

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Токарева Михаила Владимировича на диссертацию 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 данной работы является экспериментальное исследование на установке PHENIX особенностей рождения π^0 , η , K_S и ω -мезонов в релятивистских Cu+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на коллайдере RHIC.

Актуальность темы диссертационной работы

Новое состояние ядерной материи, образующееся в столкновениях релятивистских тяжелых ионов, интенсивно изучается на ускорителях SPS и LHC в ЦЕРН и на первом в мире коллайдере релятивистских ионов и поляризованных протонов RHIC в БНЛ. Эти исследования проводятся в широком диапазоне энергии и центральности столкновения, поперечных импульсов регистрируемых частиц и разнообразном наборе пробников (адроны, лептоны, струи).

Основная задача программы ядерных исследований с релятивистскими тяжелыми ионами – установить свойства ядерной материи при различных плотностях энергии и температурах и фазовую диаграмму. Особый интерес вызывают изучение сигнатур фазовых переходов, поиск положения и изучение поведения ядерной материи вблизи критической точки. Результаты экспериментов, проведенных коллаборациями PHOBOS, BRAHMS, STAR и PHENIX на RHIC, в столкновениях ядер золота при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ показали ряд ярких закономерностей – подавление выходов адронов с большими поперечными импульсами («jet quenching»), коллективные потоки («number quark scaling»), $\Delta\phi$ - $\Delta\eta$ корреляции («ridge effect»), которые интерпретируются как следствие образования в центральных столкновениях ядер сильно-взаимодействующей материи со свойствами, напоминающими скорее идеальную жидкость кварков и глюонов с малой вязкостью, чем идеальных газ этих частиц. Сходные закономерности были наблюдаемы также при значительно большей энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ в столкновениях ядер свинца на коллайдере LHC.

Развитие и проверка теоретических моделей рождения частиц и коллективных эффектов в ядерной среде представляют значительный научный интерес и связаны с поиском новых явлений и фундаментальными исследованиями, охватывающими физику частиц, ядерную физику и физику конденсированного состояния ядерной материи.

Одной из важных характеристик прохождения кварков и глюонов через ядерную вещество являются энергетические потери. Они характеризуют состояние ядерной материи и используются для разработки микроскопической картины

рождения частиц в ядро-ядерных столкновениях. Информация о потерях энергии может быть получена из экспериментальных данных по импульсным выходам рожденных частиц и факторам ядерной модификации. В качестве пробников могут быть использованы как заряженные, так и нейтральные частицы. В данной работе для изучения модификации выходов частиц используются особенности рождения легких мезонов (π^0 , η , K_S , ω) в Cu+Au соударениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в широкой области значений поперечного импульса, вплоть до $p_T = 20$ ГэВ/с, и центральности соударения. Набор пробников, отличающихся массой, спином, четностью и странностью, предоставляет возможность более «тонкого» анализа экспериментальных данных и установления четких закономерностей, необходимых для развития моделей. Другой особенностью работы является использование столкновений несимметричных ядер, Cu и Au. Такие столкновения характеризуются геометрией перекрытия, отличной от геометрии симметричных Au+Au и Cu+Cu систем. В центральных столкновениях асимметричных ядер, Cu и Au, ядро меди полностью поглощается ядром золота, что приводит к уменьшению числа нуклон-нуклонных взаимодействий. В полу-центральных столкновениях появляется дополнительная асимметрия области перекрытия, что должно отразиться как в свойствах ядерной материи, так и особенностях образования частиц.

На основании вышеизложенного, следует признать, что тема диссертационной работы Жарко Сергея Вячеславовича, посвященная особенностям образования легких нейтральных π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в столкновениях ядер меди и золота при энергии 200 ГэВ, представляется **важной и актуальной**, так как содержит **систематическое изучение** свойств нового состояния ядерной материи, характеризующейся высокой плотностью энергии и температурой.

Научная новизна

В диссертационной работе получены новые физические результаты по рождению легких π^0 -, η - и K_S - и ω -мезонов в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ на установке PHENIX:

1. Разработана методика исследования рождения легких нейтральных мезонов в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ на установке PHENIX.
2. Впервые получены выходы рождения легких нейтральных мезонов в зависимости от центральности соударения и импульса регистрируемой частицы.
3. Впервые получены отношения выходов η/π^0 , K_S/π^0 и ω/π^0 легких нейтральных мезонов в Cu+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в зависимости от центральности столкновения и поперечного импульса регистрируемой частицы.
4. Впервые получены факторы ядерной модификации π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в Cu+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в зависимости от центральности столкновения и поперечного импульса регистрируемой частицы.

Задачи, решенные в диссертации

1. Разработана методика измерения выходов π^0 -, η - и K_S - и ω -мезонов в Cu+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на установке PHENIX.
2. Получены выходы π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в Cu+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в зависимости от центральности столкновения и поперечного импульса регистрируемой частицы.
3. Получены отношения выходов η/π^0 , K_S/π^0 и ω/π^0 легких нейтральных мезонов в Cu+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в зависимости от центральности столкновения и поперечного импульса регистрируемой частицы.
4. Получены факторы ядерной модификации π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в Cu+Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в зависимости от центральности столкновения и поперечного импульса регистрируемой частицы.

Оформление диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Объем диссертации составляет 136 страниц, 55 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 150 наименования.

Во **введении** сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, дано обоснование актуальности и важности исследуемых проблем, сформулированы научная новизна полученных результатов и практическая значимость представляемой работы, отмечен личный вклад автора в получении результатов исследований, связанных с темой, и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан краткий обзор экспериментальных результатов в области изучения ядерной материи, образующейся в релятивистских столкновениях тяжелых ионов на коллайдерах RHIC и LHC, обсуждаются теоретические аспекты, необходимые для понимания и интерпретации результатов, полученных в данной работе (характеристики легких нейтральных мезонов, представления о кварк-глюонной плазме), проблемы, связанные с поиском сигнатур фазовых переходов, поиском критической точки и с установлением фазовой диаграммой ядерной материи, качественная схема временной эволюции ядро-ядерного столкновения, включающей фазы – термализации, равновесия, химического и кинетического вымораживания (freeze-out) ядерной материи.

Во **второй главе** представлено описание и характеристики ускорительного комплекса RHIC как ускорителя релятивистских протонов и ядер. В главе описаны назначение, конструкция, состав и характеристики детекторных подсистем спектрометра PHENIX; триггеров реального времени, используемых для получения выборок данных; приведены конструкционные особенности системы электромагнитных калориметров, используемых для регистрации π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов, образующихся в столкновениях тяжелых ионов.

Спектрометр PHENIX включает в себя четыре плеча, систему глобальных детекторов и систему магнитов. Восточное и западное центральные плечи

регистрируют γ -кванты, электроны и заряженные адроны. Южное и северное продольные плечи регистрируют мюоны. Глобальные детекторы используются для определения геометрических характеристик сталкивающихся ядер.

Акцептанс восточного и западного плеч охватывает диапазон псевдобыстрот $|\eta| < 0.35$ и 90 градусов по азимутальному углу. Дрейфовые камеры (DC) используются для регистрации треков заряженных частиц, три слоя падовых камер (PC1, PC2 и PC3) для подтверждения треков, зарегистрированных в DC. Восемь секторов электромагнитного калориметра используются для регистрации γ -квантов, электронов и позитронов, а также для измерения промежутков времени, идентификации заряженных адронов и инициализации триггера событий с высоким энерговыделением.

Время-пролетная система (TOF) совместно с электромагнитным калориметром используется для разделения сигналов от заряженных пионов, каонов и протонов в области поперечного импульса $p_T < 4$ ГэВ/с. Идентификация заряженных адронов в области больших значений поперечного импульса проводится с помощью черенковского счетчика, наполненного кварцевым аэрогелем. Детекторы переходного излучения (RICH) используются для идентификации электронов и позитронов при малых значениях поперечного импульса ($0.02 < p_T < 4$ ГэВ/с).

Акцептансы северного и южного мюонных плеч, охватывают диапазоны псевдобыстрот $1.15 < \eta < 2.44$ и $-2.25 < \eta < -1.15$, соответственно, и полный азимутальный угол. Мюонные калориметры (MPC) используются для измерения количества энергии, выделенной в продольных плечах, мюонный трекер (MuTr) - для регистрации мюонных треков, система мюонных фильтров (MuID) - для отбора редких мюонных событий.

В систему глобальных детекторов входят два счетчика ядро-ядерных столкновений (BBC), два адронных калориметра малых углов (ZDC), детекторов плоскости реакции (RPC1, RPC3) и кварцевых вершинных детекторов (VTX, FVTX). Счетчики BBC используются для классификации столкновений по центральности, определения начала отсчета времени с момента ядро-ядерного столкновения и координаты вершины ядро-ядерного столкновения вдоль оси z , а также инициализации Minimum Bias триггера (MB).

Калориметры ZDC, расположенные в области $|\eta| > 6.9$ псевдобыстроты, используются для регистрации нейтронов-спектаторов и определения светимости пучков. Корреляция сигналов в ZDC и BBC, использовалась для определения центральности столкновения.

Детекторы плоскости реакции (RPC1, RPC3), расположенные в областях $1.0 < |\eta| < 1.5$ и $1.5 < |\eta| < 2.8$ псевдобыстроты продольных плеч спектрометра PHENIX, используются для классификации ядро-ядерных столкновений по направлению плоскости реакции. Детекторы VTX и FVTX предназначены для определения значений поперечных координат вершины ядро-ядерного столкновения.

В спектрометре PHENIX используются две подсистемы электромагнитных калориметров – сцинтилляционный сэмплинг-калориметр (PbSc) и черенковский калориметр (PbGl). Первый (PbSc) распределен между четырьмя секторами в западном плече и двумя секторами в восточном плече. Второй (PbGl) состоит из двух секторов, расположенных в восточном плече установки. Акцептанс каждого сектора электромагнитного калориметра составляет 0.7 единиц псевдобыстроты и 22.5 градуса по азимутальному углу. Подсистема PbSc обладает лучшими линейностью и временным разрешением, а PbGl - лучшими энергетическим и пространственным разрешением. Использование двух различных подсистем электромагнитного калориметра в рамках одного эксперимента позволяет проводить перекрестную проверку результатов измерений.

В **третьей главе** подробно описана разработанная автором методика исследования рождения легких мезонов по каналам $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\eta \rightarrow \gamma\gamma$, $K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$ и $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$, позволяющая достичь основной цели диссертационной работы - определение инвариантных выходов и факторов ядерной модификации легких нейтральных π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов, образующихся в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

Разработанная в работе методика включает:

1. Первичную подготовку экспериментальных данных (определение критериев отбора данных, активной площади детектора в ходе физического цикла работы коллайдера, эффективности триггера ERT, тонкую калибровку детектора);
2. Измерение величины первичного выхода мезонов (количество мезонов, зарегистрированных в установке в разных интервалах поперечного импульса и классах центральности Cu+Au столкновений);
3. Оценку эффективности регистрации мезонов в установке (полное Монте-Карло моделирования событий и восстановление выходов частиц);
4. Оценку систематической погрешности измерений для определения выходов π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов.

Отметим, что разработанная методика отбора данных с идентификацией частиц в широкой области поперечных импульсов и центральностей, оценка статистических и систематических погрешностей, позволили автору впервые получить инвариантные выходы и факторы ядерной модификации легких нейтральных мезонов π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов, образующихся в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ.

В **четвертой главе** приведены и обсуждаются основные результаты, полученные автором при проведения диссертационного исследования:

1. Представлены результаты измерения инвариантных выходов рождения π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов, рожденных в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.

2. Представлены результаты измерения отношения η/π^0 и K_S/π^0 и ω/π^0 выходов легких нейтральных мезонов, рожденных в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ и установлена их зависимость (постоянство) от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.
3. Представлены результаты измерения фактора ядерной модификации для π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов, рожденных в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.
4. Проведено сравнение факторов ядерной модификации π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов, рожденных в Cu+Au, Au+Au и Cu+Cu столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.

В **Заключении** сформулированы основные **результаты и выводы** по результатам, полученным автором в рамках данной работы:

1. Разработана и применена методика исследования рождения π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в столкновениях Cu+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ.
2. Получены инвариантные выходы π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в столкновениях Cu+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса регистрируемой частицы и центральности соударения.
3. Получены отношения η/π^0 и K_S/π^0 и ω/π^0 выходов легких нейтральных мезонов, рожденных в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса регистрируемой частицы и центральности соударения.
4. Получены факторы ядерной модификации π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в столкновениях Cu+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса регистрируемой частицы и центральности соударения.

Сформулированы выводы

1. О независимости отношений η/π^0 и K_S/π^0 и ω/π^0 выходов легких нейтральных мезонов, рожденных в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ, от центральности в пределах неопределенности измерений.
2. О равенстве отношений η/π^0 , K_S/π^0 и ω/π^0 выходов легких нейтральных мезонов, рожденных в Cu+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ в пределах неопределенности, отношениям тех же мезонов, измеренных ранее в e^+e^- , $h+h$, $h+A$, $A+A$ столкновениях.
3. О равенстве в каждом классе центральности факторов ядерной модификации π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов, рожденных в столкновениях Cu+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ, для разных интервалов по поперечному импульсу факторам ядерной модификации адронных струй в области $p_T > 10$ ГэВ/с в той же системе.
4. О подавлении в центральных Cu+Au столкновениях выходов π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов по сравнению с выходами в $p+p$ столкновениях в области $p_T = 4-10$ ГэВ/с

примерно в два раза. В области больших значений поперечного импульса степень подавления слабо уменьшается с p_T .

5. О равенстве, в пределах неопределенности измерений, факторов ядерной модификации π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов, рожденных в столкновениях Cu+Au, Au+Au, Cu+Cu при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ при близких значениях числа участников и в одинаковых интервалах поперечного импульса.

Практическая значимость результатов и рекомендации по использованию

Разработанная и реализованная автором методика получения выходов π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в столкновениях ядер Cu+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ на установке PHENIX может быть адаптирована для получения выхода этих же мезонов с помощью электромагнитных калориметров в других системах сталкивающихся ядер, а также измерения выхода мезонов в цепочках распада, заканчивающихся рождением γ -квантов.

Новые результаты (выходы и отношения выходов частиц, факторы ядерной модификации) являются частью систематических исследований рождения π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер и позволяют оценить влияние плотной и горячей среды на рождение частиц при формировании кварк-глюонной плазмы. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при сравнительном анализе свойств ядерной материи в экспериментах PHENIX, STAR, ALICE, ATLAS, CMS, NA61/SHINE, включены в программу специальных дисциплин при подготовке студентов по направлению экспериментальной ядерной физики в институтах и университетах МГУ, СПбГУ, МИФИ, ФИАН, ОИЯИ, НИЦ Курчатовский институт, использованы для проверки и развития феноменологических моделей и Монте Карло генераторов, а также планирования физических программ на будущих ускорительных комплексах тяжелых ионов NICA (ОИЯИ, Дубна) и FAIR (GSI, Германия).

Полученные в диссертации результаты вносят **существенный вклад в систематическое экспериментальное изучение** свойств ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов на RHIC при экстремально больших значениях энергии столкновения и плотности множественности с использованием легких нейтральных мезонов. Эти результаты представляют значительную **теоретическую ценность** для понимания нового состояния ядерной материи и установления особенностей её фазовой диаграммы.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием результатов, полученных с применением двух типов электромагнитных калориметров (PbSc и PbGl). Высокий профессиональный уровень участников коллаборации PHENIX и одобрение с её стороны результатов, представляемой работы, также является признанием их достоверности. Результаты, полученные в работе, докладывались на крупных международных конференциях, рабочих совещаниях коллаборации PHENIX и изложены в 11 публикациях, индексированных в базах Web-of-Science/SCOPUS и рекомендованных ВАК.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на совещаниях международной коллаборации PHENIX в БНЛ, семинарах ОФВЭ ПИЯФ, ЛФВЭ ОИЯИ, на международных конференциях «Hadron Structure & QCD» (2016, Gatchina, Russia), «Hard Probes» (2016, Wuhan, China), «PhysicA.SPb» (2016, 2017, 2018, Saint Petersburg, Russia), «Quark Matter» (2017, Chicago, USA), «Nucleus-2017» (Almaty, Kazakhstan), «Nucleus-2018» (Voronezh, Russia), на университетских конференциях «Неделя Науки СПбПУ» (2016, 2017, 2018) (Санкт-Петербург, Россия), на 51-й и 53-й Зимней школе ПИЯФ (2017, 2018, 2019) (Рощино, Россия).

Вклад автора

Автор диссертационной работы является членом коллаборации PHENIX. Он принимал непосредственное и активное участие в работе эксперимента, наборе экспериментальных данных по рождению легких мезонов и анализе данных, включая выходы и факторы ядерной модификации π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в столкновениях ядер Cu+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ. Автор внес определяющий вклад в разработку методики измерений, работу по отбору и анализу данных, моделированию, созданию программ для анализа данных, получению физических результатов, оценке систематических погрешностей измерений и, как принципиальный автор, в подготовке статьи от имени коллаборации. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

В **Заключении** диссертации перечислены основные результаты работы и сформулированы наиболее значимые положения, выносимые на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Замечания по работе:

1. Для понимания роли различных механизмов в образовании π^0 -, η -, K_S - и ω -мезонов в столкновениях Cu+Au было бы полезно сравнить их выходы с результатами прямых, в рамках КХД, и модельных МС расчетов с использованием генераторов, упомянутых в диссертации.

2. Требуется уточнения (ссылки на литературу) вывода в) на странице 8: «отношения выходов мезонов в Cu+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ равны в пределах неопределенности отношениям тех же мезонов, измеренным ранее в $e+e^-$, hh, hA, AA».

3. Смещение понятий - «инвариантные выходы» называются «спектрами», «вероятности каналов распада» называются «коэффициентами ветвления».

4. Что означает надпись на рисунках 3.24-3.27 «без уточнения центральности» (стр. 88-90).

5. Искажение смысла в предложении:

«Вследствие большой множественности частиц, создаваемой в столкновениях тяжелых ядер, среднее расстояние между электромагнитными ливнями достаточно мало для того, чтобы измеренные значения $E_{\text{класт.}}$ искажались за счет примеси энергии соседних кластеров» (стр. 48).

6. Выходы частиц на рисунках 4.1 и 4.2 аппроксимированы функцией (3.10), а на рисунках 4.3 и 4.4 функцией (4.1). Какая физическая мотивация такого выбора?

Заключение

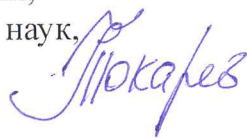
Отмеченные замечания не уменьшают общую положительную оценку диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Жарко Сергея Вячеславовича «Особенности образования нейтральных мезонов в столкновениях ядер меди и золота при энергии 200 ГэВ» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации. В опубликованных автором работах отражены основные результаты и положения диссертации. Диссертационная работа обладает научной и практической значимостью.

Оформление диссертации, публикации и апробация работы соответствуют «Положению о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 и от 21.04.2016 г. №335), а автор диссертационной работы Жарко Сергей Вячеславович заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент:

Начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник



Токарев Михаил Владимирович
« 03 » марта 2020 г.

Почтовый адрес:

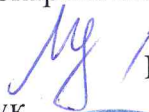
141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Телефон: +7 (49621) 65-059

E-mail: tokarev@jinr.ru

Подпись сотрудника ЛФВЭ ОИЯИ Токарева М.В. заверяю.

Ученый секретарь ЛФВЭ ОИЯИ,
кандидат физико-математических наук



Пешехонов Дмитрий Владимирович



Список основных публикаций М.В.Токарева
в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации
за последние 5 лет

1. Tokarev M.V., Kechechyan A.O., Zborovsky I. «Validation of z-scaling for negative particle production in Au+Au collisions from BES-I at STAR», 2020, Nucl. Phys. A, v.993, p.121646.
2. Adam J.,...Tokarev M.V et. al. «Charge-dependent pair correlations relative to a third particle in p + Au and d + Au collisions at RHIC», 2019, Phys. Lett. B, v.798, p.134975.
3. Adam J.,...Tokarev M.V. et. al. «First observation of the directed flow of D^0 and \bar{D}^0 in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV», 2019, Phys. Rev. Lett, v.123, p.162301.
4. Adam J.,...Tokarev M.V. et. al. «Observation of Excess J/ψ Yield at Very Low Transverse Momenta in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and U+U Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV», 2019, Phys. Rev. Lett, v.123, №13, p.132302.
5. Tokarev M.V., Kechechyan A.O., Zborovsky I. «Self-similarity of negative particle production in Au+Au collisions at STAR», 2019, Physics of Particles and Nuclei Letters, v.16, № 5, pp.508-513.
6. Adam J.,...Tokarev M.V. et. al. «Azimuthal Harmonics in Small and Large Collision Systems at RHIC Top Energies», 2019, Phys. Rev. Lett, v.122, p.172301.
7. Adam J.,...Tokarev M.V. et. al. «Collision-energy dependence of pt correlations in Au+Au collisions at energies available at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider», 2019, Phys. Rev. C, v.99, p.044918.
8. Tokarev M.V., Zborovsky I. «New indication on scaling properties of strangeness production in pp collisions at RHIC», 2017, Int. J. Mod. Phys. A, v.32, № 5, p.1750029.