

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Афони́на Серге́я Серге́евича на диссертацию Белокуровой Светланы Николаевны на тему «Корреляции и сильно-интенсивные переменные в модели с образованием струнных кластеров при энергиях БАК», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Диссертационная работа С.Н. Белокуровой посвящена статистическому анализу и связанному с этим физической интерпретации данных по столкновению ультрарелятивистских тяжёлых ионов на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в ЦЕРНе. А именно, в диссертации решается актуальная физическая задача - теоретический анализ флуктуаций и корреляций, возникающих между различными наблюдаемыми величинами в процессах множественного рождения частиц при столкновении адронов сверхвысоких энергий. Изучение таких корреляций и флуктуаций является инструментом, который позволяет исследовать физические процессы, протекающие на начальном этапе взаимодействия адронов, в частности, проверить гипотезу о возможном слиянии первичных кварк-глюонных струн и образовании струнных кластеров.

В настоящее время, в рамках общепринятой теории сильных взаимодействий - Квантовой Хромодинамики (КХД) - не удается получить строгое количественное описание процессов множественного рождения частиц в мягкой области из-за неприменимости в этой области теории возмущений. Поэтому обоснованным является использование в диссертационной работе для расчетов величины флуктуаций и корреляций, возникающих при множественном рождении частиц в мягкой области, модели кварк-глюонных (цветных) струн. Эта модель имеет качественное обоснование в рамках КХД и использует представление о струнах как о трубках цветового потока. Для учета эффектов слияния первичных струн и образования струнных кластеров на наблюдаемые величины, в диссертации применен подход с введением решетки в плоскости прицельного параметра.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении изложены основные идеи используемого подхода. Обращено внимание на важность выбора наблюдаемых, на которые ослаблено влияние т.н. тривиальных "объемных" флуктуаций, возникающих из-за изменения общего числа струн от события к событию вследствие флуктуаций прицельного параметра, неустранимых в условиях реального эксперимента. Обоснована актуальность темы исследования. Обозначены цели и задачи диссертационной работы ее теоретическая и практическая значимость. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию используемой в работе струнной модели взаимодействия адронов, учитывающей процессы слияния первичных струн и образования струнных кластеров. Вводится понятие ближних и дальних по быстроте корреляций. Представлены два альтернативных подхода к определению коэффициентов корреляции между наблюдаемыми в разнесенных быстротных интервалах (окнах наблюдения).

Во второй главе исследуется актуальный вопрос о влиянии неоднородности распределения струн в плоскости прицельного параметра, которое всегда имеет место в условиях реального эксперимента, на величину корреляций между наблюдаемыми в двух разнесенных быстройных интервалах. В качестве наблюдаемых физических величин выбирается число частиц (множественность) в определенном интервале быстройности или средний поперечный импульс этих частиц в данном событии. Получены аналитические выражения для асимптотики коэффициентов дальних корреляций между поперечным импульсом и множественностью, а также между поперечными импульсами в двух разнесенных быстройных интервалах при большой плотности струн и неоднородном распределении струн в поперечной плоскости. Расчеты проведены двумя независимыми способами с использованием упомянутых выше альтернативных подходов к определению коэффициентов корреляции, при этом результаты расчетов совпадают. Кроме того, представлен дополнительно разработанный Монте-Карловский (МК) алгоритм, позволяющий провести эти расчеты при произвольной плотности струн, и показано, что результаты МК расчетов при большой плотности струн выходят на асимптотику, рассчитанную аналитически. Это подтверждает надежность как полученных аналитических выражений, имеющих довольно сложный вид, так и корректность составленных программ, по которым проводились МК-симуляции. На основе полученных аналитических и численных результатов проведен анализ влияния неоднородности распределения струн в плоскости прицельного параметра через процессы слияния струн на величину коэффициентов дальних корреляций между поперечным импульсом и множественностью, а также между поперечными импульсами в двух разнесенных по быстройности интервалах наблюдения.

Третья глава посвящена исследованию другого актуального вопроса - изучению влияния степени центральности столкновения на величину рассматриваемых корреляций между величинами в двух разнесенных по быстройности окнах наблюдения. Современные эксперименты физики высоких энергий, включая эксперименты на коллайдерах RHIC и LHC, позволяют по некоторым признакам разбить весь массив событий, как для AA, так и для pA и pp столкновений на так называемые классы центральности и проводить анализ физических процессов отдельно для каждого класса центральности. Простейшим способом имитировать фиксацию класса центральности в теоретическом анализе коэффициентов корреляции является переход к усреднению по струнным конфигурациям с фиксированным общим числом начальных струн. Поэтому в этой главе, аналогично главе 2, аналитически вычисляются асимптоты коэффициентов дальних корреляций между множественностями и между множественностью и средним поперечным импульсом в двух разделенных быстройных интервалах при высокой плотности струн. Вычисления проводятся также для реалистического случая с неоднородным распределением струн в плоскости прицельного параметра, но с дополнительной фиксацией общего числа начальных струн, что моделирует фиксацию класса центральности столкновения. Полученные формулы позволяют сделать выводы о характере изменения поведения изучаемых коэффициентов корреляции при фиксации класса центральности, по сравнению с их поведением для всего массива событий (без отбора по центральности столкновения - т.н. min.bias случай).

Результаты анализа, проведенного в главах 2 и 3, показывают, что переход от коэффициента корреляций между экстенсивными величинами (множественностями заряженных частиц в двух окнах наблюдения) к изучению коэффициента корреляций, когда одна или обе наблюдаемые являются интенсивными переменными (в нашем случае, это средний поперечный импульс в данном событии в окне наблюдения) не позволяет полностью подавить вклад объемных флуктуаций. Поэтому в четвертой главе в рамках этой же модели, учитывающей слияние струн и образование струнных кластеров, для случая pp рассеяния при высоких энергиях рассчитана сильно-интенсивная переменная Σ , характеризующая корреляции между числом частиц, образующихся в двух разнесенных по быстроте интервалах наблюдения. Целью использования этой переменной является ослабление влияния на результат объемных флуктуаций, связанных с флуктуацией от события к событию общего числа образующихся струн. В работе получено выражение этой переменной, через параметры струнных кластеров. Путем моделирования реалистического распределения струн в плоскости прицельного параметра получена зависимость этой переменной от энергии и центральности pp столкновения. Проведено сравнение результатов расчетов Σ с экспериментальными данными коллаборации ALICE на БАК. Установлено, что наблюдаемое в эксперименте ALICE поведение этой переменной удастся объяснить только при наличии источников разного типа, роль которых в нашей модели играют одиночные струны и кластеры, образованные слиянием нескольких струн. Показано, что сравнение результатов нашей модели с предварительными экспериментальными данными ALICE, полученными в *min.bias* (без отбора по центральности) pp -столкновениях при энергиях 0.9-13 ТэВ и для различных классов центральности при энергии 13 ТэВ, позволяет извлечь информацию о модельных параметрах, характеризующих кластеры с различным числом слившихся струн.

В Заключение кратко описаны основные полученные результаты.

В целом диссертация производит весьма хорошее впечатление. Она содержит большой объем аналитических вычислений, в результате которых удалось получить целый ряд новых важных физических результатов. Получены явные аналитические выражения для асимптотик коэффициентов корреляции при большой плотности струн в модели со слиянием струн, учитывающей их неоднородное распределение в плоскости прицельного параметра. Аналогичные выражения получены и для случая с фиксацией общего числа начальных струн, имитирующей отбор по классам центральности при анализе экспериментальных данных. Это позволило проанализировать влияние неоднородности распределения струн в плоскости прицельного параметра, которое всегда имеет место в условиях реального эксперимента, а также фиксации класса центральности на величину коэффициентов корреляции между наблюдаемыми величинами.

Особо следует отметить результаты, полученные с использованием сильно-интенсивной переменной Σ при анализе pp столкновений при энергиях БАК. В работе получено выражения этой переменной через параметры струнных кластеров. С использованием комбинации аналитических и монте-карловских методов рассчитана зависимость переменной Σ от быстротного расстояния между окнами наблюдения и их ширины для случая pp столкновений при различных энергиях, в том числе и с учетом степени их центральности. Показано, что сравнение результатов расчетов сильно-интенсивной переменной Σ с имеющимися предварительными экспериментальными

данными коллаборации ALICE однозначно свидетельствует об образовании струнных кластеров в pp взаимодействиях при энергиях БАК и увеличении их вклада с ростом начальной энергии и центральности столкновения.

Следует также отметить всесторонность и надежность проведенного в работе анализа. Изучаемые проблемы анализируются очень глубоко и тщательно. Учитывается целый ряд условий, соответствующих реальной экспериментальной ситуации (неоднородность распределения струн в плоскости прицельного параметра, разбиение массива событий на классы центральности), что позволяет качественно понять влияние этих факторов на поведения коэффициентов корреляции. Ряд аналитических результатов получен двумя независимыми альтернативными методами. Дополнительно разработаны соответствующие МК алгоритмы и проведены численные расчеты. Показано, согласование аналитических и МК результатов, что свидетельствует об их надежности.

К недостаткам работы следует отнести следующие моменты.

В тексте диссертации не всегда явно формулируется привязка проводимых вычислений к конкретным физическим задачам. Так исследование влияния неоднородности распределения струн в плоскости прицельного параметра имеет очевидную связь с недавними работами группы К. Пахареса, исследовавшими влияния неравномерности распределения струн в поперечной плоскости в ядро-ядерных взаимодействиях за счет их большей сосредоточенности вблизи расположения нуклонов ядра.

Введение и описание используемой модели в главе 1 написаны несколько лаконично для текста диссертации, где ожидается более подробное изложение.

Текст смотрелся бы лучше, если бы в приложения было вынесено больше вычислений, чем это сделано в диссертации. Даже с учетом того, что используемые в них методы безусловно могут представлять отдельный интерес.

Данные замечания никоим образом не умаляют достоинств диссертационной работы, которая представляет собой цельное законченное научное исследование, содержащее новые результаты, которые имеют важное значение для развития теории сильного взаимодействия элементарных частиц. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в шести статьях в журналах, индексируемых в международных и российских базах данных, и неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях, что доказывает высокий уровень проведенных теоретических исследований.

Диссертация Белокуровой Светланы Николаевны на тему: «Корреляции и сильно-интенсивные переменные в модели с образованием струнных кластеров при энергиях БАК» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Белокурова Светлана Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук,
профессор, Санкт-Петербургский
государственный университет
30.05.2023



Афонин С.С.