

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Токарева Михаила Владимировича на диссертацию Прохоровой Дарьи Сергеевны «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.

Целью данной работы является разработка модели взаимодействующих цветковых струн конечной длины по быстроте, описывающей множественное рождение частиц и коллективные явления (корреляции), наблюдаемые в неупругих $p + p$ взаимодействиях.

Актуальность темы исследования.

Создание и изучение в лабораторных условиях нового состояния ядерной материи – кварк-глюонной плазмы, является приоритетной задачей всех экспериментальных программ по релятивистской физике тяжелых ионов, осуществляемых и планируемых на коллайдерах и ускорителях ЦЕРН (Швейцария), БНЛ (США), ИТИ (Германия), ИФВЭ (Россия) и ОИЯИ (Россия).

Многочисленные результаты по рождению частиц в столкновениях тяжелых ядер, уже полученные на SPS, RHIC и LHC, интерпретируются как возможность образования при определенных начальных условиях нового состояния ядерного вещества, представляющего идеальную жидкость сильно взаимодействующих кварков и глюонов. Оказалось, что при отборе событий с большой множественностью даже в протон-протонных столкновениях на LHC наблюдаются эффекты, свойственные рождению адронов в ядро-ядерных взаимодействиях («ridge effect») на RHIC.

Результаты, полученные на SPS, RHIC и LHC, свидетельствуют о том, что многообразие начальных условий взаимодействия как протонов, так и ядер (энергия и центральность соударения), типов сталкивающихся объектов и регистрируемых частиц (лептонов, струй, мезонов и барионов с различным флейворным составом, ядер, анти-ядер, гиперядер и др.), дают надежду экспериментально установить структуру фазовой диаграммы ядерной материи, определить, в частности, положение критической точки и установить особенности кооперативных взаимодействий кварков и глюонов. В качестве подходящих степеней свободы для описания ядерной среды и множественного рождения частиц используются взаимодействующие цветковые струны и цветковые кластеры.

Предполагается, что в состоянии с наибольшей плотностью ядерной материи флуктуации и корреляции различных наблюдаемых будут теми сигнатурами, которые позволят получить уникальные данные о кварк-глюонных струнах и струнных кластерах. Изучение корреляций с использованием интенсивных и сильно-интенсивных наблюдаемых, минимизирующих вклад тривиальных

“объемных” флуктуаций, дает надежду получить информацию непосредственно о свойствах объектов, образующихся на начальной стадии сильного взаимодействия.

Разработка различных механизмов взаимодействия цветковых струн для описания корреляций частиц при энергиях LHC в процессах с большой множественностью с последующим их включением в Монте-Карло генераторы событий представляется важным и актуальным направлением исследований. Концепция образования цветковых струн между сталкивающимися партонами, фрагментирующимися в наблюдаемые адроны, предложенная в прошлом веке, получила широкое развитие.

В диссертации предлагается расширить механизм взаимодействия цветковых струн за счет включения на начальной стадии столкновения неоднородной среды, состоящей из цветковых струнных кластеров. Учет притяжения струн существенно влияет на поперечное распределение струн, изменяет трехмерную плотность струн в событии и приводит к кластеризации источников частиц. Это дает основу для изучения быстротных и азимутальных корреляций частиц. Источниками азимутальной анизотропии образующихся частиц являются бусты частиц от частично перекрывающихся и сливающихся струн и потери импульса частицами в струнной среде.

Развитие механизма слияния струн с учетом их неоднородного распределения в плоскости прицельного параметра, а также влияния центральности соударения на величину коэффициента корреляции является важной и интересной теоретической задачей, нацеленной на установление динамики образования струнных кластеров в столкновениях протонов и ядер высоких энергий в процессах с большой множественностью. Изучение быстротных и азимутальных корреляций относится к активно развивающейся области физики высоких энергий. Роль данной диссертации состоит в том, чтобы установить возможность описания коллективного поведения в малых сталкивающихся системах за счет учета взаимодействия и слияния цветковых струн без использования гидродинамической фазы.

Таким образом, актуальность выбранной темы исследования, представляющей интерес как для развития теории, так и в экспериментальном изучении состояний ядерной материи, образующейся в релятивистских столкновениях протонов и тяжелых ионов, не вызывает сомнений.

Научная новизна:

1. Предложена многоступенчатая процедура описания взаимодействия конечного числа цветковых струн, образующихся в $p + p$ столкновении, с учетом их поперечной и продольной динамики, а также слияния их в кластеры.
2. Впервые предлагается механизм одновременного учета потенциала притяжения между цветковыми струнами и их слияние, приводящее к бустам частиц и гашению их импульсов в струнной среде.
3. Впервые установлено, что учет притяжения струн в поперечной плоскости, осцилляций конечных по быстроте струн в продольном измерении, взаимодействия струна-струна, которое придает буст частицам, и частица-струна, которое

обеспечивает гашение импульсов частиц в струнной среде, приводят в модели цветowych струн к появлению зависящих от быстроты, вкладов дальних корреляций в корреляционную и флуктуационную меры. В этом состоит существенное отличие от результатов, полученных для дальних корреляций, в моделях с бесконечными струнами по быстроте. В последнем случае требуется явный учет ближних корреляций. Это также относится и к особым вкладам, связанным с появлением азимутальных анизотропий, согласующихся с экспериментальными наблюдениями.

Цели и задачи диссертационной работы.

Целью данной диссертации является разработка модели взаимодействующих цветowych струн конечной длины по быстроте для описания множественного рождения частиц и коллективных явлений, наблюдаемых в неупругих $p + p$ взаимодействиях.

Задачи, решенные в диссертации.

Для достижения целей, поставленных перед автором в диссертационной работе, были решены следующие задачи:

1. Рассмотрена продольная динамика струн, конечных по быстроте, и найдено ее влияние на корреляции множественности в разделенных быстротных областях.
2. Получены аналитические соотношения между сильно интенсивной величиной $\Sigma[N_F, N_B]$, факториальными кумулянтами и коэффициентом асимметрии распределения $N_F - N_B$.
3. Исследовано влияние поперечной динамики струн и их слияния на $\langle p_T \rangle - N$ корреляционную функцию.
4. Оценена возможность проявлений коллективности в поведении сильно интенсивных характеристик в модели со струнными кластерами конечной длины по быстроте и проведено сравнение с экспериментальными данными.
5. Установлена роль двух предложенных механизмов возникновения азимутальной анизотропии частиц в предлагаемой модели: буста частиц от перекрытий и слияния струн и потери частицами импульса в неоднородной струнной среде.

Оформление диссертационной работы. Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из Введения, трех глав, Заключение, двух Приложений и Списка литературы. Диссертация содержит 145 страниц, 26 рисунков. Список литературы включает 162 наименования.

Во **Введении** изложена постановка физической задачи, сформулирована цель данной работы, обоснована актуальность проводимых в рамках данной диссертационной работы исследований, перечислены задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели, сформулирована научная новизна проведенного исследования и практическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения работы, выносимые на защиту, приведены аргументы в пользу достоверности полученных в работе результатов, отмечен личный вклад автора, кратко изложено содержание отдельных частей диссертации.

В первой главе приведено описание упрощенной модели множественного рождения частиц, основанной на концепции формирования, слияния и фрагментации цветковых струн, конечных по быстроте.

В упрощенном варианте предполагается, наличие некоторого количества струн, описываемых распределением Пуассона с заданным средним, не зависящими от энергии столкновения. Быстроты концов струн распределены равномерно в интервале от $-Y$ до Y . Заданные быстротные координаты струны соответствуют ее длине и положению непосредственно перед адронизацией. Струны всегда пересекают область вблизи $y = 0$. Перед распадом на адроны струны, имея конечный размер в поперечном измерении, могут перекрываться и образовывать кластеры.

Для удобства восприятия материала и полноты изложения в работе описан решеточный подход для упрощения вычислений механизма слияния струн. Предполагается равномерное распределение заданного числа струн в поперечной плоскости. Сливаются только те струны, центры которых лежат в одной ячейке сетки, нанесенной на поперечную плоскость. Наряду с перекрытием в поперечной плоскости учитываются перекрытия в пространстве быстрот. Для каждого пересечения струн в проекции на ось быстроты определяется степень перекрытия. Механизм слияния струн изменяет число источников частиц – струнные кластеры становятся «короче» по быстроте по сравнению с независимыми источниками (без слияния). Учет слияния струн создает сложную взаимосвязь между укорачиванием струн по быстроте и увеличением их натяжения.

В работе используется механизм эффективной адронизации струн: каждая струна делится по быстроте на равные части (длины ε), которые испускают частицы независимо друг от друга. Частицам, рожденным из некоторой области струны ε , присваивается быстрота y , которая разыгрывается по распределению Гаусса со средним значением, равным среднему значению этой ε в абсолютных координатах быстроты, и дисперсией, также равной ε . Этим обеспечивается соответствие между координатами быстроты струнного отрезка и быстротами частиц, которые он испускает.

Предполагая постоянство энергии кварк-глюонной струны на единицу длины, считается, что свободная струна в среднем испускает μ_0 заряженных частиц на единицу быстроты. Струнный кластер длиной ε по быстроте, состоящий из k перекрывшихся струн, испускает в среднем μ_k частиц $\mu_k = \mu_0 \varepsilon \sqrt{k}$. Предполагается, что число частиц, испущенных как от одной струны, так и от кластера из k струн, подчиняется распределению Пуассона, но с другим средним для ε интервала. Флуктуации числа струн в событиях, конечность струн по быстроте и 3D слияние, приводят к флуктуациям числа струнных кластеров и степеней их перекрытия с быстротой. Это приводит к модификации итогового распределение частиц по множественности в модели.

В работе представлены предварительные результаты расчетов для коэффициента корреляции и сильно интенсивной переменной, определенных для множественностей, измеренных в быстрой интервалах в передней и задней полусферах в вариантах без и со слиянием струн, и проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными коллаборацией ALICE. Наиболее сильное влияние на коэффициент корреляции от слияния струн наблюдается в области нулевых быстрой. Установлено, что модель с флуктуирующим числом струн дает качественно сходные результаты, что и модель с бесконечными струнами, учитывающей ближние корреляции.

Во второй главе представлено описание улучшенной феноменологической модели множественного рождения частиц цветовыми струнами конечной длины в пространстве быстрой для протон-протонных столкновений. Модель включает продольную динамику осциллирующих цветовых струн, поперечную эволюцию струнной плотности с учетом притяжения струн в каждом событии и слияние струн в динамически определенной конфигурации. Представлен набор параметров модели (средней множественности на единицу быстрой от свободной струны, μ_0 , и среднего поперечного импульса частиц от свободной струны, p_0) и описана процедура их определения из сопоставления с экспериментальными данными. Проведено сравнение результатов Монте-Карло расчетов (быстротного спектра, множественности заряженных частиц, и корреляции между средним поперечным импульсом и множественностью) с данными коллаборации ALICE для неупругих $p+p$ взаимодействий при энергии $\sqrt{s} = 900$ ГэВ.

Сформулирован вывод о влиянии флуктуаций трехмерной цветовой струнной плотности на корреляционные меры.

В работе описана полная цепочка генерации Монте-Карло событий в разработанной более сложной модели цветных струн. Она включает:

1. Определение партонного состава протонов с заранее заданным числом партонов.
2. Формирование числа цветовых струн в событии, соответствующего удвоенному числу померонов.
3. Поперечную динамику системы струн в событии, определяемую притягивающим потенциалом между струнами и приводящую к их кластеризации.
4. Продольную динамику массивных концов струн, нарушающую трансляционную инвариантность в модели.
5. Слияние фрагментов струн с центрами, попадающими в одну поперечную ячейку и перекрывающимися в пространстве быстрой.
6. Эффективную адронизацию струн.

В этой Монте-Карло модели получены результаты по корреляциям и флуктуациям множественности и поперечного импульса в неупругих $p + p$ взаимодействиях при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ и $\sqrt{s} = 900$ ГэВ.

В работе отмечается, что дальние корреляции вводятся в модель естественным образом за счет образования струн конечной длины по быстрой и возникают за счет флуктуаций числа струн, частицы от которых попадают в псевдобыстрые

окна в передней и задней полусферах. Полученные автором результаты согласуются с выводами, сформулированными в рамках упрощенной модели: слияние струн конечных по быстроте уменьшает значения сильно интенсивной меры $\Sigma[N_F, N_B]$ и дает возможность дальнейшего развития модели за счет включения в нее ближних корреляций для описания ядро-ядерных столкновений.

В конце второй главы сформулированы основные выводы, полученные на основе сравнения результатов модели с мировыми экспериментальными данными и результатами исследований в других струнных моделях.

В третьей главе представлено описание расширенной модели взаимодействующих цветковых струн, включающее учет партонного состава протонов, алгоритма моделирования события, учитывающего ограничения на электрический заряд, энергию, флейворный состав струн и продуктов распада, существенную модернизацию 3-D сетки в конфигурационно-импульсном пространстве, рассмотрение поперечной эволюции струнной плотности за счет притяжения струн и учет продольной динамики по быстроте, учитывающей синхронизацию для поперечной и продольной динамики струнной системы в событии, перераспределение потенциальной и кинетической энергии при слиянии струн, рождение частиц из трехмерных ячеек, образованных 2-D пикселем в поперечной плоскости и интервалом по быстроте ϵ_{rap} .

Механизм эффективной адронизации устанавливает связь между средней множественностью адронов и слиянием k струн в 3-D ячейке, что позволяет явно учитывать флуктуации плотности струнной среды. Поперечный импульс частиц, рожденных струной или кластером из k струн, разыгрывается в соответствии со швингеровским механизмом рождения частиц. В модель включены π , K , p и ρ -резонанс.

Модель включает следующие особенности струнного сценария множественного рождения частиц: струны в событии образуют кластеры, распределенные анизотропно, при пересечении струн или кластеров происходит изменение их кинетической энергии, частицы, проходящие через "струнную среду", теряют энергии в виде глюонного излучения.

В развиваемую модель цветковых струн введено скоррелированное азимутальное поведение частиц без гидродинамической фазы. Эта анизотропия начального состояния имеет решающее значение для двух механизмов – поперечной динамики струн, приводящей к образованию струнных кластеров различной степени перекрытия, и продольной динамики, ответственной за флуктуации плотности струн, зависящие от координаты по быстроте.

Изменение кинетической энергии струн происходит при их пересечении в трехмерном пространстве. Буст от струны передается частицам, которые она испускает. Это создает корреляции по поперечному импульсу и азимутальному углу между частицами, образованными из струн, которые взаимодействуют друг с другом.

Различные степени перекрытия струн вызывают вариации в величине потерь энергии и бустов частиц от ячейки к ячейке в пространстве – поперечная плоскость-быстрота. В результате рождение частиц в событии становится сильно асимметричным по азимутальному углу и псевдобыстроте.

В разделе 3.6 описана процедура определения параметров модели – средней множественности частиц, испускаемых трехмерной ячейкой свободной струны, натяжения струны, среднего поперечного импульса частиц, рожденных свободной струной, коэффициента гашения, константы χ , определяющей кинетическую энергию, которую получают i -ая и j -ая струны при перекрытии. Для нахождения значений модельных параметров использовались данные коллаборации ATLAS по неупругим протон-протонным взаимодействиям при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и их сравнение с моделированными распределениям по множественности заряженных частиц, поперечному импульсу, спектру по псевдобыстроте и с корреляционной функцией $\langle p_T \rangle - N_{ch}$.

В разделе 3.7 представлены результаты исследования азимутальных корреляций в модельном описании неупругих $p + p$ взаимодействий при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. В работе изучаются двухчастичные кумулянты, из которых в предположении отсутствия non-flow эффектов, можно извлечь приближенную вторую гармонику эллиптического потока v_2 . Истинная величина v_2 определяется как азимутальная фурье компонента в разложении одночастичного распределения относительно плоскости реакции. Амплитуды асимметрии распределения частиц в поперечной плоскости усредняются по частицам в одном событии. В работе вычисляются кумулянт $c_2\{2\}$ и величина $v_2\{2\}$. Это не требует определения угла плоскости реакции. Последнее является затруднительным в $p+p$ столкновениях из-за малого, по сравнению с ядро-ядерными взаимодействиями, числа частиц в событии и, следовательно, значительно меньшей точности определения плоскости реакции.

Экспериментально установлено, что в $A+A$ столкновениях величина потока зависит от центральности и наибольшее значение асимметрии наблюдалось для полу-периферических событий. Считается, что начальная пространственная анизотропия события переводится термализованной вязкой гидродинамической фазой столкновения в асимметрию импульсов конечных адронов. Большие азимутальные корреляции наблюдались для событий с высокой множественностью в протон-протонных столкновениях коллаборациями CMS и ATLAS на LHC.

В работе используется классификация (ATLAS) событий, основанная на множественности заряженных частиц в определенном аксептансе, как косвенный показатель достигнутой плотности энергии в области взаимодействия. Цель - изучить зависимость величины азимутальных потоков от классов центральности в событиях с разной долей частиц с большими поперечными импульсами.

Результат, полученный в разработанной модели на данном этапе, говорит о том, что хотя учет потерь импульса в струнной среде важен при изучении азимутальных анизотропий рожденных частиц, его оказывается недостаточно для описания «ridge effect». Естественным кандидатом на увеличение сигнала азимутальных

корреляций является введение упомянутого выше буста частиц от движения перекрывающихся струн. Установлено, что в варианте модели с бустом частиц от слившихся струн и потерей импульса частиц в струнной среде на статистике десяти миллионов сгенерированных событий форма корреляционной функции содержит ближний гребень (near-side ridge) при $\Delta\varphi \approx 0$, протянувшийся по всему диапазону $\Delta\eta$. Эта структура создается частицами, испущенными струнными кластерами, которые имеют вытянутую форму по быстроте.

Экспериментально наблюдается еще одна структура в двухчастичной угловой корреляционной функции, называемая дальний гребень (away-side ridge). Она соответствует увеличенному выходу частиц в противоположных азимутальных направлениях ($\Delta\varphi \approx \pi$) при всех возможных $\Delta\eta$. Эта структура обусловлена вкладом от потока частиц и корреляцией, вызванной законом сохранения импульса. Установлено, что в представленном модельном результате дальний гребень отсутствует.

В разделе 3.7.5 представлены и обсуждаются результаты модели для кумулянтов с потерями импульса и бустами частиц. Установлено: гашение импульса частиц и буст частиц приводят к увеличению сигнала азимутального потока при большой множественности; механизм гашения импульсов частиц в струнной среде приводит к увеличению анизотропии для частиц с большими поперечными импульсами; модельные результаты, полученные для двухчастичных кумулянтов второго порядка, находятся в качественном согласии с данными ALICE и ATLAS для неупругих $p+p$ взаимодействий при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.

Практическая значимость.

Результаты, полученные в диссертационной работе, являются важным вкладом в развитие теории множественного рождения частиц в процессах сильного взаимодействия. Показано, что реализуемый методом Монте-Карло механизм множественного рождения в протон-протонных взаимодействиях, основанный на феноменологической модели взаимодействующих цветовых струн конечной длины по быстроте, слияние которых приводит к бустам, испускаемых струнными кластерами частиц, находится в качественном согласии с экспериментальными данными при энергиях ЛНС. Установлено влияние рассмотренных механизмов на корреляционные и флуктуационные меры. Отмечается возможность, в рамках предложенной модели, извлечения из экспериментальных данных информацию об источниках частиц и типах их взаимодействий. Имеются возможности для более детального развития предложенной модели множественного рождения частиц, как для $p+p$, так и для $A+A$ взаимодействий. Полученные в диссертации результаты теоретических исследований могут быть включены в программу специальных дисциплин при подготовке студентов по направлению – «Физика высоких энергий и элементарных частиц, физика высоких энергий» и использованы для проведения расчетов при энергиях коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), что делает ее полезной для планирования исследований.

Достоверность полученных теоретических результатов, представленных

диссертантом, подтверждается совпадением результатов Монте-Карло расчетов с результатами прямых аналитических расчетов и с опубликованными экспериментальными данными. Достоверность результатов диссертации обеспечивается также их публикацией в журналах, рецензируемых ВАК, представлением на международных конференциях, рассмотрением на семинарах Лаборатории физики сверхвысоких энергий и заседаниях кафедры физики высоких энергий и элементарных частиц Санкт-Петербургского государственного университета, высокий профессиональный уровень участников которых в области исследований, проведенной соискателем, хорошо известен как в России, так и за рубежом.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертации докладывались на научных конференциях: XIV Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 2019 (Dubna, Russia); International School of Subnuclear Physics 57th Course "In Search for the Unexpected", 2019 (Erice, Italy); LXIX International Conference "Nucleus-2019": Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies, 2019 (Dubna, Russia); 19 Zimanyi school "Winter workshop on heavy ion physics", 2019 (Budapest, Hungary); LXXI International conference "NUCLEUS – 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", 2021 (SPbSU, Russia); LXXII International conference "NUCLEUS – 2022: Fundamental problems and applications", 2022 (Moscow, Russia); VII International Conference "Models in Quantum Field Theory", 2022 (St.Petersburg, Russia); The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022), 2022 (Dubna, Russia); The 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2022), 2022 (Moscow, Russia); 55th PNPI Winter School, 2023 (Luga, Russia); The 21st Lomonosov Conference on Particle Physics, 2023 (Moscow, Russia); The XXVth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", 2023 (Dubna, Russia), а также на семинарах Лаборатории физики сверхвысоких энергий и заседаниях кафедры физики высоких энергий и элементарных частиц Санкт-Петербургского государственного университета.

Личный вклад автора.

Все основные результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации представлены в 8 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК РФ и/или входящих в базы данных РИНЦ, Web of Science и Scopus.

В **Заключении** диссертации перечислены основные результаты работы и сформулированы наиболее значимые положения, выносимые на защиту, проведено сравнение предлагаемой модели множественного образования адронов с широко используемыми в физике высоких энергий генераторами событий EPOS4 и PYTHIA, также использующих механизм фрагментации цветных струн.

Положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что продольная динамика цветных струн конечной длины по быстроте,

образующихся в $p + p$ столкновениях при высоких энергиях, меняет конфигурацию плотности струн и вносит зависящий от быстроты фоновый вклад в коэффициент корреляции множественности $b_{\text{corr}}[N_F, N_B]$ и в сильно интенсивную переменную $\Sigma[N_F, N_B]$, которые измерены в разнесенных быструтных интервалах F и B.

2. Показано, что $\Sigma[N_F, N_B]$, кумулянты, факториальные кумулянты и коэффициент асимметрии распределения $N_F - N_B$ образуют семейство величин, устойчивых к тривиальным флуктуациям. Коэффициент корреляции множественности дает дополнительную информацию о скоррелированном рождении частиц.

3. Показано, что поперечная динамика струн с учетом их притяжения и образование струнных кластеров в результате слияния формируют основу механизма, описывающего поведение корреляционной функции $\langle p_T \rangle - N$, наблюдаемой в $p + p$ взаимодействиях при высоких энергиях.

4. Показано, что в отличие от свободных цветных струн, учет кластеризации струн, ограниченных по быстроте, и их слияния существенно меняет значения корреляционных мер: уменьшает величины $b_{\text{corr}}[N_F, N_B]$ и $\Sigma[N_F, N_B]$ и увеличивает значения $\Sigma[P_T, N]$ и $\Delta[P_T, N]$. Результаты, полученные в рамках данного нового подхода для $p + p$ столкновений при высоких энергиях, находятся в качественном согласии с экспериментальными результатами, что делает его альтернативой механизму перецепления цвета, реализованному в генераторе событий PYTHIA.

5. Показано, что коллимированный по азимутальному углу и протяженный по псевдобыстроте выход частиц, наблюдаемый в двухчастичной корреляционной функции в $p + p$ событиях с высокой множественностью при высоких энергиях, может быть описан с помощью механизма слияния струн как источника буста частиц и гашения их импульсов за счет взаимодействия со струнной средой.

Замечания по работе:

1. В диссертации отмечается (стр. 63), что механизм слияния обеспечивает, в частности, корреляцию среднего поперечного импульса и множественности. В какой степени спектры по поперечному импульсу для различных классов по множественности дадут ограничение на механизм взаимодействия струн?
2. В протон-протонных столкновениях распределения пионов по множественности при импульсе протонов в л.с. 50 ГэВ были измерены на U70 (SVD-2), а распределения по множественности и по поперечному импульсу заряженных адронов при энергии в с.д.м. 200 ГэВ – на RHIC (STAR). Как скажется сканирование по энергии на струнный сценарий множественного рождения?
3. Будет ли критичным для поиска сигнатуры фазового перехода в столкновениях протонов или ядер выбор струн или струнных кластеров, обогащенных определенным флейвором, например, странным?

В тексте диссертации присутствуют стилистические неточности и жаргонные выражения (на стр. 7 – «свежие» экспериментальные результаты, на стр. 40 – «неиспорченными» PDFs, на стр. 44 – «массу глюонного облака», на стр. 22 – повторяемость текста - пункты 1–9 за исключением п.3).

Заключение.

Указанные замечания не уменьшают общую положительную оценку диссертационной работы.

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,
старший научный сотрудник

Токарев Михаил Владимирович
Начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий
Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Московская область,
г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6
Телефон: +7 (49621) 65-059
E-mail: tokarev@jinr.ru

