

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Арбузова Андрея Борисовича
на диссертацию Егорова Анатолия Юрьевича на тему
«Поиск эффектов БФКЛ эволюции при образовании пар адронных струй с большим разделением по быстроте при энергиях Большого адронного коллайдера», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Диссертационная работа Егорова А.Ю. посвящена теоретическому и экспериментальному поиску эффектов эволюции Балицкого-Фадинова-Кураева-Липатова (БФКЛ) в процессах образования пар адронных струй с большим разделением по быстроте при ТэВ-ных энергиях в системе центра масс сталкивающихся адронов, а также развитию методов вычислений сечений таких процессов с учетом экспериментальных отборов (вето) по поперечному импульсу на дополнительные струи в рамках квантовой хромодинамики (КХД). В настоящее время для расчетов процессов в рамках Стандартной модели и за ее пределами при поиске новой физики в основном используется асимптотика КХД с жестким режимом, в котором доминирует эволюция Грибова-Липатова-Альтаралли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД). Ожидается, что при дальнейшем увеличении энергии столкновений и расширении изучаемой области кинематики эволюция ГЛАПД будет заменена эволюцией БФКЛ, которая доминирует в так называемом полужестком режиме высокой энергии. Таким образом поиск проявлений эволюции БФКЛ является **актуальной** задачей в физике высоких энергий. Разработанные методы вычислений в рамках эволюции БФКЛ могут быть в дальнейшем использованы при вычислениях в рамках Стандартной модели и за ее пределами при интерпретации результатов поисков новой физики на коллайдерах. Актуальность данного направления исследований также связана с непрерывным поступлением данных экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК).

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 164 страницы, включая 37 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 132 наименования.

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

В **первой главе** дана краткая характеристика эволюций ГЛАПД и БФКЛ с описанием конечного состояния характерного для каждой из них. Описаны наблюдаемые, используемые для поиска сигналов эволюции БФКЛ в адронных столкновениях. Также описаны Монте-Карло (МК) программные пакеты, позволяющие моделировать протон-протонные взаимодействия, как на основе ГЛАПД, так и БФКЛ эволюции. Кратко сформулированы основные результаты предыдущих поисков сигналов БФКЛ. Описаны наблюдаемые, используемые в работе.

33-06-245 от 06.03.2024

Во **второй главе** дано описание экспериментальной установки. Дана краткая характеристика пучков, поставляемых БАК, а также описание важных для работы подсистем детектора CMS. Приведено описание алгоритмов, использованных для восстановления событий, а также описание триггерной системы.

В **третьей главе** описана разработанная автором методика измерения инклюзивных дифференциальных сечений рождения пар адронных струй, а также отношений инклюзивных сечений к сечениям с введённым экспериментальным отбором вето, как функций разделения по быстрой Δy . Методика измерения включает: отбор событий с помощью триггеров высокого уровня (HLT); изучение эффективности триггеров; объединение выборок, записанных разными HLT; измерение наблюдаемых на детекторном уровне; изучение и устранение детекторных искажений; изучение и оценка систематических неопределенностей.

Детекторные искажения изучены на основе МК моделирования. Моделирование событий на уровне стабильных частиц осуществлено с помощью МК генераторов PYTHIA8 и HERWIG++. Моделирование детектора осуществлено в программном пакете GEANT. Рассмотрен широкий спектр методов обратной свертки для устранения детекторных искажений и проведен анализ их применимости с выбором оптимального метода. Рассмотрены следующие методы: поправочных коэффициентов; обращения матрицы миграции; метод максимального правдоподобия с регуляризацией Тихонова; метод, основанный на сингулярном разложении матрицы миграции; метод итераций Д'Агостини.

Систематические неопределенности включают: неопределенность поправок коррекции струй по энергии; неопределенность поправок разрешения струй по энергии для МК моделирования, которое используется при изучении и устранении детекторных искажений; неопределенность, связанная с выбором МК моделей для устранения детекторных искажений; неопределенность измерения светимости; неопределенность измерений партонных функций распределения в используемых МК моделях; неопределенность, связанная с выбором ренормализационного и факторизационного масштабов в используемых МК моделях; неопределенность, связанная с ограниченной МК статистикой; неопределенность в определении триггерной неэффективности; неопределенность, связанная с наложением протон-протонных столкновений.

Проведено сравнения полученных результатов измерения с предсказаниями основанных на ГЛАПД МК генераторов PYTHIA8 и HERWIG, использующих главный порядок теории возмущений для расчета партон-партонного подпроцесса и главное логарифмическое приближение для моделирования партонного ливня, POWHEG (следующий за главным порядком теории возмущений для партон-партонного подпроцесса), а также БФКЛ генератора HEJ+ARIADNE. Показано, что ни один генератор не описывает всю совокупность измеренных данных. Измеренные инклюзивные сечения $d\sigma^{incl}/d\Delta y$ и $d\sigma^{MN}/d\Delta y$ быстро падают с увеличением интервала быстрой. Падение быстрее чем описывается генераторами, что связано с ограничением фазового пространства, которое плохо учитывается в главных логарифмических приближениях, разработанных для бесконечной энергии. Отношения сечений R^{incl} , R^{MN} , R_{veto}^{incl} , R_{veto}^{MN} растут с увеличением Δy , что связано с увеличением фазового пространства для упорядоченного по быстрой излучения, как ожидается при эволюции БФКЛ. При самых больших Δy рост сменяется падением, что

связано с кинематическими ограничениями на излучение струй дополнительных к паре. Показана нестабильность поправок на цветовую когерентность в ГЛАПД генераторах. Проведено сравнение с предыдущими измерениями для R^{incl} , R^{MN} при 7 ТэВ. Важно, что после проведенного сравнения теоретических предсказаний, полученных с помощью разных Монте-Карло генераторов, с экспериментальными данным делается анализ возможных причин этих расхождений.

В **четвертой главе** представлено первое сравнение расчета, выполненного в следующем за главным логарифмическим приближении (СГЛП) БФКЛ и измеренным сечением Мюллера-Навеле (МН), $d\sigma^{MN}/d\Delta y$, в протон-протонных столкновениях при энергии 2.76 ТэВ. Расчет в рамках СГЛП БФКЛ выполнен с использованием процедуры Бродского-Фадина-Кима-Липатова-Пивоварова (БФКЛП) для устранения неоднозначности в выборе схемы и масштаба ультрафиолетовой перенормировки. Процедура БФКЛП по сути является обобщением процедуры Бродского-Лепаж-Маккензи (БЛМ) на неабелев случай. Выполнена оценка теоретических неопределенностей расчета. Показано, что результаты СГЛП БФКЛ расчета находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, измерение которых представлено в третьей главе. Все остальные расчеты переоценивают сечение при больших Δy . Таким образом получено новое сильное указание на проявление эволюции БФКЛ в рассмотренной кинематической области. Представлены теоретические предсказания для МН сечения при энергиях столкновения 8 и 13 ТэВ. Также показано, что отношение МН сечений при разных энергиях является наблюдаемой чувствительной к проявлениям эффектов БФКЛ. Представленные теоретические предсказания могут быть проверены на LHC.

В **пятой главе** развита методика учета условия вето на дополнительные адронные струи на основе уравнения эволюции Банфи-Маркезини-Смая (БМС). В эволюции БМС учитывается излучение цветовыми диполями мягких глюонов на большой угол, при этом суммируются вклады логарифмов двух типов: Судаковские логарифмы, которые учитывают нарушение вето первично излученными глюонами; неглобальные логарифмы, которые учитывают нарушение вето от вторичных глюонов. Следует отметить, что в БМС уравнении излучение оказывается упорядоченным по поперечному импульсу, хотя присутствует цветовая когерентность.

В главе приводится обобщение процедуры, использованной ранее для межструйного вето, когда условие вето наложено на дополнительные струи в интервале быстроты между струями в паре, на случай, когда условие вето наложено во всем интервале быстроты - струйное вето.

Рассматривается несколько подходов к вычислению струйного вето. В упрощенном подходе пренебрегается возможной корреляцией излучения в различные области по быстроте. В таком подходе весь интервал быстроты разбивается на области, а вероятность не нарушить вето - есть произведение вероятностей не нарушить вето в каждой области. Упрощенный подход рассмотрен как для полной БМС эволюции, так и только для судаковских логарифмов. Для учета возможной корреляции излучения в различные области быстроты реализован МК алгоритм. Показано, что в алгоритме присутствует дополнительная корреляция между масштабом и углом излучения, которой не было в оригинальной БМС эволюции. Рассмотрен вариант МК алгоритма без дополнительной корреляции.

Результаты расчетов сравниваются с результатами измерений R^{incl} в протон-протонных столкновениях при 7 ТэВ. Показано, что в случае больших быстрот, в БМС эволюции необходим учет законов сохранения энергии импульса. Рассмотрена упрощенная модель, частично учитывающая закон сохранения энергии-импульса, демонстрирующая правильную динамику.

Представлена разработанная методика вычисления отношений с вето, R^{MN} и R_{veto}^{MN} , на основе СГЛП БФКЛ+БМС приближения. В этом приближении партонный подпроцесс рассчитывается в рамках СГЛП БФКЛ, а условие вето учитывается с помощью БМС уравнения. Рассмотрена модернизация метода позволяющая избежать двойного учета излучения от цветового октета. Показано, что без модернизации БМС эволюция сильно переоценивает влияние условия вето по сравнению с результатами измерения.

Показано, что цветовая когерентность меняет поведение отношений сечений с вето, R^{incl} и R^{MN} для ГЛАПД партонного ливня. Без цветовой когерентности ГЛАПД эволюция предсказывает падение R^{incl} и R^{MN} с увеличением Δu , в то время как включение цветовой когерентности приводит к росту отношений с Δu . В то же время показана сильная зависимость от модели реализации цветовой когерентности при больших Δu . Все наблюдения указывают на необходимость учета струйного вета на основе БФКЛ эволюции, как формализма, последовательно учитывающего главные вклады при больших Δu .

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

Диссертация написана достаточно подробно с приведением всех необходимых формул, деталей вычислений и экспериментальных измерений обсуждаемых наблюдаемых величин. По содержанию диссертации есть следующие **замечания**.

1. В целом диссертация написана ясно и грамотно, но в тексте присутствует некоторое количество опечаток и неточностей, например, в конце второй строки формулы (2) на стр. 8 пропущен знак дифференциала; на стр. 13 в пункте 3 основных положений, выносимых на защиту, в предложении «Падение быстрее...» пропущены глагол и запятая; довольно часто использовавшееся слово «Борновский», следовало писать со строчной буквы; в правых частях формул (1.1) пропущены скобки и не указан аргумент α_s .

2. На стр. 18 во втором абзаце обсуждается логарифмическая зависимость подпроцессов партонного расщепления и в качестве аргумента логарифма ставится размерная величина Q^2 . Следовало объяснить, как происходит обезразмеривание этого аргумента.

3. В третьей строке на стр. 19 говорится, что буквой μ обозначен масштаб, но не уточняется какой.

4. В четвертой главе при численном анализе эффектов БФКЛ в следующем за главным логарифмическом приближении использовались партонные функции распределения (PDF), полученные с помощью уравнений ГЛАПД в следующем за ведущим приближении (NLO). Последнее не совпадает с тем приближением, что делается в БФКЛ. Обоснование выбора NLO функций PDF и оценки соответствующей неопределенности при этом не приведено.

Тем не менее, указанные замечания никоим образом не снижают общую научную ценность работы, достоверность и важность полученных автором результатов.

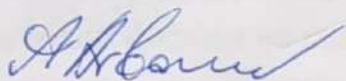
Диссертация Егорова А. Ю. представляет законченное научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне. Результаты диссертации являются новыми и оригинальными, с достаточной полнотой опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах, неоднократно апробировались на международных и российских рабочих совещаниях и конференциях. Вклад автора является определяющим в результатах работ, составляющих основу диссертации. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам.

Диссертация Егорова Анатолия Юрьевича на тему: «Поиск эффектов БФКЛ эволюции при образовании пар адронных струй с большим разделением по скорости при энергиях Большого адронного коллайдера» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Егоров Анатолий Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий». Нарушений пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружено.

Член диссертационного совета

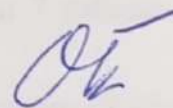
доктор физико-математических наук, профессор РАН, начальник сектора № 5 Научного отдела теории фундаментальных взаимодействий Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Арбузов Андрей Борисович



04.03.2024

Подпись сотрудника Лаборатории теоретической физики ОИЯИ А.Б. Арбузова удостоверяю:
заместитель директора ЛТФ ОИЯИ



О.В. Теряев

