

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Афони́на Серге́я Серге́евича
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 специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Как известно, основной задачей планируемой работы Большого Адронного Коллайдера в ЦЕРНе является поиск новой физики за пределами Стандартной Модели. Чтобы иметь возможность засечь возможные тонкие эффекты, вызванные этой новой физикой, принципиально важно уметь детально анализировать сложные явления, возникающие в результате ультрарелятивистских столкновений элементарных частиц, чтобы корректно интерпретировать получаемые экспериментальные данные. Именно в этом русле проводились исследования, изложенные в диссертационной работе Егорова А.Ю.

Представленная диссертация посвящена поиску проявлений асимптотического высокоэнергетического полужесткого режима квантовой хромодинамики (КХД). Имеется ввиду высокоэнергетический режим сильного взаимодействия, в котором отношение энергии адронных столкновений к величине переданного импульса не фиксировано, однако модуль переданного импульса, хотя и остается конечным, но многократно превосходит характерный масштаб низкоэнергетических сильных взаимодействий, порядка 200 МэВ. Это означает, что взаимодействие происходит на расстояниях гораздо, меньших 1 Ферми, что, в свою очередь, позволяет использовать методы теории возмущений в силу асимптотической свободы КХД. Важность рассмотренной задачи обусловлена тем, что данный режим может стать доминирующим в будущих коллайдерных экспериментах. С теоретической стороны известно, что в таком полужестком режиме КХД излучение должно происходить в соответствии с так называемым уравнением эволюции Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (БФКЛ). В настоящее время при поиске новой физики на адронных коллайдерах КХД излучение в основном учитывается на основе другой высокоэнергетической асимптотики, называемой жестким режимом, а именно когда отношение энергии адронных столкновений к величине переданного импульса строго фиксировано, то есть переданный импульс линейно растет с энергией столкновений. Такой режим описывается уравнением эволюции Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД), которое показывает эволюцию партонных распределений при изменении жесткого параметра. Правильный учет КХД поправок при поиске новой физики может существенно повлиять на интерпретацию результатов измерений. Поиск эффектов эволюции БФКЛ является, таким образом, **актуальной** задачей.

В представленной диссертационной работе впервые измерены инклюзивные и Мюллера-Навеле (МН) дифференциальные сечения, а также отношения инклюзивных дифференциальных сечений к сечениям с вето. Вето в данном случае обозначает экспериментальный отбор событий, в которых помимо основной пары струй отсутствуют дополнительные струи с поперечным импульсом выше порога вето. С другой стороны в

диссертации также представлено развитие теоретических методов вычисления процессов с наложенным условием вето. Таким образом работа представляет собой объединение экспериментальных и теоретических поисков, что несомненно является ее достоинством. Результаты измерения сравниваются с расчетами, выполненными как с помощью Монте-Карло (МК) генераторов, так и на основе аналитических выражений. В том числе представлены результаты достаточно трудоемких расчетов с учетом следующего за главным логарифмическим приближения (СГЛП) БФКЛ. Представленные результаты сравнения экспериментальных данных и результатов расчетов в различных приближениях ГЛАПД и БФКЛ углубляют наше понимание о важных КХД вкладах в сечения процессов при достижимых на настоящий момент на экспериментах энергиях, что может позволить уточнить предсказания Стандартной Модели при поиске новой физики.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

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

Первая глава посвящена сравнению КХД асимптотических режимов ГЛАПД и БФКЛ. Даны краткие характеристики режимов. Явно представлены соответствующие уравнения. Описано применение этих асимптотик при расчете процессов столкновения адронов. Описаны наблюдаемые, используемые для поиска сигналов эволюции БФКЛ на коллайдерах. Особое внимание уделено процессам рождения струй большими быструтами. Обоснован выбор наблюдаемых для изучения в диссертационной работе. Представлены характеристики МК генераторов столкновений адронов, основанных на моделировании партонных каскадов в рамках эволюций ГЛАПД и БФКЛ. Представлен краткий обзор результатов предыдущих поисков сигналов эволюции БФКЛ на коллайдерах HERA, Tevatron, LEP, LHC.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки. Дана характеристика пучков, поставляемых коллайдером LHC. Достаточно подробно рассмотрены детекторные подсистемы детектора CMS. Особое внимание уделено описанию подсистем, важных для выполненного измерения и понимания третьей главы диссертаций, а именно трекерной и калориметрической подсистем. Кратко описаны алгоритмы, используемые для полного восстановления событий. Также дано описание триггерной системы, использующейся для отбора событий.

В **третьей главе** подробно описана методика 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 скорости струй. Оценку влияния наложения протон-протонных столкновений, и оценку систематических неопределенностей измерения.

Достаточно подробно описана процедура обратной свертки, которая позволяет восстановить полученные распределения с детекторного уровня на уровень стабильных

частиц. Исследован широкий спектр методов для проведения обратной свертки. Выполнен поиск оптимальной схемы обратной свертки. Изучен достаточно большой список возможных систематических эффектов, влияющих на измерения.

Результаты измерения представлены в сравнении с предсказаниями МК генераторов основанных на эволюции ГЛАПД: PYTHIA8, HERWIG, POWHEG; и на эволюции БФКЛ: HEJ+ARIADNE. Причем все генераторы используют соответствующее главное логарифмическое приближение (ГЛП). Ни один из использованных МК генераторов не описывает все измеренные наблюдаемые. Все генераторы переоценивают дифференциальные сечения при больших Δu .

Отношения сечений R^{incl} , R^{MN} , R_{veto}^{incl} и R_{veto}^{MN} растут с увеличением интервала быстроты, из-за увеличения фазового пространства для упорядоченного по скорости излучения, как ожидается в соответствии с эволюцией БФКЛ, что может указывать на наличие БФКЛ эффектов, однако цветовая когерентность, реализованная в генераторах PYTHIA8 и HERWIG, затрудняет интерпретацию результатов. Представлено сравнение отношений сечений R^{incl} , R^{MN} измеренных при разных энергиях 2.76 и 7 ТэВ. Получение энергетической зависимости этих наблюдаемых важно, так как эволюции ГЛАПД и БФКЛ имеют разную энергетическую и быструю зависимость.

Четвертая глава представляет сравнение экспериментально измеренного сечения Мюллера-Навеле с результатом расчета, выполненного с учетом СГЛП БФКЛ. Расчет также использует процедуру Бродского-Фадиной-Кима-Липатова-Пивоварова для устранения неоднозначности, связанной с сильной зависимостью СГЛП БФКЛ от масштаба ультрафиолетовой перенормировки. Выполнена оценка систематических теоретических неопределенностей в расчете. Также представлены результаты расчетов на основе Борновского приближения и ГЛП БФКЛ. Сравнение показывает согласие расчета с учетом СГЛП БФКЛ с экспериментальными данными, в то время как все остальные расчеты сильно переоценивают результаты измерения при больших разностях скоростей Δu . Это является сильным указанием на проявление эффектов эволюции БФКЛ.

Пятая глава посвящена разработке методики вычисления влияния условия вето по поперечному импульсу дополнительных струй на инклюзивные сечения. Ввиду разных характерных конфигураций излучения для эволюций ГЛАПД и БФКЛ, вето по-разному влияет в случае, когда доминирует первая или вторая эволюция. Таким образом введение условия вето позволяет увеличить чувствительность наблюдаемых к возможным проявлениям эволюции БФКЛ.

На настоящем 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 каскада с учетом цветовой когерентности. То есть эволюция БМС ближе к PYTHIA8 и HERWIG. 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 наблюдается в экспериментальных данных. Так же показана сильная зависимость от реализации цветовой когерентности при больших Δu . Все это косвенно свидетельствует в пользу эволюции БФКЛ как формализма, последовательно учитывающего главные вклады при больших Δu .

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

Диссертация написана грамотно и ясно, показывает высокий уровень владения материалом, представленным в работе. Тем не менее, присутствуют некоторые **недостатки**.

Недостаточно четко сформулировано, чем модифицированная и разработанная методики измерения отличаются от методик, использованных ранее для измерения отношений сечений с вето R^{incl} и R^{MN} при 7 ТэВ.

Некоторые выкладки представлены достаточно подробно, однако текст выглядел бы лучше и легче воспринимался, если бы они были вынесены в приложения.

Присутствуют, хотя и совсем мало, опечатки (на стр. 6 и т.д.).

Тем не менее, данные замечания **никоим образом не снижают общую научную ценность диссертационной работы**, которая представляет собой цельное законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне, содержащее **новые** результаты, имеющие важное значение для развития КХД. 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.

Председатель диссертационного совета

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



Афонин С.С.

06.03.2024