«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Объединенного института

Ядерных исследований, академик РАН

В.А. Матвеев

«\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Андронова Евгения Владимировича

«Корреляции и флуктуации экстенсивных и интенсивных величин в протонных и ядерных столкновениях при высоких энергиях»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика

Диссертация посвящена теоретическому исследованию влияния эффекта слияния струн, выбора конфигураций начальных состояний на корреляционные и флуктуационные наблюдаемые в протонных и ядерных столкновениях при высоких энергиях.

**Актуальность темы исследований проведенных в диссертационной работе не вызывает сомнений.** Она определяется необходимостью получения новых теоретических предсказаний и сравнения модельных расчетов с имеющимися экспериментальными данными величин, характеризующих образование частиц в столкновениях протонов и ядер высоких энергий с целью поиска явных сигнатур образования коллективных эффектов нового состояния ядерной материи.

Исследование процессов множественного рождения частиц в релятивистких столкновениях адронов и ядер является одной из наиболее актуальных проблем физики высоких энергий, что подтверждается не только текущими исследования на действующих ускорителях SPS, RHIC, LHC, но и программами исследования в этой области на будущих ускорителях NICA и FAIR, планируемых к запуску в ОИЯИ (Дубна) и GSI (Дармштадт). Все ядерные программы, осуществляемые и планируемые в мировых научных центрах (CERN, BNL, GSI, JINR), ставят своей целью получить убедительные доказательства существования этого нового состояния и детально исследовать его свойства, установив характерные особенности диаграммы состояния. Изучаемые в работе дальние корреляции множественности и поперечного импульса, а также их флуктуации в событиях с большой множественностью предствляют адекватные инструменты для решения поставленной задачи. Разработка моделей множественного образования частиц и сравнение с имеющимися экспериментальными данными позволит провести отбор моделей и установить роль характерных механизмов, в частности слияния цветных струн, в формировании нового соотояния ядерной материи.

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 145 страниц, включая 73 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 146 наименований.

**Оценка содержания диссертации**

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются основные задачи, научная новизна и практическая ценность работы, приводится краткое содержание отдельных глав.

В первой главе вводятся основные понятия о корреляциях по быстроте, приводится описание модели с двумя типами струн, теоретические и численные расчеты коэффициентов корреляции. Исследуются общие зависимости коэффициентов корреляции от начальных состояний системы. Описывается обобщение модели для описания отбора событий по центральности и сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

**Новизна исследования**

В этом разделе диссертации автором **получены новые и оригинальные результаты:**

1.Сформулирована модель и предложенин механизм множественного рождения частиц с двумя типами источников – одиночные струны и кластеры, получающиеся в результате слияния первичных цветовых кварк-глюонных струн.

2. В рамках модели выполнены аналитические и монте-карловские расчеты коэффициентов 𝑛-𝑛 и 𝑝𝑇 -𝑛 корреляций, проанализирована их зависимость от параметров модели, обнаружено немонотонное поведение коэффициентов корреляции с изменением среднего числа источников.

4. Установлена сильная зависимость коэффициента 𝑛𝐵−𝑛𝐹 корреляции от способа отбора классов центральности в ядро-ядерных столкновениях и от выбора ширины этих классов.

5. Показано, что при введении модельной зависимости слияния струн от числа источников, коэффициент 𝑝𝑡𝐵−𝑛𝐹 корреляции может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

6. Предсказан переход от положительных значений для широких классов центральности к отрицательным для узких классов центральности для коэффициента 𝑝𝑡𝐵−𝑛𝐹 корреляции.

7. Показано, что эффекты слияния струн оказывают значительное влияние на коэффициенты 𝑛-𝑛 и 𝑝𝑇 -𝑛 корреляций.

8. Проведено обобщение модели множественного рождения частиц на случай множественного слияния струн и образование единого струнного кластера.

9. Проведено, в рамках обощенной модели, согласованное с экспериментальными условиями эксперимента ALICA для столкновений ядер свинца при энергии 2.76 ТэВ разбиение событий на классы центральности и получено качественное согласие в поведении коэффициентов 𝑛𝐵−𝑛𝐹 и 𝑝𝑡𝐵−𝑛𝐹 корреляций.

Вторая глава посвящена изучению совместных флуктуаций множественности заряженных частицв в двух разнесенных по быстроте окнах. Считается, что изучение пособытийных флуктуаций различных наблюдаемых величин в релятивистских ядро-ядерных столкновениях позволит определить свойства сильно взаимодействующего ядерного вещества, обнаружить эффекты, свойственные фазовым переходам в ядерной материи и определить положение критической точки.

В этом разделе диссертации автором **получены новые и оригинальные результаты:**

1. Предложена новая физическая наблюдаемая, Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵), характеризующая совместные флуктуации множественностей в двух быстротных окнах.

2.Показано, что в рамках струнной модели без учетов эффектов слияния струн, величина Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵), является сильно-интенсивной (не зависит от среднего числа источников и флуктуаций в их числе).

3. Предсказано поведение величины Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵), при энергиях LHC в условиях эксперимента ALICE с учетом зависимости множественности частиц по азимутальному углу и псевдобыстроте.

4. Установлено усиление роста Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵), с увеличением энергии столкновения, приводящем к увеличению доли слившихся струн.

5. Показано, что при наличие смеси струн разного типа, величина Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵), перестает носить сильно-интенсивный характер.

6. Проведен анализ флуктуаций Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵), с учетом зарядности частиц и найдена зависимость этих переменных от параметров струнной модели.

7.Установлено, используя двухчастичные корреляционные функции, извлеченные из экспериментальных данных коллаборации ALICE по измерению балансных функций, превышение флуктуаций Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵), для комбинации множественностей частиц с противоположными зарядамив по сравнению с зарядами одного знака.

7. Проведено сравнение величины флуктуаций с предсказаниями модели PYTHIA8 и установлено качественное согласие для величин Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵), Σ(𝑛+𝐹,𝑛+𝐵) и Σ(𝑛+𝐹,𝑛−𝐵).

8. Автором предложено использовать, установленную зависимость переменной Σ(𝑛𝐹,𝑛𝐵) от расстояния между центрами двух окон для сравнения с будущими экспериментальными данными по протон-протонным столкновениям при энергиях LHC с целью получить информацию о начальном состоянии материи.

9. Проведено сравнение предсказываемого моделью поведения флуктуаций множественностей и поперечного импульса с результатами, полученными с использованием генератора событий PYTHIA, и экспериментальными данными, полученными коллаборации NA61/SHINE по столкновениям ядер бериллия при импульсе пучка 150A ГэВ/c.

В третьей главе сформулированы основные положения модифицированной модели мультипомеронного обмена, даны определения сильно-интенсивных величин, **характеризующих совместные флуктуации множественности и суммарного поперечного импульса**, измеряемых в одном псевдобыстротном интервале, приведены расчетные формулы для эксклюзивных и полуинклюзивных сечений.

В этом разделе диссертации автором **получены новые и оригинальные результаты:**

1.Предсказаны зависимости для сильно-интенсивных величин Δ(𝑃𝑇,𝑛) и Σ(𝑃𝑇,𝑛) для широкого диапазона энергий столкновения в рамках модифицированной модели мультипомеронного обмена.

2. Установлено, что учет законов сохранения энергии и импульса и эффектов слияния струн приводит к ослаблению свойства сильной-интенсивности этих величин и появлению нетривиальной зависимости от энергии столкновения.

3.Получены формулы для расчета Δ(𝑃𝑇,𝑛) и Σ(𝑃𝑇,𝑛) совместных флуктуаций множественности и суммарного поперечного импульса с учетом ограничений на значения поперечного импульса, определямых аксептансом и разрешением установки.

4.Проведено сравнение прямых предсказаний совместных флуктуаций в модифицированной модели мультипомеронного обмена с Монте Карло расчетами с использованием генератора событий PYTHIA8. Установлено, что результаты расчетов с ограничением по поперечному импульсу лучше согласуются с предсказаниями Монте Карло расчетов.

5. Проведен анализ экспериментальных данных коллаборации NA61/SHINE по измерению величин Δ(𝑃𝑇,𝑛) и Σ(𝑃𝑇,𝑛) в ядро-ядерных столкновениях и установлены ограничения на флуктуации Δ(𝑃𝑇 ,𝑛) < 1 и Σ(𝑃𝑇 ,𝑛) >.

6.Показано, что эти ограничения получаются и в модифицированной модели мультипомеронного обмена за счет учета законов сохранения энергии и импульса.

7. Установлено, что экспериментально определенная из данных NA61/SHINE зависимость изучаемых переменных (совместных флуктуаций) от ширины псевдобыстротного окна находится в качественном согласии с предсказаниями модифицированной модели мультипомеронного обмена и расходится с предсказаниями генератора событий EPOS.

**Аппробация результатов**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах кафедр физики высоких энергий и элементарных частиц и ядерной физики Санкт-Петербургского Государственного университета им. В.А.Фока, на научных семинарах лаборатории физики сверхвысоких энергий СПбГУ, на рабочих совещаниях коллаборации NA61/SHINE, а также на международных конференциях и семинарах по релятивистской ядерной физике, проводимых в Россия и за рубежом.

**Достоверность и обоснованность** результатов,полученных соискателем ученой степени, подтвержается высоким профессиональным уровнем научного руководителя соискателя, исследовательских коллективов, в которых проводились исследования и тщательностью и полнотой проведенных самим соискателем работ. Всесторонняя проверка результатов, полученных в диссертации, проведенная на семинарах, конференциях, отзывах рецензентов при публикации работ, аналитических и Монте Карло расчетов, убедительно свидетельствует о достоверности полученных в диссертации результатов и сделанных на их основании выводов.

**Личный вклад автора.**

Все основные результаты, представленные в данной диссертации, получены автором лично. Им проведены аналитические вычисления коэффициентов корреляции в рамках модели с двумя типами источников, разработана программа, позволяющая проводить такие вычисления по методу Монте-Карло, проведено исследование механизмов, влияющих на флуктуации, написан код, позволяющий вычислять сильно-интенсивные переменные с помощью существующих генераторов событий, написан код, который позволил извлечь значения сильно-интенсивных переменных из экспериментальных данных коллаборации NA61/SHINE. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора.

**Научная и практическая ценность результатов**

Полученные в диссертации результаты уже нашли свое практическое применение – они включены в программы физических исследований коллабораций ALICE на LHC и NA61/SHINE на SPS в Европейском центре ядерных исследований (CERN). Предложения автора по исследованию дальних корреляций могут быть использованы для анализа данных, полученных коллаборацией STAR на RHIC, и включены в программы физических исследований c тяжелыми ионами на будущих ускорителях NICA (JINR) и FAIR (GSI).

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и/или Scopus.

**Соответствие автореферата диссертации её содержанию**

Автореферат полно отражает содержание диссертации. В автореферате обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, кратко изложено основное содержание диссертации, представлены результаты работы, сформулированы основные положения, выносимы на защиту, и список публикаций, содержащий основные результаты работы.

**Замечания по диссертации**

Существенных недостатков в работе не выявлено. Некоторые опечатки и погрешности в оформлении не снижают общей положительной оценки работы.

В целом диссертация Е.В. Андронова представляет собой научно-квалификационную работу, в котором предложена новая модель множественного рождения заряженных частиц в ядро-ядерных столкновениях высоких энергий, проведены аналитические и монте-карловские расчеты коэффициентов корреляций и флуктуаций множественности и поперечного импульса заряженных частиц, проанализирована их зависимость от параметров модели, проведена модификация модели, учитывающая механизм слияния струн, предсказан переход от положительных значений коэффициента pT-n корреляции к отрицательным при сужением класса центральности, проведено обобщение модели для учета экспериментальных критериев отбора событий по центральности столкновения и сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными данными коллаборации ALICE, предложена и изучена новая физическая наблюдаемая, характеризующая совместные флуктуации множественностей в двух быстротных окнах, проведено обобщение и изучение этой переменной на случай флуктуаций с учетом знака заряда образующихся частиц, проведено сравнение предсказываемого моделью поведения сильно-интенсивных величин с экспериментальными данными, полученными коллаборацией NA61/SHINE, проведены расчеты в рамках модифицированной модели мультипомеронного обмена величин, характеризующих совместные флуктуации суммарного поперечного импульса и числа заряженных частиц для случая протон-протонных столкновений в широком диапазоне энергий и сравнение с результатми измерений эксперимента NA61/SHINE на ускорителе SPS в ЦЕРН. Предсказания модели представляют несомненный практический интерес для изучения состояний ядерной материи посредством дальних корреляций и флуктуаций множественности и поперечного импульса для поиска сигналов фазового перехода и критической точки в ядерной материи.

Диссертационная работа Андронова Е.В. «Корреляции и флуктуации экстенсивных и интенсивных величин в протонных и ядерных столкновениях при высоких энергиях», полностью удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Диссертация Андронова Е.В. доложена и обсуждена на объединенном семинаре Лаборатории физики высоких энергий им.В.И.Векслера и А.М.Балдина Объединенного института ядерных исследований 9 ноября 2018 года.

Отзыв рассмотрен и утвержден Научно-техническим советом Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ 20 ноября 2018 года, Протокол №

Отзыв подготовил:

начальник сектора Научно-экспериментального

отдела физики тяжелых ионов на RHIC

Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник Токарев Михаил Владимирович

Электронный адрес: tokarev@jinr.ru

Подпись доктора физико-математических наук,

начальника сектора НЭОФТИ на RHIC

ЛФВЭ ОИЯИ Токарева М.В. заверяю

Ученый секретарь ЛФВЭ ОИЯИ,

кандидат физико-математических наук Пешехонов Дмитрий Владимирович

Электронный адрес: peshekhonov@jinr.ru

|  |  |
| --- | --- |
| **Список основных публикаций сотрудников организации по теме диссертациив рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет**  **(не более 15 публикаций)** | |
|  | Batyuk, P. Correlation femtoscopy study at energies available at the JINR Nuclotron –based Ion Collider fAcility and the BNL Relativistic Heavy Ion Collider within a viscous hydrodanamic plus cascade model/ **P. Batyuk**, Iu. Karpenko, **R. Lednicky**, **L. Malinina**, **K. Mikhaylov**, **O. Rogachevsky**, D. Wielanek// Phys.Rev.C. – 2017. – V.96 №2. – P. 024911. |
|  | Kekelidze, V. Feasability study of heavy-ion collision physics at NICA JINR/ **V. Kekelidze**, **A. Kovalenko**, **R. Lednicky**, **V. Matveev**, **I. Meshkov**, **A. Sorin**, **G. Trubnikov**// Nucl.Phys.A. – 2017. – V. 967 – P. 884. |
|  | Tokarev, M. New indication on scaling properties of strangeness production in pp collisions at RHIC/ **M. Tokarev**, I. Zborovsky// Int.J.Mod.Phys.A. – 2017. – V.32 №5. – P. 1750029. |
|  | Kokoulina, E. Gluon dominance model/ **E. Kokoulina**, A. Kutov// EPJ Web Conf. – 2017. – V. 138. – P. 07007. |
|  | Uzhinsky V. Effect of uu diquark suppression in proton splitting in Monte Carlo event generators/ **V. Uzhinsky**, **A. Galoyan**// Phys. Rev. D. – 2015. – V. 91. №3. - P.037501. |
|  | Токарев, М.В. Самоподобие при рождении адронов: z-скейлинг/ **М.В. Токарев**, И. Зборовски // ТМФ. – 2015. – Т. 184 Н. 3. – С. 530. |
| 7. | Toneev, V.D. p-Pb collisions at 5.02 TeV in the Parton-Hadron-String-Dynamics transport approach/ V.P. Konchakovski, W. Cassing, **V.D. Toneev**// J.Phys. G. – 2014. – V. 41 – P. 105004. |
| 8. | Friesen, A.V. Quark scattering off quarks and hadrons/ **A.V. Friesen**, **Yu.V. Kalinovsky**, **V.D. Toneev**// Nucl.Phys.A. – 2014. – V.923. – P. 1. |

Ученый секретарь ЛФВЭ ОИЯИ Пешехонов Д.В.