

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета **Кима Виктора Тимофеевича** 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 настоящее время достигнут значительный прогресс в понимании жестких процессов при высоких энергиях в рамках квантовой хромодинамики (КХД), когда благодаря факторизации могут быть отделены вклады малых расстояний, вычисляемые по теории возмущений, от вкладов больших расстояний для которых нет регулярных методов и развиваются модельные подходы. Поэтому развитие различных непertурбативных подходов для процессов адронизации, связанных с большими расстояниями, является одной из **актуальных** задач современной физики высоких энергий.

Диссертационная работа Белокуровой Светланы Николаевны посвящена теоретическому изучению процесса адронизации в сильных взаимодействиях при энергиях Большого адронного коллайдера (БАК) в струнном подходе путем исследования корреляций между различными наблюдаемыми, которые учитывают процессы слияния кварк-глюонных струн и образование струнных кластеров при сверхвысоких энергиях.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 4-х приложений и перечня цитируемой литературы, содержащего 79 ссылок. В диссертации содержится 15 рисунков. Общий объем диссертации составляет 136 страницы на русском языке (132 страницы на английском).

**Введение** содержит короткий обзор модификаций струнной модели, которая используется для описания мягких процессов при взаимодействии адронов высоких энергий, в виду невозможности применения для их расчетов теории возмущений КХД.

**Первая глава** диссертации посвящена более подробному изложению варианта струнной модели, в рамках которого в диссертационной работе проводятся все вычисления. В этом варианте процессы слияния цветных струн учитываются путем введения конечной решетки (сетки) в плоскости прицельного параметра. Изложены также общие методы и подходы, позволяющие рассчитать величину корреляций между двумя наблюдаемыми, такими как множественность частиц и их событийный поперечный импульс, в двух разнесенных по быстроте интервалах наблюдения.

Во **второй главе**, с использованием этого подхода, диссертантом получены новые результаты, описывающие влияние неоднородности в распределении струн в плоскости прицельного параметра на величину коэффициентов корреляции между поперечным импульсом и множественностью, а также между поперечными импульсами в двух окнах наблюдения. Этот результат имеет важное физическое значение, так как в столкновении реальных адронов всегда имеется такая неоднородность в распределении струн.

В **третьей главе**, в рамках этого же подхода, впервые анализируется влияние разбиения событий по классам центральности на величину коэффициентов корреляции



между множественностями заряженных частиц, а также между средним поперечным импульсом и множественностью в двух быстройных интервалах. Для предварительных оценок этого влияния в рамках используемой модели разбиение на классы центральности имитируется введением дополнительного условия фиксирующего общее число образующихся начальных кварк-глюонных струн. Также, исследовано влияние этого дополнительного условия на величину коэффициентов корреляции.

**Четвертая глава** посвящена изучению корреляций между множественностями в двух быстройных окнах с использованием, так называемой, сильно-интенсивной переменной  $\Sigma$ . Поскольку исследования во второй главе диссертации показали, что использование традиционно определенного коэффициента корреляции не позволяет подавить влияние на результат тривиальных "объемных" флуктуаций, даже если использовать в качестве наблюдаемых интенсивную переменную, такую как событийный средний поперечный импульс частиц в данном быстройном интервале. Эти "объемные" флуктуации возникают, например, из-за неустраняемых в реальном эксперименте флуктуаций прицельного параметра, ведущих к флуктуации общего числа струн от события к событию. Вклад от объемных флуктуаций в традиционно определенные коэффициенты корреляции затеняет вклад от физически интересных явлений, таких как процессы слияния струн и образование струнных кластеров. Ранее [в работе Вечернина В.В. (2018)] было показано, что в модели с одинаковыми цветными струнами, без учета процессов их слияния и образования кластеров струн, переменная  $\Sigma$  действительно является сильно интенсивной наблюдаемой. Ее величина не зависит ни от числа образующихся струн, ни от его флуктуаций от события к событию. Она зависит только от характеристик одиночной струны - плотности частиц от ее распада на единицу быстроты и величины корреляций между образующимися частицами.

**В Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы и обсуждаются направления возможных дальнейших исследований.

В представленной диссертационной работе можно выделить следующие интересные результаты:

выполнен расчет величины сильно-интенсивной переменной  $\Sigma$  с учетом процессов слияния струн и образованием струнных кластеров на основе используемой модели с поперечной решеткой. Впервые показано, что в этом случае переменная  $\Sigma$  выражается через параметры струнных кластеров и весовые коэффициенты. Эти весовые коэффициенты равны долям частиц, образующихся от распада кластеров данного типа. Их расчет требует детального МК моделирования процесса столкновения, поскольку число образующихся струнных кластеров разного типа зависит от типа сталкивающихся адронов, их начальной энергии и центральности столкновения;

в четвертой главе диссертации разработан МК алгоритм моделирующий процесс высокоэнергетического  $pp$  рассеяния. Предполагается, что в процесс  $pp$  взаимодействия дает вклад обмен одним, двумя, тремя и т.д. числом померонов. Получена связь параметров разработанного МК алгоритма с параметрами реджевской модели. Введение поперечной решетки на позволяет определить количество образующихся кластеров с различным числом слившихся струн и найти значения весовых коэффициентов для



данной энергии  $pp$  столкновения и (при необходимости) данного класса центральности, отобранного по множественности в некотором дополнительном быстротном окне;

проведено сравнение рассчитанных результатов для  $\Sigma$  с предварительными экспериментальными данными коллаборации ALICE по величине этой переменной в  $pp$  столкновениях на БАК при энергиях 0.9, 7 и 13 ТэВ. Оно показывает, что наблюдаемую в эксперименте зависимость этой переменной от начальной энергии и центральности  $pp$  столкновения невозможно объяснить в рамках модели с одинаковыми струнами без учета процессов их слияния и образования струнных кластеров. Согласие удастся получить только в развиваемой в диссертации модели, поскольку в ней образуются струнные кластеры, характеристики которых зависят от числа слившихся струн. Причем возрастание переменной  $\Sigma$  с увеличением начальной энергии  $pp$  столкновения и его центральности естественно объясняется увеличением в этом случае доли кластеров с все большим числом слившихся струн по сравнению с одиночными струнами;

полученный в диссертационной работе вывод о важности слияния струн в адронизации при их высокой плотности является важным физическим результатом, показывающим, что процессы слияния струн и образования струнных кластеров при энергиях БАК происходят и в  $pp$  столкновениях и без их учета невозможно объяснить поведение сильно интенсивной переменной  $\Sigma$ .

В целом диссертация производит хорошее впечатление. Кроме упомянутого важного результата для сильно интенсивной переменной, полученного в 4 главе, автором во 2-й и 3-й главах также получен целый ряд новых результатов для коэффициентов дальних по быстроте корреляций, раскрывающий характер их зависимости от неоднородности распределения струн в поперечной плоскости и от разбиения массива событий на классы центральности. Полученные в диссертации выражения для коэффициентов корреляции представляются довольно надежными. Многие из них получены с использованием двух альтернативных подходов и дополнительно проверены численным МК моделированием.

Диссертация написана в сжатом, но довольно ясном стиле, и тщательно оформлена. Тем не менее, все же присутствуют некоторые недостатки. В частности, полученные во 2-й и 3-й главах формулы, позволяют качественно понять влияние обозначенных там факторов на величину коэффициентов дальних корреляций. Поэтому, кажется, что с использованием разработанных данных МК алгоритмов можно было бы сделать и более конкретные предсказания для этих коэффициентов для каких-то определенных ядроядерных реакций. Также, при обсуждении во 2-й главе характера зависимости коэффициента корреляции от неоднородности в распределении струн в поперечной плоскости, в качестве параметров выбираются параметры:  $m$  - доля ячеек решетки с повышенной плотностью струн и  $a$  - кратность превышения плотности струн в этих ячейках по сравнению с плотностью  $\eta$  в остальных. В качестве меры неоднородности изменяется параметр  $m$  при фиксированном параметре  $a$  и коэффициент корреляции представляется как функция  $\eta$  (см., например, рис. 2.5). Однако, в этом случае вместе с  $m$  изменяется и средняя плотность струн, от которой коэффициент корреляции также зависит. Было бы более наглядно и информативно при изучении зависимости коэффициентов корреляции от  $m$  представлять их не только как функцию  $\eta$ , а также как



функцию средней плотности струн, которая равна  $(m\alpha + 1 - m)\eta$ . Но, указанные недостатки, нисколько не влияют на высокий уровень выполненной работы, а скорее являются темой для будущих исследований.

Диссертация Белокуровой С.Н. является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Полученный автором ряд новых результатов, имеющих принципиальное значение для развития КХД и являются заметным шагом в развитии струнного подхода для процесса адронизации сильных взаимодействий при высоких энергиях.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для теоретических исследований процессов взаимодействия адронов и ядер при высоких энергиях, а также в физических программах экспериментов ЦЕРН на БАК и СПС, БНЛ на RHIC, ГСИ на ФАИР и ОИЯИ на коллайдере НИКА.

Результаты диссертации являются **новыми** и оригинальными, с достаточной полнотой опубликованы в реферируемых ведущих научных журналах, неоднократно **апробировались** на международных и российских совещаниях и конференциях. **Вклад автора** является определяющим в результатах работ, составляющих основу диссертации. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам.

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  
д.ф.-м.н., заместитель руководителя  
Отделения физики высоких энергий  
Петербургский институт ядерной физики  
им. Б.П. Константинова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Ким Виктор Тимофеевич

8.06.2023

Подпись В.Т. Кима заверяю

Ученый Секретарь

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ



С. И. Воробьев