

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Брауна Михаила Александровича 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.

Изучение коллективных явлений в протон-протонных взаимодействиях **весьма актуально** ввиду целого ряда полученных в последнее время неожиданных данных о проявлении в столкновениях мало-нуклонных систем эффектов, сходных с результатами тяжело-ионных столкновений.

Так, помимо наблюдаемого роста выхода странных и мульти-странных частиц с ростом множественности, было обнаружено появление в pp-столкновениях при энергиях Большого адронного коллайдера так называемых дальних быстротных и сильных азимутальных корреляций, характеризующихся ненулевыми значениями соответствующих гармоник разложения поперечного потока. Эффект "рифа" (ridge, в литературе используются также варианты "хребет" или "ближний гребень" -- как в данной диссертации), обнаруженный в измерениях двух-частичных угловых корреляций и проявляющийся в сколламированном по азимутальному углу выходе заряженных частиц на дальних быстротах, вызвал заметный теоретический интерес. обусловленный известными трудностями в описании pp-столкновений для ряда гидродинамических моделей, широко используемых в случае объяснения эффекта "рифа" для ядро-ядерных взаимодействий.

Предсказание и объяснение дальних корреляций в адронных столкновениях было получено ранее в целом ряде теоретических работ, основанных на подходе образования цветных струн и кластеров в результате их слияния, либо на схожей картине образования "трубок" продольных цветковых электрических и магнитных полей в модели "конденсата цветкового стекла". Сложная азимутальная картина, наблюдаемая в экспериментах на LHC по рассеянию протонов, в рамках модели цветных струн была объяснена появлением анизотропии вследствие гашения энергии испускаемых частиц в неоднородных сильных цветковых полях внутри струн и их кластеров.

Попытки описания наблюдаемых явлений азимутальной анизотропии и дальних корреляций предпринимались также и в широко используемом Монте-

Карло генераторе событий PYTHIA, где эффекты коллективности в pp-столкновениях реализовывались либо с помощью механизма перецепления цвета между цветовыми струнами в конечном состоянии (Color Reconnection), либо после введения взаимодействия в виде "расталкивания" струн (PYTHIA shoving). Однако, как следует из совсем свежей статьи коллаборации ALICE (Phys. Rev. Lett. 132, 172302 (2024), DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.172302) до сих пор не удается описать все наблюдаемые явления азимутальной анизотропии в рамках генератора событий PYTHIA или генератора EPOS4, основанного на фрагментации цветowych струн.

Основной целью диссертационной работы Прохоровой Дарьи Сергеевны является разработка нового подхода и численной Монте-Карло модели для описания отмеченных выше коллективных явлений, наблюдаемых в неупругих pp-столкновениях при энергиях ЛНС и сходных с процессами множественного рождения частиц в ядро-ядерных столкновениях. Для достижения этой цели в данной работе использован подход цветных струн, усовершенствованный за счет привлечения новых теоретических идей относительно поведения образовавшихся струн при их взаимодействии.

В работе были сформулированы и поэтапно **выполнены следующие задачи**. (а) -- учет продольной динамики конечных по быстроте цветowych струн и ее влияние на корреляции множественности в разделенных быстротных областях; (б) -- учет поперечной динамики струн и их слияния на корреляционную функцию типа "средний поперечный импульс-множественность"; (в) -- использование сильно интенсивных величин для минимизации тривиальных объемных флуктуаций и для оценки возможности проявления коллективности; (г) -- сравнение результатов с экспериментальными данными.

Дарья Сергеевна Прохорова успешно справилась с решением всего комплекса поставленных задач. Ею была разработана Монте-Карло модель, основанная на формировании в pp-столкновениях конечных цветowych струн по быстроте и учитывающая 3D-динамику их взаимодействия. В результате Дарье Сергеевне удалось получить появление так называемого "ближнего гребня", то есть сколимированного по азимутальному углу и протяженного по псевдобыстроте выхода частиц в двух-частичной корреляционной функции,

наблюдаемого в pp-столкновениях с высокой множественностью при энергиях LHC.

Полученные физические результаты представляют собой эффективную и обоснованную альтернативу механизмам перецепления цвета либо расталкивания струн, реализованным в известном генераторе событий PYTHIA, содержащем десятки свободных параметров.

В работе Прохоровой Д. С. **впервые** выполнено исследование динамики конечных струн и их слияния в ограниченных быстротных областях. **Впервые** исследована их эволюция во времени с учетом их взаимодействия с в рамках трехмерной динамики. **Новизна работы** состоит также в том, что поэтапно совместно учитываются такие эффекты как возникновение потенциала притяжения между цветовыми струнами, временно-пространственная картина слияния струн в кластеры, адронизация последних и взаимодействие частиц-продуктов адронизации струн и струнных кластеров со струнной средой. Обоснованное введение этих механизмов, которые отвечают за перераспределения энергии цветового поля в области взаимодействия, а также и за транспортные свойства образующийся неоднородной по плотности струнной среды, позволяет описать скоррелированный выход частиц и появление дальних азимутальных корреляций.

Научная значимость концепции учета продольной и поперечной динамики конечных по быстроте струн и трехмерной эволюцию струнной плотности, состоит в возможности детальных исследований особенностей коллективных эффектов для взаимодействия малых систем, что позволяет извлекать информацию об источниках множественного рождения частиц и типах их взаимодействий в широком диапазоне энергий.

Практическое применение. Несомненно, что результаты данной работы Д.С. Прохоровой представляют большой интерес для будущего теоретического анализа новых экспериментальных данных по адронным столкновениям при высоких энергиях и будут использованы в исследованиях, ведущихся в научных центрах РФ (ОИЯИ, Новосибирск, ИТЭФ, ИЯИ АН, ПИЯФ и др.) и университетах (МГУ, МИФИ, СПбГУ и НГУ), а также для планирования новых экспериментов на коллайдере NICA (ОИЯИ, Дубна).

Диссертация хорошо оформлена. Все выводы и положения, выносимые на защиту, в основном, убедительно обоснованы. Достоверность результатов в

рамках принятой концепции, не вызывает сомнения, так как разработанные Монте-Карло алгоритмы прошли проверку и сопоставления с имеющимися численными расчетами, выполненными ранее, а также апробацию результатов на международных семинарах и конференциях.

Остановимся на **некоторые замечания** к диссертационной работе:

- 1) В работе используется швингеровское распределение по импульсу частиц, рожденных при фрагментации струн по аналогии с рождением пар во внешнем электрическом поле в КЭД. (J. Schwinger-1951), Лучшее согласие с экспериментом в области не слишком малых импульсов достигается при использовании температурного распределения (A. Bialas). Хотелось бы знать, насколько чувствительны будут полученные теоретические результаты и выводы в случае перехода на температурное распределение.
- 2) В Главе 1 начальное распределение плотности струн по быстрой взято из предположения о равномерном распределении ее концов при обязательном пересечении центра. Оно носит довольно произвольный характер и отличается от реального, учитывающего распределения партонов в снаряде и мишени. Поэтому полученная зависимость коэффициентов корреляции от расстояния между окнами может заметно отличаться от реальной.
- 3) В Главе 2 не учитываются кварк-дикварковые струны. Поэтому полученные результаты носят предварительный характер
- 4) В главе 3 соображения, относящиеся к «бусту», на наш взгляд, плохо обоснованы (и плохо изложены). Непонятно как увеличение кинетической энергии струны согласно уравнению (3.4.1) коррелирует с таким же увеличением согласно уравнению (2.3.1). Появление анизотропии за счет слияния убедительно не объяснено и вызывает серьезные сомнения. Поэтому вклад в анизотропию за счет «буста» мы не можем признать доказанным. Полученные на этом основании результаты, по нашему мнению, сомнительны.

Более мелкие замечания

- 1) В (2.4.1) при переходе от энергии к быстрой не учитываются поперечные импульсы партонов. Для легких кварков они дают главный вклад.

- 2) Что такое масса струны в (3.4.2)? Растет ли она с энергией и убывает ли при этом дополнительный импульс (2.4.2)? Означает ли это, что предполагаемый в диссертации вклад «буста» в асимметрию сильно зависит от энергии?

Указанные замечания не умаляют достоинств представленной диссертации, которая представляет собой законченное научное исследование, обладающее внутренним единством и новизной.

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,
доктор физико-математических наук,
профессор Санкт-Петербургского государственного университета

Браун Михаил Александрович

« 29 » мая 2024 г.

Подпись

Личную подпись
М.А. Брауна
заверяю
О. начальника отдела кадрам
Константинова

04.06.2024

