

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Снигирева Александра Михайловича 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 работе Прохоровой Дарьи Сергеевны впервые предложен и разработан полуженуменологический подход, основанный на образовании в протон-протонных столкновениях при высоких энергиях кварк-глюонных струн конечной длины по быстроте и учитывающий потенциал притяжения между цветковыми струнами и 3-х мерную динамику их слияния, образование струнных кластеров, а также адронизацию и взаимодействие образовавшихся частиц с неоднородной по плотности средой цветковых струн.

**Актуальность темы исследования** коллективных явлений в столкновениях протонов не вызывает сомнений и определяется новейшими экспериментальными результатами, где в протон-протонных столкновениях на коллайдере LHC неожиданно проявился целый ряд коллективных эффектов, характерных в первую очередь для столкновений ультрарелятивистских тяжелых ядер. К ним относятся, в частности, дальние быструнные корреляции в сочетании с азимутальной анизотропией, обнаруженные в двухчастичных корреляционных функциях для  $p+p$  столкновений в экспериментах на LHC. Самыми яркими результатами являются измеренные недавно эллиптический и триангулярный потоки в событиях  $p+p$  столкновений с большой множественностью, а также появление так называемого «ближнего гребня» (ridge) в двухчастичных корреляционных функциях, локализованного по области азимутальных углов вылета частиц и протяженного по псевдобыстроте, что всегда рассматривалось ранее как прерогатива для случая столкновений тяжелых ионов.

**Данное теоретическое исследование нацелено** на разработку Монте-Карло модели взаимодействующих цветковых струн конечной длины по быстроте, которая описывает множественное рождение частиц и коллективные явления, наблюдаемые в неупругих  $p+p$  взаимодействиях. В модели поэтапно рассматривается образование в  $p+p$  столкновениях конфигураций цветковых струн, конечных по быстроте, их взаимодействие и образование струнных кластеров, адронизация струн и кластеров как источников множественного рождения частиц, а также и взаимодействие образовавшихся частиц с неоднородной по плотности средой цветковых струн. Модель хорошо описывает множественное рождение частиц и коллективные явления, наблюдаемые в неупругих  $p+p$  взаимодействиях.

Поскольку множественное рождение частиц и изучаемые коллективные явления относятся к так называемой мягкой области сильного взаимодействия, где доминируют непертурбативные процессы, идущие с малой передачей импульса, то в работе используется полуженуменологическая теория цветковых

(кварк-глюонных) струн, имеющая лишь качественное КХД обоснование. Общая концепция образования в адронных столкновениях кварк-глюонных струн оказалась весьма успешной для объяснения целого ряда экспериментальных результатов и применяется для описания мягких процессов в целом ряде подходов, включая генераторы событий PYTHIA, HIJING, AMPT, EPOS, DIPSY и др.

**Новизна подхода, представленного в диссертации**, определяется тем, что процессы образования конечных по быстроте цветовых струн, слияния струн в кластеры, адронизация и транспортные свойства неоднородной по плотности струнной среды, впервые рассматриваются в динамике. Также впервые предлагается одновременно учесть потенциал притяжения между цветовыми струнами и их слияние, приводящее к бустам рождающихся частиц. При этом отдельно исследуется взаимодействие "частица-струна", так как траектории движения рожденных частиц проходят через неоднородную струнную среду с меняющейся плотностью цветового поля. Подкупающим фактором подхода данной диссертации является прозрачная физическая картина и небольшое количество параметров, что сильно отличает ее от упомянутых выше генераторов событий.

Модель кварк-глюонных струн - неких областей пространства, заполненных сильным цветовым полем и образующихся между партонами сталкивающихся ядер, была предложена достаточно давно (A. Capella, U.P. Sukhatme, C.-I. Tan and J. Tran Thanh Van, 1979; A.V. Kaidalov, 1982). Пионерская гипотеза о возможном взаимодействии между струнами в виде слияния или отталкивания для случая большой плотности цветовых струн в ядро-ядерных столкновениях впервые была выдвинута в работах 1980 г. В.А. Абрамовским и О.В. Канчели. Причем уже тогда было предсказано возможное появление так называемых дальних корреляций в случае пособытийных флуктуаций числа струн, а также появление эллиптического азимутального потока в случае отталкивания кварк-глюонных струн при противоположном направлении хромо-электрического поля во взаимодействующих струнах. Интенсивное развитие идеи взаимодействия кварк-глюонных струн в виде слияния последовало с 1982 года в работах М.А. Брауна, К. Пахареса N. Armesto, E.G. Ferreira. Развитием этих идей явилась модель "цветовых веревок" (T.S. Biro, H.V. Nielsen, J. Knoll, 1984). Теоретическая платформа данной модели была существенно дополнена в последние годы работами В.В. Вечернина, P.C. Колеватова, В. Коваленко, Е. Андропова, С. Белокуровой.

**В состав диссертации Д.С. Прохоровой** входят три основные главы, в которых последовательно излагаются разрабатываемые теоретические концепции: от упрощенной модели взаимодействующих струн, конечных по быстроте, к улучшенной и далее к расширенной модели с бустами частиц. Представленные в диссертации результаты получены на основе большого объема детальных аналитических и Монте-Карло вычислений.

В диссертации во Введении (в параграфе "Степень разработанности темы исследования") на хорошем уровне представлен обзор базовых концепций модели кварк-глюонных струн и их развития. Также подробно проанализированы существующие проблемы исследований корреляций и

флуктуаций множественности и поперечного импульса с учетом не только быстроты, но и азимутального угла вылета частиц.

**Одним из важных результатов**, полученных в диссертационной работе Д.С. Прохоровой в Главе 1, является то, что уже в рамках упрощенной модели взаимодействующих струн, конечных по быстроте, удастся получить поведение коэффициентов корреляции множественности в разделенных быстройных окнах с зазором между ними, которое обычно могло быть получено только при введении в модель ближних корреляций. Таким образом, в работе делается обоснованный вывод о необходимости учета в анализе корреляционных результатов не только ближних корреляций, но и начальных условий -- образования струн конечной (малой) длины по быстроте, которые рассматриваются в предложенной модели, что конкурирует с возможным вкладом от ближних корреляций, ранее показанным в струнных моделях других авторов.

**Из важных результатов** Главы 2 **наибольший интерес представляет** концепция и выбор некоего времени  $\tau$ , до которого следует рассматривать эволюцию системы струн в поперечной плоскости в численных расчетах в модели с трехмерной динамикой струн и последующим слиянием струн для  $p+r$  взаимодействий. Эти расчеты включают в себя процессы "образования струн за счет перецепления цветовых полей между партонами, участвующими во взаимодействии; поперечное притяжение струн; продольную динамику струн; слияние на решетке сегментов струн, перекрывающихся по быстроте; эффективную адронизацию струн в конечные частицы." Убедительно показано, в двух сценариях - 1) условное время (одинаковое для струн во всех событиях) до начала фрагментации,  $\tau = 1.5$  фм, 2) топология системы струн в событии фиксируется в момент некоего времени  $\tau_{\text{deepest}}$ , которое меняется от события к событию и которое необходимо для достижения глобального минимума потенциальной энергии для поперечной конфигурации струн, - что в определении вклада дальних корреляций играет важную роль время трехмерной эволюции струн и соответствующая плотность струн. В частности, наблюдаемый в эксперименте наклон корреляционной функции  $\langle pT \rangle - N$  описывается в режиме с наибольшей степенью перекрытия струн, достигаемой при  $\tau = \tau_{\text{deepest}}$ . Удачно, что выбор времени  $\tau$ , до которого следует рассматривать эволюцию системы струн, рассматривается в диссертации как для случая динамики струн в поперечной плоскости, так и в продольном измерении.

Кроме того, **еще одним важным результатом** является также полученный в Главе 2 эффект влияния процессов слияния цветовых струн на сильно интенсивную величину  $\Sigma[NF, NB]$ . Он, во-первых, подтверждает ранее полученное в работах В.В. Вечернина, Е.В. Андропова, С. Белокуровой указание на чувствительность сильно интенсивных величин к появлению разных источников частиц, во-вторых, дает возможность использования алгоритма, разработанного в диссертации, для описания ядро-ядерных столкновений.

**Дополнительные интересные результаты, которые надо отметить**, получены также в двух последних подразделах Главы 2. Они касаются

сопоставления сильно интенсивной величины  $\Sigma[NF, NB]$  и факториальных кумулянтов, а также условного сходства  $\Sigma[NF, NB]$  и дисперсии пособытийного распределения коэффициента асимметрии для величины  $NF - NB$ . Как написано в работе: "Это позволяет объединить эти величины в семейство мер, устойчивых к тривиальным флуктуациям множественности, и выбрать наиболее удобную для изучения." В диссертации показана аналитическая связь сильно интенсивной величины  $\Sigma[NF, NB]$  с кумулянтами, факториальными кумулянтами и дисперсией распределения коэффициента пособытийной асимметрии  $NF - NB$ . Таким образом, это обеспечивает для многих исследователей возможность более глубокого физического анализа и прямого сопоставления результатов, полученных различными группами с использованием выше названных величин.

И, наконец, **итоговый важный результат развития** новой оригинальной модели, предложенной в диссертации, представлен в Главе 3, где исследуется вопрос о происхождении коллективных азимутальных потоков частиц, наблюдаемых в неупругих протон-протонных взаимодействиях. В рамках усовершенствованной модели с ограниченными по быстроте струнами, учитывающей трехмерную 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, показана возможность описания многих коллективных эффектов, наблюдаемых в протон-протонных взаимодействиях при высоких энергиях. В этой Главе диссертации приводятся результаты успешного описания азимутальной анизотропии, наблюдаемой в неупругих  $p + p$  взаимодействиях при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ.

Диссертация объемом в 145 страниц машинописного текста состоит из введения, 3-х глав и заключения, содержит 26 рисунков и список литературы из 162 наименований. Необходимо отметить отличное оформление диссертации, хороший научный язык автора, полную достоверность полученных результатов и высокую научную ценность всего исследования.

#### **К некоторым недостаткам работы можно отнести следующие:**

1) На Рис. 2.7 приведено "Сравнение результатов моделирования для независимых (свободных) источников частиц (синие линии) и для взаимодействующих струн (красные линии) с данными ALICE [128] (черные квадраты) для неупругих  $p + p$  взаимодействий при  $\sqrt{s} = 900$  ГэВ...", а в тексте далее написано: "Для сравнения, на Рис. 2.7 слева и справа результаты для свободных струн рассчитаны с параметрами, полученными ранее из аппроксимации данных моделью со слиянием струн." Было бы более целесообразно привести эти параметры прямо в подписи к рисунку, либо лучше в отдельной таблице, так как в работе содержится довольно обширный объем различных вычислений и разные варианты расчетов, что затрудняет поиск по тексту.

2) При сопоставлении в разделе 3.7.3 полученных в диссертации модельных результатов величин  $c_2\{2\}$  с экспериментальными результатами ATLAS указывается, что результаты ATLAS могут быть найдены в работе [153], рис.4. Однако, лучше было бы привести для сравнения непосредственно график из

работы ATLAS [153]. Аналогичное замечание относится и к следующей далее в тексте фразе, относящейся к Рис. 3.6 : "все графики на Рис. 3.6 не проявляют зависимости от  $p_{cent\_T}$  в пределах статистических погрешностей в отличие от экспериментальных результатов [155]", где приведена ссылка на еще одну работу коллаборации ATLAS.

Данные замечания, однако, носят дискуссионный характер и никак не умаляют достоинств работы, высокой оценки ее качества и сделанных выводов. Диссертация представляет собой законченное научное исследование, обладающее внутренним единством. Она содержит целый ряд новых интересных научных результатов, которые имеют важное значение для понимания природы коллективных процессов в столкновениях малонуклонных систем и для развития теории взаимодействий элементарных частиц при высоких энергиях.

Представленные в диссертации результаты неоднократно докладывались Д.С.Прохоровой на различных семинарах, школах и международных конференциях (12 докладов) и опубликованы в 8 статьях, входящих в международные базы данных (RSCI, Web of Science and Scopus), что свидетельствует и о личном вкладе автора, и о высоком уровне проведенных 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.

Член диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательского института ядерной  
физики имени Д. В. Скобельцына Московского  
государственного университета имени М. В. Ломоносова,  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

Снигирев Александр Михайлович

« 10 » июня 2024г.



Подпись А.М. Снигирев