

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Афонаина Сергея Сергеевича 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.

Диссертационная работа Прохоровой Дарьи Сергеевны посвящена одной из главных нерешенных проблем в физике элементарных частиц – адронизации кварков и глюонов при множественном рождении частиц в процессах сильного взаимодействия. Ввиду отсутствия общепринятой теории конфаймента, для предсказания результатов экспериментов по высокоэнергетическим столкновениям протонов и ядер приходится строить модели, позволяющие анализировать и интерпретировать экспериментальные данные. В качестве основного подхода в работе выбрана определенная модель взаимодействующих цветковых струн. Более конкретно, в работе решалась задача разработки полуфеноменологического подхода и Монте-Карло модели взаимодействующих цветковых струн конечной длины по скорости с целью описания ряда коллективных явлений, наблюдаемых в неупругих  $p+p$  взаимодействиях при энергиях Большого адронного коллайдера. Среди последних – появление дальних корреляций в сочетании с азимутальной анизотропией выходов частиц, наблюдаемых, например, в виде так называемого «ближнего гребня» в двухчастичных корреляционных функциях в  $p+p$  столкновениях с большой множественностью. Такие корреляции, неожиданно обнаруженные в  $p+p$  данных, характерны, в первую очередь, для столкновений ультрарелятивистских тяжелых ядер, где на сегодняшний день мы имеем достаточно хорошо разработанную и общепринятую физическую картину рождения частиц. Это образование и адронизация кварк-глюонной плазмы (КГП) – материи со свойствами почти идеальной жидкости в локальном термодинамическом равновесии, состоящей из сильно связанных кварков и глюонов и находящейся в экстремальном состоянии с высокой температурой и плотностью, превосходящей ядерную. Именно в парадигме образования КГП в  $A+A$  столкновениях широко используется гидродинамический подход для описания наблюдаемых двухчастичных корреляционных функций и гармоник азимутальных потоков. Однако, его применимость для  $p+p$  столкновений не является обоснованной. Поэтому задача описания коллективного поведения в малых сталкивающихся системах, рассматриваемая в диссертационной работе Д.С. Прохоровой в альтернативной модели, не предполагающей рассмотрения гидродинамической эволюции среды, является очень актуальной.

Как уже было упомянуто выше, целью данного теоретического исследования является разработка нового подхода к описанию процессов протон-протонных столкновений при высоких энергиях, основанного на

образовании кварк-глюонных струн конечной длины по быстроте, и учитывающего потенциал притяжения между ними, их 3-хмерное слияние и адронизацию образовавшихся струнных кластеров, а также взаимодействие рожденных частиц с неоднородной по плотности струнной средой. Обоснованием применения полуфеноменологических моделей формирования и адронизации трубок цветового поля, образующегося между цветовыми зарядами в сталкивающихся адронах, является невозможность использовать теорию возмущений в рамках КХД в событиях множественного рождения частиц, в которых доминируют так называемые "мягкие" процессы, идущие с небольшими передачами импульса.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, а также включает 2 приложения, 26 рисунков, список литературы из 162 наименований. Общий объем диссертации – 145 страниц.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы актуальность и теоретическая значимость, сформулированы научные результаты и основные положения, выносимые на защиту.

Далее в главах диссертации последовательно излагаются основные концепции разрабатываемого подхода. Первая глава посвящена описанию разработанной упрощенной модели множественного рождения частиц, в которой рассматриваются слияния струн, конечных по быстроте, и исследуется влияние их образования на традиционно вычисляемую величину коэффициента корреляций множественности  $b_{\text{сорт}}$  и новую переменную - сильно интенсивную величину  $\Sigma$ . Проводится качественное сравнение с экспериментальными данными, удовлетворительный результат которого дает обоснование для дальнейшего развития исследований в этом направлении.

Во второй главе содержится всестороннее развитие первоначально представленной модели: вводится зависимость координат концов струн по быстроте от продольных импульсов партонов, их образующих; рассматривается поперечное притяжение струн, которое формирует нетривиальную струнную плотность в событии, обеспечивая динамическое задание начального пространственного распределения энергии цветового поля; вводится слияние перекрывающихся струн в полученной конфигурации, что меняет характеристики рождения кластерами частиц по сравнению со свободными источниками. Результаты расчетов сравниваются с данными эксперимента ALICE на Большом адронном коллайдере для неупругих  $p+p$  взаимодействий при  $\sqrt{s} = 900$  ГэВ, что позволяет сделать обоснованный вывод о необходимости учета в корреляционном анализе протон-протонных столкновений флуктуаций трехмерной цветовой струнной плотности.

В третьей главе приводится детальное описание итогового формализма этой интересной новой Монте-Карло модели, которая позволяет качественно описать наблюдаемую в эксперименте топологию двухчастичной корреляционной функции в неупругих протон-протонных взаимодействиях, а также предлагает новые механизмы возникновения коллективных азимутальных потоков частиц, возникающих даже в протон-протонных

взаимодействиях во многом благодаря учету слияния струн.

Концептуально новизна подхода Д.С. Прохоровой состоит, во-первых, в рассмотрении более полного сценария формирования струн конечной длины по скорости – как более длинных между валентными кварками и ди-кварками, так и более коротких между морскими. Это уточнение отличает распределение источников частиц в диссертации от часто используемого приближения в подобных струнных моделях, которое полагается на образование бесконечных струн по скорости. Во-вторых, впервые в таком подходе учитывается предложенный в работах [Kalaydzhyan T., Shuryak E., Phys. Rev. C, 90, 2014, 014901] и [Kalaydzhyan T., Shuryak E., Phys. Rev. D, 90, 2014, 025031] притягивающий потенциал между струнами, связанный с предсказанием существования вокруг струны скалярного поля  $\sigma$ -мезонов, сопоставляемого с потенциалом Юкавы в ядерных силах. Учет движения струн, вызванного таким взаимодействием в поперечной плоскости, позволяет задать струнные конфигурации, в которых реализуются сложные степени перекрытий струн. В-третьих, в работе вводятся взаимодействия струн непосредственно перед адронизацией – они характеризуются дополнительным притяжением струн ввиду перераспределения цветовых полей при их перекрытиях. Возникающие импульсы струн передаются частицам, испускаемым струнами, что создает азимутальную анизотропию их распределения. Кроме того, в работе учитывается предложенный ранее в серии работ [Braun M.A., Pajares C., Eur. Phys. J. C71 (2011) 1558] эффект потерь поперечного импульса частицами в цветовой струнной среде вследствие испускания ими глюонов, что также определяет зависимость выходов частиц как от азимутальных углов, так и от скоростных координат.

Технически, новизна подхода, предложенного в диссертации в наиболее полной версии разработанной модели, состоит во введении мелкой решетки в поперечной плоскости, которая позволяет локально учитывать флуктуации плотности струн в областях их трехмерных перекрытий и, соответственно, различать интенсивности цветовых потоков, а значит и характеристики рождения частиц этими малыми областями. Предложенный Д.С. Прохоровой подход представляет собой некоторое обобщение на трехмерный случай концепции частичного перекрытия струн, что соответствует локальному слиянию в работе [Braun M.A., Pajares C., Eur. Phys. J. C16 (2000) 349].

Таким образом, в представленной работе делается интересная попытка описания неупругих протон-протонных взаимодействий при высоких энергиях за счет формирования и развития во времени системы цветовых струн, что отличает данный подход от рассматриваемого обычно статического распределения цветового поля. Результаты расчетов в модели сравниваются с экспериментальными данными, как по скоростным, так и по азимутально-скоростным корреляциям, что вводит ограничения на параметры и механизмы модели.

Наиболее ярким результатом диссертации является качественное описание гармоник эллиптического потока и «ближнего гребня» в

двухчастичных корреляционных функциях в событиях  $p+p$  столкновений с большой множественностью, что положительно отвечает на поставленный вопрос о возможности описания коллективных эффектов в струнной модели без гидродинамических потоков образовавшейся материи, но с учетом неравномерной плотности струн и их различных взаимодействий.

В Заключении диссертации также кратко описаны и другие важные результаты исследований, проведенных в работе. Среди них можно выделить выводы о:

- 1) необходимости учета при анализе корреляций множественности в разделенных быстротных интервалах фона дальних корреляций, зависящего от быстроты и определяемого исключительно флуктуациями числа струн в рассматриваемых быстротных аксептансах;
- 2) важности рассмотрения формирования струн конечной длины по быстроте в качестве альтернативного механизма появления ближних корреляций;
- 3) сильной зависимости ряда корреляционных наблюдаемых от величины времени поперечной эволюции системы струн до адронизации;
- 4) хорошем соответствии экспериментальным данным феноменологических расчетов, приведенных в диссертации и дающих модельный "ближний гребень" в двухчастичной угловой корреляционной функции, который является ярким сигналом коллективности в  $p + p$  столкновениях с высокой множественностью;
- 5) перспективности возможного описания происхождения азимутальных корреляций в  $p+p$  столкновениях в рамках новой физической картины, предложенной в диссертации.

Диссертация очень хорошо оформлена, написана грамотным научным языком. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается проверкой используемых Монте-Карло алгоритмов. В целом, проведенные научные исследования имеют высокую научную ценность.

К некоторым недостаткам работы можно отнести следующее:

- 1) Расчеты флуктуационных наблюдаемых в первой главе произведены для трех классов событий с разным средним числом струн, причем значения выбраны произвольным образом. Было бы желательно провести некое сопоставление с более реалистичным распределением по числу струн, которое использовалось в последующих главах, и оценить, например, каким энергиям столкновения соответствовали бы указанные значения среднего количества струн.
- 2) В Главе 2 хотелось бы выделить два важных, на мой взгляд, результата: во-первых, получены аналитические выражения для флуктуационных наблюдаемых в модели с тремя типами струн, которые позволяют давать трактовку, например, росту сильно-интенсивной величины  $\Sigma$ ; во-вторых, предсказана зависимость сильно-интенсивной величины  $\Sigma$  от выбора класса событий по множественности. Возникает вопрос, возможно ли дать объяснение этому второму результату через первый – то есть можно ли объяснить зависимость от "центральности" в модели с тремя типами струн?
- 3) Взаимодействие цветowych струн моделировалось юкавским потенциалом с сигма-мезоном, по аналогии с межнуклонным потенциалом. Однако известно,

что на больших расстояниях, порядка 2 ферми и больше, межнуклонное притяжение почти полностью определяется пионным обменом. Соответствующий вклад от пионного пропагатора в формуле (2.2.1) отсутствует. В работе не дана физическая мотивация для пренебрежения этим вкладом.

4) После формулы (2.2.1) упомянуто, что эффект притяжения наиболее выражен при высоких плотностях струн и может привести к их схлопыванию в многострунную компактную конфигурацию. Здесь стоит отметить, что для серьезного количественного обсуждения этого вопроса нужно, по-видимому, учесть, что при существенных адронных плотностях, эффективные массы адронов начинают зависеть от самих этих плотностей. Поэтому, строго говоря, эту зависимость нужно учитывать в массе сигма-мезона, присутствующей в (2.2.1). Технически, можно просто подставить эту зависимость из какой-либо известной модели.

Данные замечания никоим образом не умаляют достоинства данной диссертационной работы, которая представляет собой законченное научное исследование, обладающее внутренним единством и содержащее новые результаты, которые имеют важное значение для развития теории сильного взаимодействия и физики элементарных частиц. Результаты диссертации опубликованы в 8 статьях, входящих в международные и российские базы данных, и неоднократно докладывались Д.С. Прохоровой на различных семинарах, школах и международных конференциях (сделано 12 докладов), что демонстрирует личный вклад автора, а также высокий уровень проведенных теоретических исследований.

Диссертация Прохоровой Дарьи Сергеевны на тему: “Начальные конфигурации и слияние цветовых 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.

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

Афонин С.С.

05.06.2024