



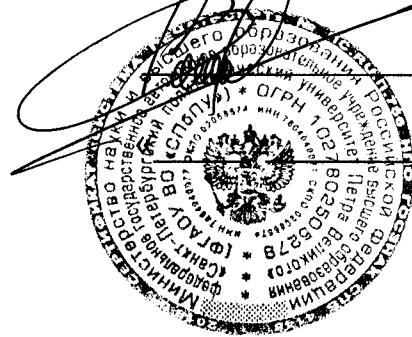
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
Санкт-Петербургского
политехнического университета
Петра Великого

Ю.В. Фомин

2024 г.



29.05.2024 № 50-24/095
на № 01/1-35-831 от 25.03.2024

ОТЗЫВ

ведущей организации – Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого на диссертацию Прохоровой Дарьи Сергеевны на тему «Начальные конфигурации и слияние цветовых 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.

Диссертация Прохоровой Д. С. посвящена теоретическому исследованию влияния различных начальных конфигураций кварковых и глюонных полей на корреляции в конечном состоянии, возникающие между сильно разнесенными по скорости адронами, в процессах множественного рождения частиц в столкновениях адронов высоких энергий.

В настоящее время считается установленным, что в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер образуется новое состояние вещества, именуемое кварк-глюонной плазмой (КГП). Неожиданным было обнаружение сигналов образования КГП в малых системах, в том числе и в протон-протонных столкновениях с большой множественностью конечных частиц. К таким сигналам, в частности, относится возникновение дальних (по скорости) корреляций между адронами с малой разницей азимутальных углов (так называемый ridge-effect), обнаруженных в протон-протонных столкновениях на Большом адронном коллайдере (БАК). Это наталкивает на мысль о возможных новых источниках

BX. N 01/1-34-2229
OT 03.06.2024

коллективных эффектов, не связанных с гидродинамическим подходом КПП. В научном сообществе развернулась дискуссия относительно оправданности использования гидродинамического подхода в столь малых системах. В представленной работе развивается один из альтернативных подходов к образованию коллективных эффектов. Таким образом, несомненно, работа является своевременной и актуальной.

Основной целью диссертант ставит разработку модели взаимодействующих кварковых струн конечной длины по быстроте для описания множественного рождения частиц и коллективных эффектов, наблюдаемых в протон-протонных взаимодействиях. Подобный подход избран и в других моделях, например в известном Монте-Карло генераторе PYTHIA. Принципиальным отличием подхода, развиваемого в работе, является введение дополнительных механизмов отвечающих за взаимодействие кварковых струн. Также важным является рассмотрение более реалистичных струн конечной длины по быстроте и влияния движения концов струны. Выгодным отличием разрабатываемой модели является малое количество используемых параметров. Изучение механизмов взаимодействия струн может внести вклад в понимание происхождения коллективных эффектов в малых системах.

Новизной работы является учет конечной длины кварковых струн, а также одновременный учет потенциала притяжения между струнами и учет слияния струн. Уточнение модели кварковых струн приводит к появлению нетривиальных вкладов в рассматриваемые корреляционные меры и к возникновению особых азимутальных анизотропий, согласующихся с экспериментальными наблюдениями.

Значимость выполненной работы определяется феноменологическим разрешением проблемы возникновения дальних корреляций в столкновениях малых систем с большой множественностью рождения частиц в конечном состоянии. Результаты находятся в качественном согласии с экспериментальными данными при энергиях БАК и могут быть использованы для проведения расчетов при энергии коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility).

Достоверность результатов вычислений, выполненных в разработанной Монте-Карло модели, подтверждается сравнением с прямыми аналитическими вычислениями. Адекватность построенной модели подтверждается согласием с доступными на сегодняшний день экспериментальными данными.

Основные результаты диссертации доложены на конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах входящих в список ВАК и базы данных WoS и Scopus.

Общие сведения о диссертации:

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Полный объем составляет 145 страниц, включая 26 рисунков. Список литературы содержит 162 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость настоящей работы. Обоснована достоверность полученных результатов. Перечислены основные научные результаты и представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлено описание упрощенной модели взаимодействующих струн. Для упрощения игнорируется этап образования протяженных струн. В качестве начальных условий выбирается некоторое количество сформированных струн. Однако вводится дополнительный этап взаимодействия и слияния струн. Для упрощения вычислений используется решеточный подход к слиянию струн. Рассмотрение струн конечной длины предполагает изучение 3D картины слияния струн, что влияет на степень их перекрытия. За этапом взаимодействия струн следует этап преобразования получившейся струнной конфигурации в наблюдаемые адроны, согласно модели эффективной адронизации.

Представлены расчеты наклона корреляционной функции $b_{corr}[N_F N_B]$ между числом заряженных частиц в передней и задней быстрой области, а также результаты расчета сильно-интенсивных корреляционных мер $\Sigma[N_F N_B]$. Использование сильно-интенсивных мер позволяет обойти возможную зависимость от объема системы и от пособытийных флуктуаций.

Поведение, качественно согласующиеся с экспериментальными данными ALICE на БАК, получено за счет рассмотрения струн конечной длины без необходимости введения ближних корреляций, которые необходимы в моделях с бесконечными струнами, но ослабевают с Δy . Делается вывод о важности одновременного учета начальных условий (конечных струн) и ближних корреляций.

Разработанная модель является предпочтительной так как предсказывает уменьшение $\Sigma[N_F N_B]$ при слиянии струн, что наблюдается в столкновениях тяжелых ионов. Делается предположение что эффект уменьшения $\Sigma[N_F N_B]$ при слиянии струн конечной длины, компенсирует его рост за счет ближних корреляций. Ожидается, что в столкновениях тяжелых ионов эффект образования струн конечной длины будет усилен по отношению к протонным столкновениям за счет большого количества взаимодействий морских кварков. Таким образом в первой главе показана перспективность рассмотрения конечных по быстрой струн.

Во второй главе представлена доработанная версия модели, включающая детальную продольную динамику осциллирующих цветовых струн, поперечную эволюцию струнной плотности с учетом притяжения струн и слияние струн в динамически определенной конфигурации.

Число струн, возникающих в событии, определяется числом обменных померонов в соответствии с параметризацией теории Редже. Работа придерживается подхода, который позволяет проследить трехмерную эволюцию плотности струн до их слияния и учесть дополнительную динамику струн. Струны взаимодействуют согласно потенциалу Юкавы, созданному облаком σ -мезонов в результате частичного восстановления киральной симметрии, и приводящему к притяжению струн. Предполагается, что притягивающее взаимодействие между струнами происходит сразу после их формирования. Сначала реализуется поперечная динамика струн, а затем учитывается слияние некоторых из них. Струны считаются движущимися в поперечной плоскости как единое целое, без изгибов.

Продольная динамика струн учитывает движение концов струны. При этом продольная динамика должна быть синхронизирована с поперечной динамикой, однако для упрощения расчетов продольная и поперечная динамика реализованы последовательно. Синхронизация обеспечивается лишь приравниванием времен в соответствующих уравнениях.

Как и в первой главе решаемая задача слияния струн является трехмерной. Слияние струн влияет на среднюю множественность частиц для кластера из струн. Для изучения корреляций между множественностью и поперечным импульсом частиц в работе введен механизм генерации поперечного импульса. В модели не учитывается относительное поперечное расположение кластеров, однако эти вопросы рассматриваются в третьей главе.

Результаты моделирования сравниваются с аналитическими вычислениями в модели без слияния струн, показывающие хорошее согласие. Так же приводится сравнение с результатами моделирования в МК генераторе PYTHIA. Делается вывод о важности влияния слияния струн на корреляционные меры. В целом модельные результаты со слиянием струн близки результатам моделирования PYTHIA с учетом переплетения цвета, несмотря на то, что физика лежащая в основе моделей несколько отличается.

Проводится количественное сравнение с результатами измерения ALICE. Полученная модель может быть настроена на экспериментальные данные путем выбора всего двух параметров: средней множественности на единицу быстроты от свободной струны и среднего поперечного импульса частиц от свободной струны. Показывается, что наилучшее согласие с экспериментальными данными достигается для времени эволюции, соответствующему максимальной плотности струн в минимуме потенциальной энергии.

Показана связь $\Sigma[N_F N_B]$ с дисперсией коэффициента асимметрии и соответствие $\Sigma[N_F N_B]$ и кумулянтов распределения множественностей $N_F - N_B$.

Полученные результаты зависимости $\Sigma[N_F N_B]$ от центральности носят оценочный характер.

В третьей главе модель расширяется механизмами, необходимыми для изучения азимутальных потоков частиц. Реализуется буст частиц, вызванный слиянием струн и гашение импульса частиц в плотной струнной среде.

В усовершенствованной модели картина событий перед адронизацией выглядит как сильно неоднородная среда. Наличие сильных флуктуаций плотности приводит к появлению анизотропии частиц и эффектам гашения импульсов частиц. В терминах, используемых в работе, наблюдается наличие различных областей плотного «ядра» и менее плотной «короны». В области короны играют роль только потери импульса частиц. Области с низкой плотностью струн создают разнонаправленные бусты, в то время как область ядра обеспечивает одно доминирующее направление для частиц с малой разницей азимутальных углов, что приводит к образованию ближнего гребня (ridge-effect).

Модель позволяет также качественно воспроизвести ближний гребень и гармонику эллиптического потока.

Модель не позволяет воспроизвести дальний гребень ($\Delta\phi \approx \pi$), что интерпретируется скудностью текущей модели по отношению к описанию области перехода между ядром и короной.

В заключении сформулированы основные результаты работы

Приложения содержат детали разработанных алгоритмов перестановок партонов и определения партонного состава протонов.

В целом диссертация представляет собой законченное научное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, полностью обоснованы. Однако к недостаткам можно отнести следующие моменты.

1. Во введении перечисляются научные результаты с указанием статей и номеров страниц в публикациях, где эти результаты были представлены. Было бы намного удобнее если бы были также указаны номера рисунков и страниц в диссертации, где эти результаты продемонстрированы.
2. В первой главе проводится качественное сравнение предсказаний упрощенной модели с экспериментальными данными ALICE на БАК. Было

бы намного нагляднее если бы были приведены рисунки с результатами измерения.

3. Во второй главе на рисунке 2.8 представлено сравнение расчета $\langle p_T \rangle - N$ корреляционной функции с экспериментальными данными, полученными коллаборацией ALICE. Для лучшего сравнения следовало отобразить на рисунке и систематические неопределенности результатов измерения. Также в статье [129] указанная корреляционная функция измерена для множественности заряженных частиц до 40. Возможно ли в разработанной модели вычисление данной корреляционной функции при больших множественностях? Модель со слиянием струн и $\tau_{deepest}$ все же недооценивает результаты измерения корреляционной функции $\langle p_T \rangle - N$ для множественностей $N > 15$. Означает ли это, что модель перецепления цвета (color reconnection), используемая в PYTHIA, предпочтительна в этой области? Возможно ли включение эффектов перецепления цвета в разработанную модель?
4. В разделе 3.7.3 обсуждается сравнение полученных модельных результатов величин $c_2\{2\}$ с экспериментальными результатами ATLAS. В тексте диссертации указано, что результаты ATLAS могут быть найдены в работе [153], рис.4, правый верхний угол. Следовало бы привести данный график в самой работе для наглядного сравнения.
5. В заключении проводится сравнение представленной в диссертации модели с генераторами событий EPOS4 и PYTHIA. При этом ранее в основной части работы модель EPOS4 не обсуждалась, а сравнения полученных автором результатов проводилось исключительно с результатами генератора PYTHIA.

Указанные недостатки не умаляют достоинств диссертации. Проведен глубокий феноменологический анализ влияния различных механизмов взаимодействия конечных струн на корреляционные меры. Воспроизведение ближнего гребня (ridge-effect) является сильным достоинством модели, разработанной в работе. Полученные результаты углубляют наше понимание о механизмах возникновения коллективных эффектов в протон-протонных столкновениях с большой множественностью рождения конечных частиц, и влияние на них начальных конфигураций взаимодействия.

Материалы диссертации могут быть рекомендованы к использованию в СПбПУ, СПбГУ, ОИЯИ, ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ФИАН, НИИЯФ


МГУ, а также в зарубежных научных центрах, занимающихся исследованиями на ускорителях высоких энергий.

Диссертация Прохоровой Дарьи Сергеевны «Начальные конфигурации и слияние цветковых струн как источники коллективных явлений в протон-протонных взаимодействиях при высоких энергиях» соответствует паспорту научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика согласно номенклатуре научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени (Приказ Минобрнауки России от 24.02.2021 № 118), 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. Нарушений пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.


Диссертация Прохоровой Дарьи Сергеевны обсуждена на заседании Высшей школы фундаментальных физических исследований (ВШФФИ) Физико-механического института (ФизМех) СПбПУ, протокол № 24/05/009 от 14 мая 2024. Присутствовало на заседании 27 человек, приняли участие в обсуждении – 27 чел. Результаты голосования: «за» – 27 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Отзыв составил доктор физ.-мат. наук, профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований СПбПУ Бердников Ярослав Александрович.

Профессор ВШФФИ ФизМех,
д. ф.-м. н.

 Я. А. Бердников

Директор ВШФФИ ФизМех
д. ф.-м. н.



В. В. Дубов

