

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук

Тихомирова Владимира Олеговича

на диссертационную работу Радзевича Павла Владиславовича

«Рождение легких нейтральных мезонов в U+U взаимодействиях

при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Столкновения тяжелых ядер в области больших энергий являются уникальной возможностью для создания и изучения кварк-глюонной плазмы (КГП), состояния деконфайнмента ядерной материи, в лабораторных условиях. Сегодня исследования свойств кварк-глюонной плазмы активно проводятся в международных экспериментах на ускорительных комплексах RHIC (БНЛ) и LHC (ЦЕРН). Тема диссертационной работы без сомнения **актуальна**, так как является важной частью систематического исследования свойств ядерной материи в условиях больших температур и плотностей энергии на коллайдере RHIC. Изучение свойств кварк-глюонной плазмы в диссертационной работе реализовано с помощью экспериментального исследования рождения π^0 -, η - и K_S -мезонов в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ в эксперименте PHENIX. Одним из свидетельств образования кварк-глюонной плазмы является эффект «гашения адронных струй», обусловленный потерями энергии высокоэнергичных партонов (кварков и глюонов) в кварк-глюонной среде. Данный эффект проявляется, в частности, в подавлении выхода адронов в области больших значений поперечного импульса по сравнению с выходом таких же адронов в протон-протонных столкновениях при той же энергии. Ранее данный эффект наблюдался в других системах сталкивающихся ядер (Au+Au, Cu+Cu и Pb+Pb) в экспериментах на RHIC и LHC. Система U+U столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ представляет большой интерес для исследования процессов рождения частиц, потому что форма ядер урана и, как следствие, плотность распределения нуклонов в ядрах урана не является сферически симметричной. Кроме того, в столкновениях ядер урана достигается максимально возможная на RHIC плотность энергии. Изучение особенностей рождения легких адронов и их сравнение с другими системами столкновений релятивистских тяжелых ядер при близких значениях энергии позволяет установить характер зависимости эффекта «гашения адронных струй» от индивидуальных особенностей сталкивающихся ядер и провести дополнительные ограничения на значения параметров различных

феноменологических моделей, описывающих энергетические потери высокоэнергичных партонов в кварк-глюонной среде. Результаты и выводы работы являются частью систематического исследования свойств КГП в столкновениях релятивистских ядер и позволяют оценить влияние плотной и горячей среды на рождение частиц при формировании КГП.

Степень **научной новизны** обеспечена целым рядом результатов и выводов, представленных в работе. Автором впервые были получены инвариантные спектры рождения по поперечному импульсу, факторы ядерной модификации по поперечному импульсу π^0 -, η - и K_S -мезонов в различных классах центральности U+U столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ, впервые получены отношения выхода мезонов η/π^0 и K_S/π^0 в зависимости от поперечного импульса в разных классах по центральности U+U столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ, также впервые вычислены интегральные факторы ядерной модификации π^0 -, η - и K_S -мезонов в зависимости от среднего числа нуклонов, участвующих во взаимодействии. Автор диссертационной работы впервые показал, что факторы ядерной модификации π^0 -, η - и K_S -мезонов в столкновениях U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ совпадают в пределах неопределенности в разных диапазонах поперечного импульса и классах центральности, что говорит об отсутствии или слабой зависимости эффектов гашения адронных струй от кваркового состава и массы исследуемых частиц. Впервые показано, что выход легких нейтральных мезонов (π^0 , η и K_S) в столкновениях U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ подавлен в равной степени по сравнению с их выходом в протон-протонных столкновениях при тех же энергиях. Кроме того, подавление выхода π^0 -, η - и K_S -мезонов в U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ оказалось таким же, как в столкновениях Au+Au и Cu+Cu при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ при близких значениях числа парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений, что говорит об отсутствии зависимости подавления выхода π^0 -, η - и K_S -мезонов от геометрической формы наблюдаемых сталкивающихся ядер. В диссертации впервые показано, что отношения выхода η/π^0 и K_S/π^0 в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ не зависят от центральности в пределах неопределенности измерений, и значения этих отношений равны в пределах неопределенности значениям отношений тех же мезонов, измеренными ранее в p+p, p+A и A+A столкновениях, что говорит об отсутствии зависимости фрагментации партонов от присутствия КГП в U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ.

Полученные автором результаты вносят важный вклад в развитие физики высоких энергий и могут быть использованы для проверки различных феноменологических моделей, описывающих свойства кварк-глюонной плазмы, сравнительного анализа результатов в экспериментах на RHIC и LHC, а также в будущих экспериментах на NICA (ОИЯИ, Дубна) и

FAIR (GSI, Германия). Разработанная автором методика может быть адаптирована для получения результатов в других системах столкновений релятивистских тяжелых ядер.

Достоверность полученных результатов обеспечивается тем, что разработанная автором методика измерения выхода π^0 -, η - и K_S -мезонов в U+U столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ базируется на методических указаниях, принятых коллаборацией PHENIX, которая специализируется на исследованиях свойств ядерного вещества, рождающегося в релятивистских столкновениях тяжелых ядер, и является одним из основных экспериментов в мире по исследованию свойств кварк-глюонной плазмы. Выходы π^0 - и η -мезонов измерялись независимо в двух разных типах электромагнитного калориметра. При восстановлении K_S -мезонов по каналу распада $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$ использовались дочерние частицы распада, измеренные независимо в различных подсистемах электромагнитного калориметра. Достоверность результатов также подтверждается их апробацией на международных конференциях и достаточным объемом публикаций в рецензируемых журналах баз ВАК, SCOPUS и Web Of Science.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 106 страниц, 45 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 97 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели, научная новизна и практическая значимость работы. Представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание основных разделов диссертации.

В **первой главе** приведены свойства частиц, исследуемых автором, также изложены основные этапы развития представлений о кварк-глюонной плазме и эволюция способов исследования ядерного вещества в условиях большой температуры и плотности энергии. Обоснована необходимость исследования рождения легких мезонов (π^0 , η и K_S) в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ.

Во **второй главе** представлено описание коллайдера релятивистских тяжелых ионов RHIC и экспериментальной установки PHENIX с указанием основных детекторных подсистем и их характеристик. Приведено описание функционирования основных триггеров, срабатывающих при накоплении экспериментальных данных, а также детально описаны конструкционные особенности электромагнитных калориметров, которые использовались для регистрации продуктов распада исследуемых легких нейтральных мезонов.

Третья глава посвящена описанию разработанной автором методики исследования особенностей рождения легких нейтральных π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ. В частности, подробно описан алгоритм измерения инвариантных

выходов π^0 -, η - и K_S -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ. Представлен способ оценки эффективности регистрации исследуемых частиц, использованный для электромагнитных калориметров эксперимента PHENIX. Приведена классификация неопределенностей измерений, а также представлены результаты вычисления неопределенности измерений легких нейтральных мезонов. Описан способ измерения инвариантных дифференциальных спектров рождения π^0 -, η - и K_S -мезонов в электромагнитном калориметре эксперимента PHENIX. Представлена методика вычисления факторов ядерной модификации и интегральных факторов ядерной модификации, а также описан способ получения спектров рождения исследуемых мезонов в p+p столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ.

В **четвертой главе** представлены физические результаты, полученные автором диссертационной работы в результате анализа экспериментальных данных спектрометра PHENIX. Представлены инвариантные спектры по поперечному импульсу π^0 -, η - и K_S -мезонов, рожденных в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ. Представлены факторы ядерной модификации π^0 -, η - и K_S -мезонов, рожденных в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, а также их сравнение с факторами ядерной модификации, полученными в столкновениях ядер Au+Au и Cu+Cu при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ. Представлены интегральные факторы ядерной модификации легких мезонов в столкновениях ядер U+U, Au+Au и Cu+Cu. Представлены отношения спектров η/π^0 и K_S/π^0 , измеренные в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ.

В **заключении** изложены основные результаты и выводы, полученные при выполнении настоящей работы.

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

1. Основная информация по используемым в работе экспериментальным данным получена с помощью электромагнитных калориметров, устройство и характеристики которых даны достаточно полно. Но поскольку в тексте приводится краткое описание и других детекторов установки PHENIX, было бы уместным привести их основные характеристики типа пространственного или временного разрешения.

2. В разделе 3.1.2 (Определение критериев отбора событий) говорится: «Результатом сравнения являются величины χ^2 (подсистема PbSc) и $P\gamma$ (подсистема PbGl)» и приводятся соответствующие величины для отбора. Обозначение χ^2 является достаточно широко употребляемым, а вот что такое $P\gamma$ – остается загадкой: по крайней мере, оппоненту не удалось найти в тексте определения этого параметра.

3. На рис. 3.6 и подписи к нему не указано – какие из приведенных данных относятся к прямым π^0 мезонам, а какие – к частицам от распада K_S .

4. Раздел 3.5.9. Во втором предложении, по-видимому, должны быть приведены величины погрешностей, связанные с конверсией π^0 и η мезонов.

Сделанные выше замечания имеют, скорее, редакторский характер и не влияют на выводы диссертационной работы. Диссертационная работа Радзевича Павла Владиславовича выполнена на высоком научном уровне и содержит целый ряд важных результатов, полученных в эксперименте PHENIX при исследовании рождения легких нейтральных мезонов в столкновениях ядер урана при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в научных изданиях, соответствующих списку ВАК РФ, и докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК и правильно отражает основное содержание диссертации.

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, Радзевич Павел Владиславович, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 «физика атомного ядра и элементарных частиц».

«17» марта 2020 года

Ведущий научный сотрудник,
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук (ФИАН),
Кандидат физико-математических наук,
Тихомиров Владимир Олегович
119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 53
тел.: +7 499-132-60-32, e-mail: Vladimir.Tikhomirov@cern.ch

Подпись В.И. Тихомирова удостоверяю
Учёный секретарь ФИАН,
кандидат физико-математических наук,
Андрей Владимирович Колобов



«17» марта 2020 года

Мой список основных работ по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Puri Akshat, Aaboud M., Aad G. et. al., «Measurement of angular and momentum distributions of charged particles within and around jets in Pb+Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV with ATLAS at the LHC», Nucl. Phys. A, 2019, v. 982, p. 177-179
2. Zhou Mingliang, Aaboud M., Aad G. et. Al., «Flow fluctuations in Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV with the ATLAS detector», Nucl. Phys. A, 2019, v. 982, p. 391-394
3. Aaboud M., Aad G., Abbott B et. al., «Search for pairs of highly collimated photon-jets in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector», Phys. Rev. D, 2019, v. 99, p. 012009
4. Aaboud M., Aad G., Abbott B et. al., «Search for vector-boson resonances decaying to a top quark and bottom quark in the lepton plus jets final state in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector», Phys. Lett. B, 2019, v. 788, p. 347-370
5. Aaboud M., Aad G., Abbott B et. al., «Search for heavy Majorana or Dirac neutrinos and right-handed W gauge bosons in final states with two charged leptons and two jets at TeV with the ATLAS detector», JHEP, 2019, v. 2019, p. 16
6. Aaboud M., Aad G., Abbott B et. Al., «Search for long-lived particles in final states with displaced dimuon vertices in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector», Phys. Rev. D, 2019, v. 99, p. 012001


/Тихомиров В.О./