

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Андреянова Александра Андреевича
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.

В диссертации Белокуровой С.Н. проведено теоретическое исследование корреляций, возникающих между различными физическими величинами в процессах множественного образования частиц при взаимодействии адронов высоких энергий. Рассмотрение этих процессов проводится на основе известной двух стадийной модели взаимодействия адронов, в которой на первом этапе происходит формирование некоторого количества кварк-глюонных (цветных) струн между партонами сталкивающихся адронов. На втором этапе происходит фрагментация этих струн в регистрируемые заряженные частицы. Эту полуфеноменологическую модель, имеющую только качественное обоснование в рамках КХД, широко используется для описания мягких процессов сильного взаимодействия, в том числе и в различных генераторах событий, поскольку для описания таких процессов теория возмущений КХД оказывается неприменима.

После первоначальной формулировки струнной модели, было высказано предположение, что с ростом начальной энергии и/или при переходе к ядро-ядерным столкновениям происходит увеличение плотности струн в поперечной плоскости, и становится необходимым учет взаимодействия между струнами, который влияет на процесс их фрагментации в наблюдаемые адроны. Одним из таких подходов является, используемая в диссертации, модель слияния цветных струн, предложенная в работах М.А. Брауна и К. Пахареса. Изучение различных корреляций, возникающих между физическими величинами при взаимодействии адронов высоких энергий, является инструментом, который позволяет получить информацию об этом новом явлении и сделать вывод о наличии процессов слияния струн и образовании струнных кластеров. Исследованию этой важной проблемы и посвящена представленная диссертационная работа.

Во введении и первой главе диссертации дается формулировка используемой в работе модели со слиянием струн в плоскости прицельного параметра. Даются основные определения и сформулированы методы, позволяющие рассчитывать величину корреляций между различными наблюдаемыми в рамках этой модели. При этом для учета процессов слияния струн и образования струнных кластеров в диссертации используется наиболее простой метод, предложенный В.В. Вечерниным и Р.С. Колеватовым и основанный на введении конечной решетки (грида) в плоскости поперечной к оси столкновения. В качестве наблюдаемых величин, корреляции между которыми изучаются в работе, используются различные комбинации экстенсивной (множественность заряженных частиц в заданном быстротном интервале - n) и интенсивной (средний поперечный импульс этих частиц в данном событии - pt) переменных.

Важным, неизученным вопросом оставался анализ влияния неоднородности в распределении струн в поперечной плоскости (что всегда имеет место в реальных столкновениях адронов) на величину коэффициентов корреляции. Изучению этого вопроса посвящена вторая глава диссертации. С целью исследования этого вопроса в диссертационной работе с использованием двух альтернативных подходов были получены аналитические выражения для асимптотик коэффициентов дальних корреляций между поперечным импульсом и множественностью ($pt-n$), а также между поперечными импульсами в двух разнесенных быстрой окнах наблюдения ($pt-pt$) в этом общем случае при большой плотности струн.

Параллельно были проведены численные МК расчеты, позволяющий получить аналогичные результаты при произвольной плотности струн. Показано, что аналитические и численные МК результаты полностью согласуются друг с другом. Это свидетельствует о корректности МК вычислений и полученных аналитических формул для коэффициентов корреляции, что важно, учитывая сложный вид найденных асимптотических выражений (особенно для случая $pt-pt$ корреляции). На основе результатов этих расчетов в диссертации проведен подробный анализ влияния неоднородности распределения струн в поперечной плоскости на величину коэффициентов $pt-n$ и $pt-pt$ корреляций.

Другим физически важным вопросом, который рассмотрен в третьей главе диссертации, является анализ влияния степени центральности столкновения на величину коэффициентов корреляции. Это связано с тем, что в современной физике высоких энергий в ускорительных экспериментах анализ данных и извлечение физических характеристик процесса столкновения обычно проводится после предварительного разбиения всего массива зарегистрированных событий на так называемые классы центральности, характеризующие степень центральности столкновения взаимодействующих протонов и ядер. Часто в экспериментах эта степень центральности столкновения оценивается по множественности заряженных частиц фиксируемых в определенном быстрой интервале. В рамках модели, используемой в представленной диссертационной работе, фиксация класса центральности столкновения имитировалась наложением дополнительного условия, фиксирующего общее количество образующихся на начальном этапе цветных струн, и анализом влияния этого дополнительного условия на величину коэффициентов корреляции.

Для этого в третьей главе диссертации путем аналитических вычислений в рамках модели со слиянием струн на поперечной решетке были получены явные выражения для асимптотик коэффициентов дальних $n-n$ и $pt-n$ корреляций при большой плотности струн с учетом фиксации их общего числа. Показано, что фиксация общего числа образующихся начальных струн (имитирующая фиксацию класса центральности столкновения) оказывает сильное влияние на поведение коэффициентов корреляции. Для случая с однородным распределением струн убывание коэффициентов дальних $n-n$ и $pt-n$ корреляций с ростом средней плотности струн (η) становится более быстрым, степень их убывания при большой плотности струн изменяется с $-1/2$ на $-3/2$. Получение этого результата потребовало от диссертанта большого объема вычислений, т.к. сокращение всех членов пропорциональных $\eta^{-1/2}$ потребовало учета всех членов следующего порядка $\eta^{-3/2}$. Кроме того для произвольного распределения струн в поперечной плоскости было показано, что фиксация общего числа струн приводит к тому, что коэффициент $pt-n$

корреляции всегда оказывается отрицательным, тогда как без этого дополнительного условия, как было показано во 2 главе, он может принимать отрицательные значения только при очень неравномерном распределении струн в плоскости прицельного параметра.

Расчеты, проведенные во второй главе, показывают, что изучение стандартно определенных коэффициентов корреляции даже с привлечением в качестве наблюдаемой интенсивной величины pt - среднего поперечного импульса частиц в данном событии в заданном быстротном интервале - не позволяет избавиться от влияния на результат так называемых тривиальных объемных флуктуаций. Они возникают от неизбежных в реальном эксперименте флуктуаций числа струн от события к событию вследствие, например, принципиально неустранимых флуктуаций прицельного параметра. Эти флуктуации оказывают незначительное влияние при измерении в эксперименте различных средних величин, но дают существенный (а иногда и определяющий) вклад при измерении величин дисперсий и корреляций различных наблюдаемых.

Одной из важнейших задач является выделение на фоне этих тривиальных объемных корреляций вклада от физически интересных корреляций, возникающих, например, вследствие процесса слияния струн и образования источников нового типа - струнных кластеров. Одним из способов это сделать, является переход от стандартного определения коэффициента корреляции, используемого в предыдущих главах диссертации, к изучению так называемой сильно-интенсивной переменной Σ , введенной в 2011 г. в работе М.И. Горенштейна и М. Газдзицкого. В диссертационной работе рассматривается ее вариант, предложенный в 2015 г. в работе Е.В. Андропова, когда в качестве исходных наблюдаемых при определении Σ используется число частиц, образующихся в двух разнесенных по быстройте окнах наблюдения. Действительно, в рамках модели с одинаковыми струнами, без учета процессов их слияния, величина Σ оказывается зависящей только от характеристик одиночной струны - среднего числа частиц от фрагментации этой струны на единицу быстроты и величины корреляций между этими образующимися частицами. Она не зависит ни от числа образующихся струн, ни от их флуктуации от события к событию, подтверждая свой сильно интенсивный характер.

В 4 главе диссертационной работе показано, что при учете процессов слияния струн и образования струнных кластеров переменная Σ выражается через величины Σ_k , зависящие только от параметров струнных кластеров, образованных слиянием k начальных струн, и некоторые весовые коэффициенты. Эти коэффициенты пропорциональны числу частиц, образующихся от распада кластеров с данным числом слившихся струн. Эти коэффициенты зависят как. Для расчета этих коэффициентов в диссертации используется МК моделирование распределения струн в плоскости прицельного параметра согласно условиям pp столкновения и с последующим учетом слияния струн и образования струнных кластеров. Такой расчет позволяет найти зависимость этих весовых коэффициентов от начальной энергии и центральности pp столкновения. На их основе уже аналитически рассчитывается зависимость Σ от расстояния по быстройте между этими окнами наблюдения и ширины этих окон.

Сравнение полученных теоретических результатов для переменной Σ с предварительными экспериментальными данными, полученными коллаборацией ALICE

на БАК из анализа pp столкновений при энергиях от 0.9 до 13 ТэВ, позволяет сделать вывод, что наблюдаемую в эксперименте зависимость этой переменной от начальной энергии и центральности pp столкновения удастся объяснить, только при наличие источников разного типа, в качестве которых в данном подходе выступают одиночные струны и кластеры из слившихся струн. При этом показано, что с увеличением начальной энергии и центральности pp столкновения возрастает вклад в Σ от кластеров с всё большим числом слившихся струн. При определенных, довольно естественных предположениях из экспериментальных данных удастся извлечь и параметры, характеризующие струнные кластеры с различным числом слившихся струн.

В целом диссертация производит очень хорошее впечатление. В ней проведено всестороннее теоретическое исследование различных типов корреляций, которые имеют место в процессах множественного рождения заряженных частиц при взаимодействии адронов высоких энергий с использованием в качестве наблюдаемых экстенсивных (n), интенсивных (pt) и сильно интенсивных величин (Σ). Выводы о свойствах возникающих корреляций делаются на основе большого объема аналитических и МК вычислений, что позволяет проводить их взаимный контроль, обеспечивая надежность получаемых результатов.

Диссертация содержит целый ряд новых важных научных результатов, свидетельствующих о личном вкладе автора диссертации в науку. Наиболее важным, на мой взгляд, является, полученный в 4 главе вывод о том, что зависимость сильно интенсивной переменной Σ от начальной энергии и степени центральности pp столкновения, наблюдаемую в данных эксперимента ALICE на БАК, удастся объяснить только при условии слияния некоторого числа начальных струн в струнные кластеры. Это позволяет сделать диссертанту обоснованный вывод о наличие нового физического явления - образования струнных кластеров при энергиях БАК уже в pp столкновениях.

К недостаткам можно отнести следующие моменты. Во второй главе подробно исследуется, аналитическими и МК методами, влияние неоднородности распределения струн в плоскости прицельного параметра на величину дальних корреляций различного типа ($pt-n$ и $pt-pt$). При этом разработанные МК алгоритмы позволяют проводить вычисление этих коэффициентов для произвольного начального распределения струн в поперечной плоскости. Поэтому было бы логично применить его для распределения струн, возникающих в каком-то конкретном ядро-ядерном столкновении. Это позволило бы сделать предсказания величины коэффициентов корреляции для данного ядро-ядерного столкновения.

Это же замечание можно отнести и к исследованию влияния фиксации класса центральности столкновения на величину дальних $n-n$ и $pt-n$ корреляций проводимую в третьей главе. В этом случае вместо условного разбиения событий на классы центральности по числу образующихся струн, желательно было бы использовать более близкий к эксперименту критерий, например, множественность заряженных частиц в каком-то быстротном интервале. Такой подход подразумевает МК реализацию, т.к. его, вряд ли, возможно осуществить аналитически. Следует отметить, что он уже использовался диссертантом в следующей четвертой главе, но уже при анализе

зависимости сильно интенсивной переменной Σ от степени центральности pp столкновения.

Впрочем, отмеченные недостатки, скорее являются пожеланиями на будущее. Они не умаляют достоинств диссертации, которая представляет собой законченное научное исследование, обладающее внутренним единством. В диссертации получен целый ряд новых научных результатов, имеющих важное значение для развития теории взаимодействия элементарных частиц при высоких энергиях. Представленные результаты, опубликованы в шести журнальных статьях индексируемых в международных базах данных, в двух из которых диссертант является единственным автором, а в остальных четырех единственным соавтором является научный руководитель. Они неоднократно докладывались на международных конференциях, что свидетельствует о высоком уровне проведенных 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.

Член диссертационного совета

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



Андрианов А.А.

08.06.2023