профессор РАН,  
ведущий научный сотрудник

Отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ,

адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

тел.: +7-495-939-12-57 (раб.), +7-916-190-80-32 (моб.)

адрес электронной почты: [igor@lav01.sinp.msu.ru](mailto:igor@lav01.sinp.msu.ru)

Игорь Петрович Лохтин

Подпись И.П. Лохтина заверяю  
Ученый секретарь НИИЯФ МГУ  
кандидат физико-математических наук



Екатерина Александровна Сигаева