

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета **Кима Виктора Тимофеевича** на диссертацию **Прохоровой Дарьи Сергеевны** на тему «**Начальные конфигурации и слияние цветковых струн как источники коллективных явлений в протон-протонных взаимодействиях при высоких энергиях**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

В настоящее время имеется значительный прогресс в описании жестких процессов при высоких энергиях в рамках квантовой хромодинамики(КХД), когда благодаря свойству факторизации могут быть разделены 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, и их применение для понимания физики с большими адронными множественностями являются одной из **актуальных** задач современной физики высоких энергий.

Диссертационная работа Прохоровой Дарьи Сергеевны посвящена разработке Монте-Карловского (МК) подхода для теоретического и феноменологического изучения процесса адронизации в сильных взаимодействиях при энергиях Большого адронного коллайдера (БАК) в струнном подходе путем исследования корреляций между различными наблюдаемыми, которые учитывают процессы взаимодействия кварк-глюонных струн при сверхвысоких энергиях.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, 2-х приложений и перечня цитируемой литературы, содержащего 162 ссылки. В диссертации содержится 26 рисунков. Общий объем диссертации составляет 145 страницы на русском языке.

Введение содержит короткий обзор различных модификаций струнной модели, которая используется для описания мягких процессов при взаимодействии адронов высоких энергиях, в виду невозможности применения для их расчетов теории возмущений КХД. Описывается актуальность темы диссертации, ее разработанность, цель и основные задачи исследования, его новизна, значимость и методы. Сформулированы научные результаты и основные положения, выносимые на защиту, представлена апробация работы.

Первая глава диссертации посвящена упрощенная модель множественного рождения частиц, учитывающая слияние струн, конечных по быстроте. Представлены предварительные результаты расчетов для коэффициента корреляции и сильно интенсивной переменной, которые качественно сравниваются с экспериментальными данными. Обсуждаются преимущества рассмотрения такого расширения оригинальной модели цветковых струн. Полученные промежуточные выводы говорят в пользу продолжения исследований в этом направлении.

Во второй главе представлена существенно доработанная версия модели. Она

включает детальную продольную динамику осциллирующих цветковых струн, поперечную эволюцию струнной плотности с учетом притяжения струн в каждом событии и слияние струн в динамически определенной конфигурации. Представлен подбор параметров модели в результате сопоставления с экспериментальными данными. Результаты расчетов количественно сравниваются с данными ALICE для неупругих pp-взаимодействий при $\sqrt{s} = 900$ ГэВ. Сформулированы выводы о влиянии флуктуаций трехмерной цветовой струнной плотности на корреляционные меры.

В третьей главе, в рамках этого же подхода, формализм модели дополнительно расширяется механизмами, необходимыми для изучения азимутальных потоков частиц в нашем подходе. Именно реализация буста частиц, вызванного слиянием струн, и гашение импульса частиц в плотной струнной среде позволяют изучать азимутальную асимметрию их рождения в модельном формализме. Выполнена фиксация параметров модели из сравнения с данными. Наблюдаемая структура ближнего гребня и полученное значение гармоники эллиптического потока находятся в качественном согласии с данными ATLAS для pp-взаимодействий с высокой множественностью при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

В представленной диссертационной работе можно выделить следующие интересные новые результаты:

1. В представленной упрощенной модели без ближних корреляций учет конечности струн по быстрой приводит к уменьшению коэффициента корреляции $\text{vcorr}[NF, NB]$ и увеличению сильно интенсивной величины $\Sigma[NF, NB]$ с увеличением быстрой расстояния, Δy , между быстротными аксептансами, где вычисляются множественности NF и NB . Это поведение конкурирует с возможным вкладом от ближних корреляций, ранее показанным в струнных моделях других авторов, который также уменьшает $\text{vcorr}[NF, NB]$ и увеличивает $\Sigma[NF, NB]$ с Δy . Рассматривая оба механизма по отдельности, можно получить описание экспериментальных данных, что делает произвольный выбор одного из этих сценариев неправомерным. Таким образом, доказывается, что зависящий от быстрой фон дальних корреляций, определяемый исключительно флуктуациями числа струн в быстротных аксептансах в передней и задней полусферах, является важной составляющей рассмотрения корреляций, которое должно быть выполнено в будущих исследованиях.

2. В представленной упрощенной модели без ближних корреляций учет как конечность струн по быстрой, так и слияния струн, перекрывающихся в трехмерном конфигурационно-импульсном пространстве, приводит к уменьшению сильно интенсивной величины $\Sigma[NF, NB]$. С одной стороны, это противоречит результатам, полученным ранее в моделях других авторов с бесконечными струнами и ближними корреляциями. С другой стороны, это согласуется с экспериментальными наблюдениями уменьшения $\Sigma[NF, NB]$ для центральных ядро-ядерных столкновений, следовательно, для более плотных струнных конфигураций. Можно предположить, что одновременный учет как конечности струн по быстрой, так и ближних корреляций даст результирующее уменьшение $\Sigma[NF, NB]$ при слиянии струн в А-А столкновениях. Однако, учет вклада от конечности струн по быстрой изменит его. Таким образом, это наблюдение подтверждает

предыдущее утверждение и говорит в пользу возможности в будущем разработки модели, одновременно учитывающей эти два механизма.

3. В разработанной модели со струнами, конечными по быстроте, учет поперечной динамики струн, вызванной их притяжением, и образования струнных кластеров за счет их слияния приводит к правильному описанию поведения $\langle p_T \rangle - N$ корреляционной функции, наблюдаемой в pp-взаимодействиях при высоких энергиях. В диссертации показано, что именно режим с наибольшей степенью перекрытия струн, достигаемой при $t_{deepest}$, описывает наклон $\langle p_T \rangle - N$.

4. В диссертации показана аналитическая связь сильно интенсивной величины $\Sigma[NF, NB]$ с кумулянтами, факториальными кумулянтами и коэффициентом асимметрии распределения $NF-NB$. Этот вывод обогащает понимание свойства сильной интенсивности, расширяя класс наблюдаемых величин, устойчивых к тривиальным флуктуациям объема. В диссертации показано, что для исследования корреляций и флуктуаций множественности «вперед-назад» достаточно изучать только одну из указанных величин. Однако добавление в анализ коэффициента корреляции является полезным, поскольку он дает дополнительную информацию о $\langle NB(NF) \rangle$.

5. В разработанной модели с ограниченными по быстроте струнами, учитывающей трехмерную динамику плотности струн, показано, что эффект слияния струн изменяет значения коэффициента корреляции $\text{corr}[NF, NB]$ и сильно интенсивных величин $\Sigma[NF, NB]$, $\Sigma[PT, N]$ и $\Delta[PT, N]$ таким же образом, как и механизм перецепления цвета, используемый в генераторе событий PYTHIA. Наблюдаемая согласованность обоих подходов, основанных на разных идеях, но рассматривающих переход струнной системы в энергетически более выгодное состояние, с экспериментальным поведением делает их альтернативными.

6. В усовершенствованной модели с ограниченными по быстроте струнами, учитывающей 3-мерную динамику плотности струн и слияние струн, которое придает дополнительный буст испускаемым частицам в поперечном измерении и влияет на их потери импульса в неоднородной струнной среде, получены результаты по азимутальным анизотропиям рожденных частиц. Структура ближнего гребня в двухчастичной угловой корреляционной функции соответствует наблюдению ATLAS сигнала коллективности в pp-столкновениях с высокой множественностью. Рассчитанные двухчастичные кумулянты качественно описывают экспериментальное увеличение азимутальных корреляций с множественностью событий и поперечным импульсом частиц.

7. Показано, что время поперечной эволюции системы струн, динамически определяемое из начальной трехмерной конфигурации струн, является основным параметром, контролирующим разделение областей плотности струн «core-core», определяющих существенно различные режимы рождения частиц в модели. Полученный 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 Σ .

В целом диссертация производит хорошее впечатление. Она написана в сжатом, но довольно ясном стиле, и тщательно оформлена. Тем не менее, все же присутствуют некоторые недостатки (фрагментарность изложения в некоторых местах и т.п.). Также, при обсуждении эффектов «гребня» отсутствует обсуждение эффекта ближнего «гребня», обнаруженного в 2010 г. коллаборацией CMS в pp-соударениях, вызвавшего огромный научный резонанс, так как он ожидался только в ядро-ядерных соударениях. Но, впрочем, указанный недостаток ни а коей мере не влияют на высокий уровень выполненной работы, а скорее является темой для будущих исследований.

Диссертация Прохоровой Д.С. является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Полученный автором ряд новых результатов, имеющих важное 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 Прохоровой Дарьи Сергеевны на тему: «Начальные конфигурации и слияние цветковых струн как источники коллективных явлений в протон-протонных взаимодействиях при высоких энергиях», соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Прохорова Дарья Сергеевна 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»

10.06.2024

Ким Виктор Тимофеевич

Подпись В.Т. Кима заверяю

Ученый Секретарь

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ



С. И. Воробьев