

ОТЗЫВ

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

Диссертационная работа Егорова А.Ю. посвящена поиску эффектов эволюции Балицкого-Фадиана-Кураева-Липатова в событиях рождения пар адронных струй в протон-протонных столкновениях при энергиях Большого Адронного Коллайдера (БАК). Данная эволюция должна стать доминирующей в полужестком режиме высокой энергии. Таким образом поправки квантовой хромодинамики (КХД) должны будут учитываться в соответствии с этой эволюцией при интерпретации результатов экспериментов на существующих и будущих коллайдерах адронов. В настоящее время при поиске новой физики на адронных коллайдерах КХД излучение в основном учитывается на основе другой высокоэнергетической асимптотики, а именно эволюции Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД). Правильный учет КХД поправок при поиске новой физики может существенно повлиять на интерпретацию результатов измерения. Поэтому поиск эффектов эволюции БФКЛ является весьма актуальной задачей.

Поиски сигналов эволюции БФКЛ уже осуществлялись в экспериментах на коллайдерах HERA, Tevatron, LEP, БАК. Однако результаты поисков по-прежнему остаются неоднозначными. Одной из трудностей при поиске сигналов эволюции БФКЛ является то, что для сравнения с результатами эксперимента необходимы расчеты с учетом следующего после главного порядка логарифмического приближения (СГЛП). Методы расчета с учетом СГЛП БФКЛ крайне трудоемки и развиты не для всех измеряемых на эксперименте наблюдаемых. Программа поиска сигналов эволюции БФКЛ может развиваться по нескольким направлениям. Со стороны эксперимента важно измерение существующих наблюдаемых, чувствительных к эффектам БФКЛ, при всех доступных энергиях и скоростях, что позволит отделить эффекты БФКЛ эволюции от эволюции ГЛАПД, которая обычно проводится с учетом поправок на цветовую когерентность. Со стороны теории необходима как развитие методов расчета с учетом СГЛП БФКЛ для измеряемых наблюдаемых, а так и разработка новых наблюдаемых, чувствительных к сигналам эволюции БФКЛ.

Диссертационная работа представляет результаты экспериментальных измерений и глубокий феноменологический анализ проведенных измерений. Так впервые представлены результаты измерений инклюзивных сечений и сечений Мюллера-Навелле (МН) рождения пар адронных струй в зависимости от интервала скорости между струями (Δy) в протон-протонных столкновениях при энергии 2.76 ТэВ в эксперименте CMS на БАК. А так же отношения этих сечений к сечениям с введенным вето отбором. Проведено сравнение экспериментальных результатов с предсказаниями широкого спектра монтекарловских моделей, основанных как на эволюции БФКЛ так и на эволюции ГЛАПД. Так же представлены результаты расчетов на основе аналитических выражений с учетом СГЛП БФКЛ для сечения рождения пар МН. Показано, что учет следующего порядка при

вычислении сечений МН значительно улучшает согласие с результатами измерений. Это свидетельствует о проявлении эволюции БФКЛ для полужестких процессов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем 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 рассматриваются асимптотические режимы КХД. Проводится сравнение режимов ГЛАПД и БФКЛ. Описаны характерные конечные состояния, возникающие в результате эволюций ГЛАПД и БФКЛ, что важно для построения наблюдаемых для поиска сигналов эволюции БФКЛ. Далее описаны наблюдаемые, используемые для поиска сигналов эволюции БФКЛ на коллайдерах. Внимание уделяется процессам рождения пар адронных струй с большим разделением по быстрой. Обосновывается выбор наблюдаемых для измерения в настоящей работе. Дано краткое описание МК генераторов событий, основанных на моделировании партонных ливней в рамках эволюций ГЛАПД и БФКЛ. Представлен краткий обзор результатов предыдущих поисков сигналов эволюции БФКЛ на коллайдерах HERA, Tevatron, LEP, LHC.

Во второй главе представлено описание экспериментальной установки - детектора CMS. Особое внимание уделено описанию подсистем, важных для выполненного измерения и понимания третьей главы диссертаций.

В третьей главе приводится описание методики измерения дифференциальных сечений рождения пар адронных струй и отношений сечений с вето. Методика включает отбор событий рождения пар адронных струй с помощью триггеров. Объединение выборок, записанных разными триггерами. Изучение эффективностей триггеров, и влияния неэффективности триггеров на измерения. Изучение детекторных искажений, вызванных ограниченной разрешающей способностью детектора по поперечному импульсу и быстрой струй. Оценку влияния наложения протон-протонных столкновений, и оценку систематических неопределенностей измерения. Подробно описываются части методики, в которые автор внес определяющий вклад.

Представлены результаты измерения в сравнении с предсказаниями МК генераторов PYTHIA8, HERWIG, POWHEG (ГЛАПД); и генератора HEJ+ARIADNE (БФКЛ). Ни один из использованных МК генераторов не описывает все измеренные наблюдаемые. Все генераторы переоценивают дифференциальные сечения при больших значениях Δy . Отношения сечений R^{incl} , R^{MN} , R_{veto}^{incl} и R_{veto}^{MN} растут с увеличением интервала быстрой, из-за увеличения фазового пространства для упорядоченного по быстрой излучения, как и ожидается в соответствии с эволюцией БФКЛ, однако цветовая когерентность, реализованная в генераторах PYTHIA8 и HERWIG, затрудняет окончательную интерпретацию результатов. Представлено также сравнение отношений сечений R^{incl} , R^{MN} измеренных при разных энергиях 2.76 и 7 ТэВ. Наблюдение

энергетической зависимости этих наблюдаемых важно, так как эволюции ГЛАПД и БФКЛ имеют разную энергетическую и быструю зависимость.

Четвертая глава подробно описывает метод аналитического расчета с учетом СГЛП БФКЛ для дифференциального сечения рождения пар адронных струй МН. Важной составляющей расчета является использование процедуры выбора схемы и масштаба ультрафиолетовой перенормировки, разработанной в работах Бродского-Фадинова-Кима-Липатова-Пивоварова. Выполнена оценка систематических теоретических неопределенностей в расчете. Также представлены результаты аналитических расчетов на основе Борновского приближения и ГЛП БФКЛ. Сравнение с результатами измерения показывает согласие расчета с учетом СГЛП БФКЛ с экспериментальными данными, в то время как все остальные расчеты сильно переоценивают результаты измерения при больших Δy . Это является подтверждением проявления эффектов эволюции БФКЛ. Также предложено измерение отношений сечений рождения пар МН при разных энергиях системы центра масс. Показана чувствительность этих отношений к эффектам эволюции БФКЛ.

Пятая глава посвящена разработке методики вычисления влияния условия вето по поперечному импульсу дополнительных струй на инклюзивные сечения. На настоящий момент не существует методики учета вето основанной на эволюции БФКЛ, поэтому используется другая эволюция, а именно эволюция Банфи-Маркезини-Смая (БМС). Расчеты, основанные на использовании уравнения БМС ранее показывали хорошее согласие с наблюдаемыми, предназначенными для поиска сигналов БФКЛ. В то же время БМС эволюция является вариантом упорядоченного по поперечному импульсу партонного ливня с учетом цветовой когерентности. То есть эволюция БМС ближе к RYTHIA8 и HERWIG. С физической точки зрения изучение границ применимости цветовой когерентности так же представляет существенный интерес.

Результаты расчета показали, что эволюция БМС предсказывает недостаточно сильное излучение в случае, когда порог вето равен минимальному поперечному импульсу, то есть, когда недостаточно фазового пространства для развития партонного каскада, упорядоченного по поперечному импульсу. Показано, что БМС эволюция имеет более слабую зависимость от энергии столкновения, чем наблюдаемая в экспериментальных данных. Так же показана сильная зависимость результатов от реализации цветовой когерентности при больших Δy . Все это косвенно свидетельствует в пользу эволюции БФКЛ как формализма, последовательно учитывающего главные вклады при больших Δy .

В заключении кратко описаны основные результаты и выводы исследования.

В целом диссертация производит очень хорошее впечатление. Она написана ясным научным языком, содержит достаточно полное введение в предмет. Изучаемые проблемы анализируются глубоко и тщательно. Диссертантом получен целый ряд новых результатов мирового уровня. Особо можно упомянуть следующие достижения.

Путем сравнения результатов измерений инклюзивных сечений рождения пар адронных струй в зависимости от интервала скорости между струями и их отношений с наложением различных дополнительных условий показано, что для изучаемых

полужестких процессов наилучшее объяснение достигается с использованием СГЛП БФКЛ, как и нужно было ожидать из общих соображений. Причем учет следующего порядка по главным логарифмам в данном случае играет решающую роль, поскольку именно он значительно улучшает согласие с результатами измерений, по сравнению с эволюцией ГЛАПД с учетом поправок на цветовую когерентность.

Особо следует отметить, что диссертантом были проведены как теоретические расчеты этих процессов в рамках СГЛП БФКЛ, так и получение экспериментальных данных по их сечениям на основе анализа данных в эксперименте CMS по pp столкновениям при энергии 2.76 ТэВ на БАК. Причем как теоретически, так и экспериментально были получены новые результаты мирового уровня, что доказывалось их публикацией в ведущих физических журналах Phys. Rev. D. и JHEP, соответственно.

К недочетам работы следует отнести не всегда удачное изложение некоторых вопросов. Так на стр.116 в пояснении к Рисунку 5.2 партоны и "протонные остатки" нумеруются цифрами, которых нет на самом рисунке, поэтому трудно следить за приведенными рассуждениями. На стр.125 и на Рисунке 5.3 исключение области малых углов делается путем наложения условий на косинус (c_{max}) соответствующего угла, что приводит к неэстетичным условиям $c_{max}=0,9999$ и $c_{max}=0,999999$.

К более общим замечаниям можно отнести то, что утверждение "Ожидается, что с увеличением энергии в системе центра масс сталкивающихся адронов, источником сильного взаимодействия будут процессы рассеяния кварков и глюонов в высокоэнергетическом полужестком режиме КХД" является спорным. Возможно, что с увеличением энергии по-прежнему доминирующую долю в полном сечении pp взаимодействия будут играть не полужесткие, а мягкие процессы с передачами импульсов порядка или меньше Λ_{QCD} . В таких процессах не происходит прямого взаимодействия валентных партонов, а имеет место только перецепление цветовых потоков между партонами сталкивающихся нуклонов, с образованием кварк-глюонных струн, понимаемых как трубки цветового потока. Именно такая пространственно-временная интерпретация была дана А.Б. Кайдаловым рассеянному померону (как цилиндрической структуре, введенной в работах G. 't Hooft и G. Veneziano).

С этой точки зрения применение расчетов в рамках полужесткого приближения для нахождения интерсепта мягкого классического померона, о которых идет речь на стр.99-100 диссертации, представляются не совсем обоснованными, поскольку условие, что переданные импульсы много больше Λ_{QCD} , в этом случае не выполнено. Хотя изложенная здесь схема Бродского–Фадина–Кима–Липатова–Пивоварова (БФКЛП), позволяющая получить разумные значения интерсепта 1.13-1.18 для мягкого померона представляет несомненный интерес. Разделение конформной и неконформной части и использование бегущей константы связи для обнуления неконформных вкладов, делает результаты расчетов в полужестком приближении нечувствительным к степени жесткости подпроцесса в широком диапазоне $Q = 1 \div 100$ ГэВ. Однако, видимо, все таки строго доказать, что этот результат будет справедлив и для мягких процессов с $Q < 1$ вряд ли возможно.

Данные замечания никоим образом не умаляют достоинств диссертационной работы, которая представляет собой цельное законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне, содержащее новые результаты, имеющие важное значение для развития физики элементарных частиц. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в шести статьях в журналах, индексируемых в международных и российских базах данных, и неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях, что доказывает высокий уровень проведенных экспериментальных и теоретических исследований.

Диссертация Егорова Анатолия Юрьевича на тему: «Поиск эффектов БФКЛ эволюции при образовании пар адронных струй с большим разделением по быстрой 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 обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
профессор, Санкт-Петербургский
государственный университет

Вечернин

Вечернин В.В.

11.03.2024