

На правах рукописи
УДК 539.120.81

Андронов Евгений Владимирович

**Корреляции и флуктуации экстенсивных и
интенсивных величин в протонных и ядерных
столкновениях при высоких энергиях**

Специальность 01.04.02 —
«Теоретическая физика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Научный руководитель:

Вечернин Владимир Викторович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры физики высоких энергий и элементарных частиц Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Официальные оппоненты:

Ким Виктор Тимофеевич

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, зам. руководителя Отделения физики высоких энергий по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт».

Снигирев Александр Михайлович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Ведущая организация:

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований.

Защита состоится _____ г. в ____ часов на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 999.069.02, созданного на базе Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, по адресу: 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 48, корп. 3, ауд. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, (191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 48, корп. 5) и на сайте университета по адресу:

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Анисимова Надежда Ивановна

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Эксперименты по протон-протонным, протон-ядерным и ядро-ядерным столкновениям при релятивистских энергиях, проводимые в последние десятилетия на супер протонном синхротроне (SPS), релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC) и Большом адронном коллайдере (БАК), позволяют изучать фазовую диаграмму сильно взаимодействующей материи, изменяя температуру и бариохимический потенциал. Ожидается, что при достаточно высоких энергиях возникает фаза отличная от обычного адронного газа, в котором кварки и глюоны находятся в состоянии конфайнмента, - кварк-глюонная плазма [1], которая по современным представлениям является почти идеальной жидкостью из свободных кварков и глюонов. Также предсказывается [2] существование критической точки на фазовой диаграмме сильно взаимодействующей материи. Эксперимент NA49 на SPS в столкновениях ядер свинца обнаружил [3] резкие изменения в энергетической зависимости нескольких характеристик выходов адронов, предсказанные [4] для фазового перехода. Позднее эксперимент STAR на RHIC, изучая столкновения ядер золота, и ALICE на БАК, изучая столкновения ядер свинца, подтвердили измерения NA49 [5].

Для того, чтобы более надежно интерпретировать получаемые экспериментальные результаты, необходимо оценить, как различные начальные состояния, возникающие в ультрарелятивистских столкновениях, влияют на конечные наблюдаемые.

Известно, что описание мягкой составляющей адронных и ядерных взаимодействий невозможно в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики, в настоящее время широко используется так называемый двухстадийный механизм рождения частиц [6]. В рамках данного подхода считается, что на первом этапе образуется некоторое число источников, на втором этапе эти источники распадаются и образуют наблюдаемые вторичные частицы. На этом механизме основана модель кварк-глюонных струн [7]. С увеличением плотности струн в поперечной плоскости столкновения (что может быть вызвано ростом энергии сталкивающихся объектов или их массы) предсказывается [8], что струны могут сливаться. Альтернативные механизмы взаимодействия струн [9] в настоящее время активно развиваются для описания анизотропных потоков и двухчастичных корреляций. Свойства слившихся или взаимодействующих струн изменяются, что влияет на корреляции и флуктуации наблюдаемых величин, а так как кварк-глюонная струна при распаде дает вклад в широкий диапазон быстрот, в работах [10] оценивается влияние слияния струн на дальние по быстройте корреляции. Таким образом, изучение дальних корреляций и

флуктуаций может предоставить информацию о флуктуациях числа источников, то есть о самых начальных этапах развития ядерной материи в столкновении, а также непосредственно о свойствах самих источников. Стоит отметить, что экспериментальные измерения корреляции ведется уже несколько десятилетий [11].

В настоящей работе влияние слияния струн на корреляции эффективно учитывается путем введения в модель источников двух типов. Источники первого типа соответствуют исходным одиночным - не слившимся струнам. Введение источников второго типа отвечает образованию излучателей с новыми характеристиками, возникающими при слиянии струн. Такая модель является естественным простейшим обобщением модели с одинаковыми независимыми источниками [12]. Она позволяет обобщенно учесть эффекты слияния струн и, в частности, описать дальние по скорости корреляции между множественностями заряженных частиц, а также между множественностью и средним поперечным импульсом.

Для того чтобы подавить вклад флуктуаций в числе источников (так называемых объемных флуктуаций), используют сильно-интенсивные переменные [13]. В настоящей работе для описания энергетических зависимостей такого рода величин используются модель с кварк-глюонными струнами, а также модифицированная модель мультипомеронного обмена [14], в которой пары струн соответствуют одному померону, а взаимодействие между струнами вводится лишь эффективным образом. Анализ таких величин проводится в современных экспериментах, а также может проводиться на планируемых экспериментах на строящихся ускорителях FAIR в Германии и NICA в России.

Таким образом актуальность темы исследования определяется необходимостью теоретической оценки влияния выбора различных конфигураций начальных состояний на значения корреляционных и флуктуационных величин, измеряемых в протон-протонных и ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях.

Целью данной работы является изучение влияния эффекта слияния струн, а также выбора конфигураций начальных состояний на корреляционные и флуктуационные наблюдаемые, которые измеряются на современных экспериментах.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать модель с двумя типами источников.
2. Разработать алгоритмы, основанные на методе Монте-Карло для подсчета коэффициента корреляции.
3. Вычислить значения коэффициентов $n - n$ и $p_T - n$ корреляций.
4. Получить предсказания для значения сильно-интенсивной переменной типа $n - n$ в рамках модели с одним и несколькими типами струн.

5. Получить предсказания для значения сильно-интенсивной переменной типа $P_T - n$ в рамках модели мультипомеронного обмена.

Научная новизна:

1. Разработана модель с двумя типами источников, которая эффективно учитывает взаимодействие между струнами в ядро-ядерных столкновениях.
2. В рамках модели с двумя типами источников проведены аналитические и численные расчеты коэффициентов $n - n$ и $p_T - n$ корреляции.
3. Получены новые теоретические предсказания для коэффициентов $n - n$ и $p_T - n$ корреляции, когда все источники нового типа сливаются в единый кластер.
4. Результаты расчетов коэффициентов $n - n$ и $p_T - n$ несут практическую ценность, т.к. они могут сравниваться с экспериментальными измерениями коллаборации ALICE по столкновениям ядер свинца при энергии 2.76 ТэВ, 5.02 ТэВ, а также к данным по столкновениям при энергии 5.5 ТэВ, которые будут получены после апгрейда Большого Адронного Коллайдера в 2021.
5. В рамках модели с одним и несколькими типами источников получены аналитические расчеты для сильно-интенсивной переменной типа $n - n$ для случая протон-протонных столкновений при энергиях, достигаемых на БАК.
6. В рамках модифицированной модели мультипомеронного обмена получены численные расчеты для двух сильно-интенсивных переменных типа $P_T - n$ для протон-протонных столкновений в широком диапазоне энергий - от энергии, достигаемой на Протонном Суперсинхротроне, до энергии, достигаемой на Большом Адронном Коллайдере.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана новая модель с двумя типами источников, позволяющая эффективно учесть взаимодействие между цветными (кварк-глюонными) струнами в ядро-ядерных столкновениях. В рамках этой модели путем аналитических и монте-карловских расчетов получены теоретические предсказания для коэффициентов корреляции между выходами заряженных частиц, в разнесенных быструтных интервалах, в том числе для корреляции между средним событийным поперечным импульсом и множественностью. Проведено обобщение модели для учета экспериментальных критериев отбора событий по центральности столкновения, позволившее осуществить качественное сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными данными коллаборации ALICE.

2. Предложена новая физическая наблюдаемая, $\Sigma(n_F, n_B)$, характеризующая совместные флуктуации множественностей в двух быстротных окнах. Показано, что в струнной модели, без учета эффектов слияния, такая величина является сильно-интенсивной. Проведено обобщение этой переменной на случай флуктуаций с учетом знака заряда, образующихся частиц, и найдена зависимость этих переменных от параметров струнной модели.
3. Проведено сравнение предсказываемого моделью поведения сильно-интенсивных величин с результатами, полученными с использованием генератора событий PYTHIA, и экспериментальными данными, включая результаты, непосредственно извлеченные из данных коллаборации NA61/SHINE в ходе их анализа.
4. В рамках модифицированной модели мультипомеронного обмена проведены расчеты сильно-интенсивных переменных, характеризующих совместные флуктуации суммарного поперечного импульса и числа заряженных частиц для случая протон-протонных столкновений в широком диапазоне энергий. Показано, что такие переменные растут с увеличением энергии столкновения, начиная с пороговой энергии, при которой отсутствует корреляция между множественностью и средним в событии поперечным импульсом. Выводы модели качественно подтверждаются экспериментальными данными, непосредственно извлеченными путем анализа результатов измерений эксперимента NA61/SHINE на ускорителе SPS в ЦЕРН.

Достоверность предсказаний модели, разработанной в первой главе, определяется тем, что они согласуются с аналитическими расчетами, которые удастся провести в нескольких предельных случаях. Кроме того, между собой согласуются результаты, полученные разными способами расчета коэффициентов корреляции. Финальные зависимости коэффициентов корреляции от классов центральности согласуются с доступными экспериментальными данными. Достоверность предсказаний расчетов сильно-интенсивных переменных во второй и третьей главе обеспечивается тем, что для описания их поведения выбираются наборы параметров, которые позволили ранее описать широкий набор экспериментальных данных. Полученные результаты качественно согласуются с предсказаниями других генераторов событий и проведенными экспериментальными измерениями по данным коллаборации NA61/SHINE.

Апробация работы. Результаты, обсуждаемые в данной работе, были неоднократно представлены на научных семинарах лаборатории физики сверхвысоких энергий СПбГУ, на рабочих совещаниях коллаборации NA61/SHINE, а также на следующих международных конференциях:

- The XXI International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory, Repino, Russia, June 23 - June 30, 2013
- The International Student Conference «Science and Progress», Saint-Petersburg, Peterhof, Russia, September 30 - October 4, 2013
- The XIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum, St. Petersburg, Russia, September 8 - September 12, 2014
- The XXII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Dubna, Russia, September 15 - September 20, 2014
- The International Conference dedicated to the Novozhilov 90-th anniversary «In Search of Fundamental Symmetries», St. Petersburg, Russia, December 2 - December 5, 2014
- The XVth International Conference on Strangeness in Quark Matter «SQM 2015», Dubna, Russia, July 6 - July 11, 2015
- The Xth International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement «CPOD 2016», Wroclaw, Poland, May 30 - June 4, 2016
- The XIIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum, Thessaloniki, Greece, August 29 - September 3, 2016
- The XIIth workshop on Particle Correlations and Femtoscopy «WPCF 2017», Amsterdam, the Netherlands, June 12 - 16, 2017
- The IIIrd International Conference on Particle Physics and Astrophysics «ICPPA 2017», Moscow, Russia, October 2 - 5, 2017
- The XXVIIth International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions «Quark Matter 2018», Venice, Italy, May 13 - 19, 2018
- The XXth International Seminar on High Energy Physics «Quarks 2018», Valday, Russia, May 27 - June 2, 2018
- The VI International Conference «Models in Quantum Field Theory», Saint-Petersburg, Russia, August 27-31, 2018

Личный вклад. Все основные результаты, представленные в данной диссертации, были получены автором лично. Автором были проведены аналитические вычисления коэффициентов корреляции в рамках модели с двумя типами источников разработана, а также разработана программа, позволяющая проводить такие вычисления по методу Монте-Карло. Автором проведено исследование механизмов, которые влияют на флуктуации, измеряемые с помощью сильно-интенсивных переменных. Автором написан код, который позволил вычислять сильно-интенсивные переменные с помощью существующих генераторов событий. Автором написан код, который позволил извлечь значения сильно-интенсивных переменных из экспериментальных данных коллаборации NA61/SHINE.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ [A1-A7]. Из них 7 опубликовано в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и/или Scopus.

Объем и структура работы. 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.

Содержание работы

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 быстрой, 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 и по центральности, и сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

Корреляции «вперед-назад», которые рассматриваются в данной главе, описывают зависимости между различными физическими наблюдаемыми, измеряемыми в непересекающихся псевдобыстрых интервалах (окнах). В данной работе изучались корреляции между множественностями (количеством заряженных частиц) и средним в событии поперечным импульсом. Количественной мерой, характеризующей силу корреляции, является коэффициент корреляции, определяемый для случая множественности следующим образом:

$$b_{n-n}^{abs} = \frac{\langle n_B n_F \rangle - \langle n_B \rangle \langle n_F \rangle}{\langle n_F^2 \rangle - \langle n_F \rangle^2}. \quad (1)$$

В разделе 1.1 вводятся основные определения кинематических переменных, таких как псевдобыстрота и поперечный импульс, которые необходимо знать для вычисления коэффициентов корреляций.

В разделе 1.2 представлены основные понятия двух-этапного механизма рождения частиц в столкновениях при высоких энергиях, когда на первом этапе рождаются кварк-глюонные струны, которые затем фрагментируют, образуя детектируемые частицы. Обсуждаются основные свойства таких источников.

В разделе 1.3 формулируется понятие экстенсивных и интенсивных величин, обсуждаются корреляционные коэффициенты, которые можно вычислять для таких величин, вводятся определения корреляционной функции и коэффициента корреляции.

В разделе 1.4 формулируется модель с двумя типами источников, приводятся аналитические вычисления коэффициентов корреляции для случая, когда псевдобыстротные интервалы удалены друг от друга на такое расстояние, что можно пренебречь корреляциями, возникаемыми от распада одного источника.

В разделе 1.5 обсуждается, как изменятся вычисления из раздела 1.4 в случае, если источники первого типа - это независимые тождественные кварк-глюонные струны, а источники второго типа - это струны, образовавшиеся в результате слияния струн первого типа. При этом свойства распада струн второго типа отличаются от случая струн первого типа таким образом:

$$\bar{\mu}_2 = \sqrt{2}\bar{\mu}_1; \quad \bar{p}_{T2} = \sqrt[4]{2}\bar{p}_{T1}, \quad (2)$$

где $\bar{\mu}$ - это средняя множественность от одного источника в интервале в одну единицу псевдобыстроты, \bar{p}_T - средний в событии поперечный импульс от одного источника.

В разделе 1.6 представлена реализация модели в виде Монте-Карло генератора событий. Показано, что при введении зависимости процедуры слияния от числа источников, задаваемой функцией $r(N)$, которая эффективно (вероятностно) описывает ожидаемую связь между этими величинами в реальных экспериментах, коэффициент $n_{tB} - n_F$ корреляции может принимать как положительные, так и отрицательные значения, в зависимости от параметров модели. Показано, что эффекты слияния струн оказывают значительное влияние на коэффициенты n_{B-n_F} и p_{TB-n_F} корреляции (рис. 1 и 2).

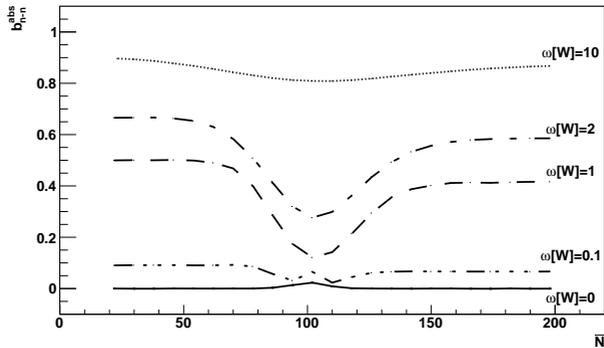


Рис. 1 — Зависимости коэффициента n_{B-n_F} корреляции от среднего начального числа струн \bar{N} . Разные кривые соответствуют разным значениям приведенной дисперсии числа померонов $\omega[W] = \frac{\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2}{\langle W \rangle}$, из которых образуются струны.

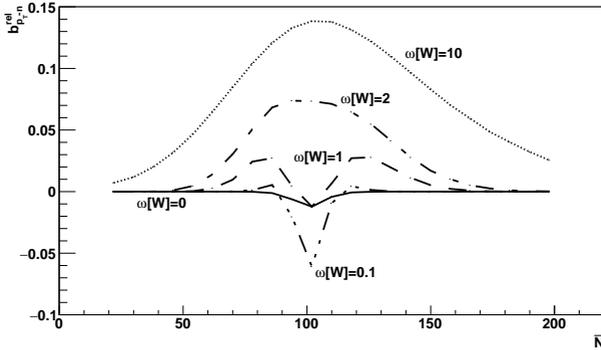


Рис. 2 — Зависимости коэффициента $p_{TB}-n_F$ корреляции от среднего начального числа струн \bar{N} . Разные кривые соответствуют разным значениям приведенной дисперсии числа померонов $\omega[W] = \frac{\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2}{\langle W \rangle}$, из которых образуются струны.

Для привязки параметров модели к условиям реального эксперимента проведено ее обобщение на случай, когда при столкновении релятивистских ядер в центральной области поперечной плоскости происходит множественное слияние струн и образование единого струнного кластера (т.н. «кора»), при этом на периферии остается еще значительное число неслившихся струн (источников первого типа), формирующих т.н. «корону» [15]. В разделе 1.7 учет размеров этих областей и числа формирующих их струн был проведен на основе реальной геометрии столкновений ядер свинца при энергии 2.76 ТэВ [16]. Это позволило разбить все события на классы центральности, как по множественности частиц в дополнительном быстротном интервале (что соответствует разбиению по сигналу с детектора V0 [17] эксперимента ALICE на БАК), так и по числу нуклонов-спектаторов (что примерно соответствует разбиению по сигналу с детектора ZDC [18] эксперимента ALICE на БАК).

В результате удастся связать предсказываемое моделью поведение коэффициентов $n_B - n_F$ и $p_{tB} - n_F$ корреляций с условиями проведения и разбиением событий на классы центральности в реальном эксперименте (рис. 3). Показано, что предсказания зависимостей коэффициентов $n_B - n_F$ корреляции находятся в качественном согласии с экспериментальными данными коллаборации ALICE. Подтверждается сильная зависимость коэффициента $n_B - n_F$ корреляции от способа отбора классов центральности в ядро-ядерных столкновениях и, в частности, от выбора ширины этих классов. В рамках модели для коэффициента $p_{tB} - n_F$ корреляции предсказывается переход от положительных значений для широких классов центральности к отрицательным для узких классов центральности. Показано также, что разные методы выборов классов центральности дает

качественно разную картину зависимости коэффициента $p_{tB} - n_F$ корреляции от центральности, что также может быть проверено экспериментально.

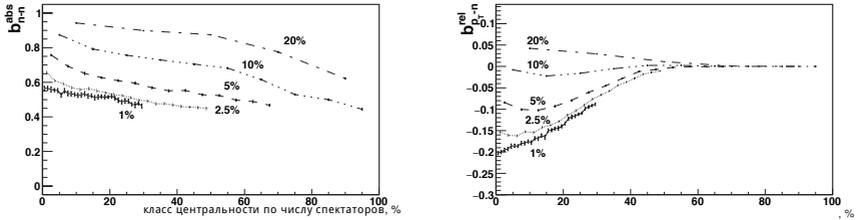


Рис. 3 — Зависимости коэффициентов $n_B - n_F$ (слева) и $p_{tB} - n_F$ (справа) корреляции от класса центральности, определяемого по числу нуклонов-спектаторов.

Вторая глава посвящена исследованию переменной $\Sigma(n_F, n_B)$ [A1], характеризующей совместные флуктуации множественности заряженных частиц в двух окнах наблюдения:

$$\Sigma(n_F, n_B) = \frac{\langle n_B \rangle \omega[n_F] + \langle n_F \rangle \omega[n_B] - 2(\langle n_B n_F \rangle - \langle n_B \rangle \langle n_F \rangle)}{\langle n_B \rangle + \langle n_F \rangle}. \quad (3)$$

В разделе 2.1 обсуждаются различные виды флуктуационных переменных и их роль в изучении фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи и, в частности, поиске критической точки.

В разделе 2.2 было проверено, что в рамках модели независимых источников величина $\Sigma(n_F, n_B)$ является сильно-интенсивной [13], т.е. не зависит от среднего числа источников, а также флуктуаций в их числе. Кроме того, были даны предсказания для поведения этой величины при энергиях БАК в условиях эксперимента ALICE (рис. 4). Для этого была использована параметризация двухчастичной корреляционной функции струны [12], полученная в результате аппроксимации экспериментальных данных коллаборации ALICE по измерению коэффициента корреляции между множественностями [19]. Полученные результаты показывают более резкий рост $\Sigma(n_F, n_B)$ с увеличением энергии столкновения. Этот рост может быть вызван увеличением доли слившихся струн. Было показано, что наличие смеси струн разного типа приводит к тому, величина $\Sigma(n_F, n_B)$ перестает носить сильно-интенсивный характер.

В разделе 2.3 было проанализировано поведение величины $\Sigma(n_F, n_B)$ для случая, когда в окнах выбирались не все заряженные частицы, а либо положительно заряженные, либо отрицательно заряженные. Такие переменные выражаются через двухчастичные корреляционные функции, учитывающие заряд частицы, $\Lambda^{++}(\Delta\eta)$ и $\Lambda^{+-}(\Delta\eta)$. Для того чтобы

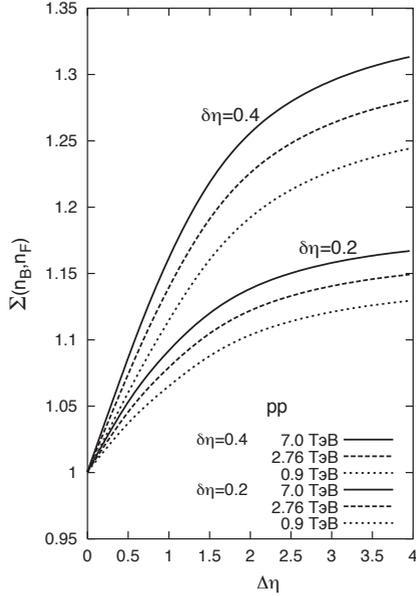


Рис. 4 — Зависимости величины $\Sigma(n_F, n_B)$ от расстояния между центрами двух окон $\Delta\eta$ для разных ширин окон $\delta\eta$ в протон-протонных столкновениях при энергиях 0.9, 2.76 и 7 ТэВ.

параметризовать эти функции была проведена аппроксимация экспериментальных данных коллаборации ALICE по измерению балансных функций [20]. Было обнаружено, что $\Sigma(n_F, n_B)$ для комбинации множественностей с одним зарядом превышает $\Sigma(n_F, n_B)$ для комбинации множественностей с противоположными зарядами.

В разделе 2.4 было проведено сравнение полученных результатов с предсказаниями модели PYTHIA8 и обнаружено качественное согласие для величины $\Sigma(n_F, n_B)$, а также $\Sigma(n_F^+, n_B^+)$ и $\Sigma(n_F^+, n_B^-)$.

В разделе 2.5 обсуждается роль эффектов слияния струн на переменную $\Sigma(n_F, n_B)$. Показано, что эти эффекты вносят зависимость от начальных состояний и, тем самым, нарушают свойство сильно-интенсивности. Предсказывается рост величины $\Sigma(n_F, n_B)$ с увеличением доли струн, образовавшихся в результате слияния.

В разделе 2.6 был проведен анализ экспериментальных данных коллаборации NA61/SHINE по столкновениям ядер бериллия при импульсе пучка 150А ГэВ/с. Полученные результаты качественно согласуются с модельными расчетами, выполненными для энергий БАК, несмотря на невыполнимость предположения о трансляционной инвариантности по псевдобыстроте.

В третьей главе обсуждаются совместные флуктуации множественности и суммарного поперечного импульса заряженных частиц. В

разделе 3.1 были даны определения сильно-интенсивных величин, характеризующих такой тип флуктуаций, $\Delta(P_T, n)$ и $\Sigma(P_T, n)$.

В разделе 3.2 были сформулированы основные положения модифицированной модели мультипомеронного обмена [14] и приведены формулы для эксклюзивных и полу-инклюзивных сечений, необходимые для расчетов флуктуационных величин в данной модели. Были получены предсказания для сильно-интенсивных величин $\Delta(P_T, n)$ и $\Sigma(P_T, n)$ для широкого диапазона энергий протон-протонного столкновения в рамках модифицированной модели мультипомеронного обмена (рис. 5). Показано, что учет законов сохранения энергии и импульса, а также эффектов слияния струн ведет к тому, что данные переменные перестают быть сильно-интенсивными и имеют нетривиальную энергетическую зависимость. Так, величина $\Sigma(P_T, n)$ ведет себя немонотонно, достигая минимума, $\Sigma(P_T, n) = 1$, при энергии столкновения порядка 40 ГэВ.

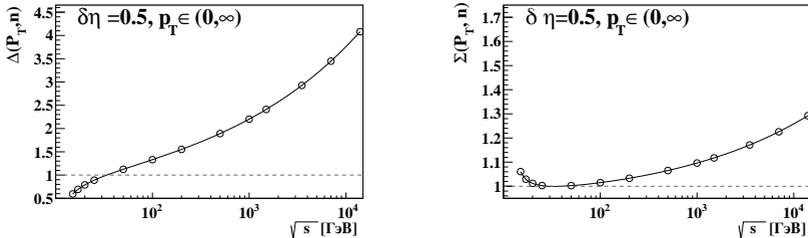


Рис. 5 — Зависимости величин $\Delta(P_T, n)$ (слева) и $\Sigma(P_T, n)$ (справа) от энергии протон-протонного столкновения, вычисленные с помощью модифицированной модели мультипомеронного обмена.

Кроме того, были получены формулы для расчета $\Delta(P_T, n)$ и $\Sigma(P_T, n)$ с учетом ограничений на значения поперечного импульса, часто применяемых при анализе экспериментальных данных. Проведено прямое сравнение предсказаний модифицированной модели мультипомеронного обмена с расчетами, выполненными с помощью генератора событий PYTHIA8. Для полного диапазона поперечных импульсов большая разница между полученными результатами объясняется отсутствием корректного описания рождения частиц с большими поперечными импульсами в модифицированной модели мультипомеронного обмена. Применение отбора по поперечному импульсу привело к результатам, которые лучше согласуются с предсказаниями PYTHIA8.

Проведен анализ экспериментальных данных коллаборации NA61/SHINE по измерению величин $\Delta(P_T, n)$ и $\Sigma(P_T, n)$ в ядро-ядерных столкновениях. Получено, что выполняются неравенства $\Delta(P_T, n) < 1$ и $\Sigma(P_T, n) > 1$, которые выполняются и в модифицированной модели мультипомеронного обмена за счет учета законов сохранения энергии и импульса.

Экспериментально определенная зависимость изучаемых переменных от ширины псевдобыстротного окна находится в качественном согласии с предсказаниями модифицированной модели мультипомеронного обмена и расходится с предсказаниями генератора событий EPOS.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Предложена и разработана модель с двумя типами источников, которая позволяет эффективно учесть взаимодействие между струнами в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях.
2. Выполнены аналитические (где это возможно) и монте-карловские расчеты величины коэффициентов n - n и p_T - n корреляций и проанализирована их зависимость от параметров модели.
3. Проведена модификация модели, включение механизма «кор-корона», которая позволила провести сравнение с экспериментальными данными с учетом разных критериев отбора классов центральности.
4. Показано, что эффект слияния струн ярче проявляется для p_T - n , чем для n - n корреляций. Предсказан переход от положительных значений коэффициента p_T - n корреляции к отрицательным с сужением класса центральности.
5. В рамках струнной модели было изучено поведение так называемой сильно-интенсивной переменной $\Sigma(n_F, n_B)$ как для окон наблюдения по псевдобыстроте с шириной 2π по азимутальному углу, так и с меньшей шириной по азимуту. Полученные предсказания находятся в согласии с предсказаниями генератора событий PYTHIA8. Показано, что введение эффектов слияния струн, приводит к тому, что $\Sigma(n_F, n_B)$ перестает быть сильно-интенсивной величиной.
6. Проведен анализ экспериментальных данных коллаборации NA61/SHINE по измерению величины $\Sigma(n_F, n_B)$, причем полученные результаты находятся в качественном согласии с расчетами в струнной модели.
7. В рамках модифицированной модели мультипомеронного обмена получены предсказания для сильно-интенсивных величин $\Delta(P_T, n)$ и $\Sigma(P_T, n)$. Показано, что учет законов сохранения энергии и импульса, а также эффектов слияния струн ведет к тому, что данные переменные перестают быть сильно-интенсивными.
8. Проведен анализ экспериментальных данных коллаборации NA61/SHINE по измерению величин $\Delta(P_T, n)$ и $\Sigma(P_T, n)$ в ядро-ядерных столкновениях. Получено, что выполняются неравенства $\Delta(P_T, n) < 1$ и $\Sigma(P_T, n) > 1$, которые получаются и в модифицированной модели мультипомеронного обмена за счет учета законов сохранения энергии и импульса.

Публикации. Автором диссертационного исследования опубликовано 16 работ, в том числе 7 работ, в которых изложены основные результаты по теме диссертации:

- A1. *Андронов, Е.* Влияние механизма слияния кварк-глюонных струн на дальние быструтные корреляции и флуктуации / Е. Андронов // Теоретическая и математическая физика. — 2015. — Т.185, №1, — С. 28-36.
- A2. *Andronov, E.* The correlation between transverse momentum and multiplicity of charged particles in a two-component model / E. Andronov, V. Vechernin // Proceedings of Science. — 2014. — Vol. 183 (QFTHEP2013). — P. 054.
- A3. *Andronov, E.* Long range rapidity correlations between the transverse momentum and the multiplicities in light-nuclei collisions / E. Andronov, V. Vechernin // Proceedings of Science. — 2015. — Vol. 225 (BaldinISHEPPXXII). — P. 068.
- A4. *Andronov, E.* Modeling the influence of string collective phenomena on the long range rapidity correlations between the transverse momentum and the multiplicities / E. Andronov, V. Vechernin // AIP Conference Proceedings. — 2016. — Vol. 1701. — P. 060003.
- A5. *Andronov, E.* Energy dependence of fluctuations in p+p and Be+Be collisions from NA61/SHINE / E. Andronov // Journal of Physics Conference Series. — 2016. — Vol. 668, no. 1. — P. 012036.
- A6. *Andronov, E.* Transverse momentum and multiplicity fluctuations in Ar+Sc collisions at the CERN SPS from NA61/SHINE / E. Andronov // Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement. — 2017. — Vol. 10. — P. 449-453.
- A7. *Andronov, E.* Recent results from the NA61/SHINE strong interaction physics programme / E. Andronov // European Physical Journal Web of Conferences. — 2017. — Vol. 137. — P. 07001.

Цитированная литература

1. E. Shuryak, Phys. Rep., **61**, 71 (1980).
2. M. Asakawa, K. Yazaki, Nucl. Phys. A **504**, 668 (1989); M. Stephanov, Prog. Th. Phys. Suppl. **153**, 139 (2004).
3. C. Alt [et al.], Phys. Rev. C **77**, 024903 (2008).
4. M. Gazdzicki, M. Gorenstein, Acta Phys. Polon. **B30**, 705 (1999).
5. J. Schukraft, J. Phys. G **38**, 124003 (2011); L. Kumar, J. Phys. G **38**, 124145 (2011).
6. A. Kaidalov, Phys. Lett. B **116**, 459 (1982); A. Capella [et al.], Phys. Rep. **235**, 225 (1994).
7. X. Artru, G. Mennessier, Nucl. Phys. B **70**, 93 (1974).
8. M. Braun, C. Pajares, Phys. Lett. B **287**, 154 (1992).
9. C. Bierlich, G. Gustafson, L. Lonnblad, Phys. Lett. B **779**, 58 (2018).

10. N. Amelin [et al.], Phys. Rev. Lett. **73**, 2813 (1994); M. Braun, C. Pajares, Eur. Phys. J. C**16**, 349 (2000).
11. C. Bromberg [et al.], Phys. Rev. **D9**, 1864 (1974); A. Seryakov, Eur. Phys. J. Web of Conf. **126**, 04044 (2016).
12. V. Vechernin, Nucl. Phys. A**939**, 21 (2015).
13. M. I. Gorenstein, M. Gazdzicki, Phys. Rev. **C84**, 014904 (2011).
14. N. Armesto, D. Derkach, G. Feofilov, Phys. Atom. Nucl. **71**, 2087 (2008); E. O. Bodnya [et al.], AIP Conf. Proc. **1606**, 273 (2014).
15. K. Werner, Phys. Rev. Lett. **98**, 152301 (2007).
16. I. Altsybeev, AIP Conf. Proc. **1701**, 100002 (2016).
17. E. Abbas [et al.], JINST **8**, 10016 (2013).
18. C. Oppedisano, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **215**, 173 (2011).
19. J. Adam [et al.] (ALICE Coll.), JHEP **1505**, 097 (2015).
20. J. Adam [et al.] (ALICE Coll.), Eur. Phys. J. C**76**, 86 (2016).

Подписано в печать ____.____.____.	Формат 60×84 ¹ / ₁₆ Заказ №	Цифровая печать	Печ. л. 1.0
--	---	--------------------	-------------

Тираж 100 экз.

Типография «Фалкон Принт»
(197101, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, д. 54, офис 2)

