

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Липатова Артема Владимировича на диссертацию Егорова Анатолия Юрьевича на «Поиск эффектов ВФКЛ 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».

Диссертационная работа Егорова А.Ю. посвящена поиску эффектов эволюции ВФКЛ в событиях с образованием двух адронных струй в столкновениях протонов при условиях Большого Адронного Коллайдера (БАК, или LHC) и развитию методов вычисления сечений таких событий в рамках квантовой хромодинамики (КХД) с учетом кинематических ограничений (вето) на импульсы дополнительных струй в событии. Как известно, при высоких энергиях динамика партонных (глюонных и кварковых) плотностей в протоне Докшицера-Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи (DGLAP) должна заменяться асимптотической динамикой Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (BFKL), поэтому поиск соответствующих экспериментальных проявлений эффектов ВФКЛ эволюции — в используемой в работе устоявшейся терминологии — является весьма **актуальной** задачей современной физики высоких энергий. Хотелось бы сразу отметить, что несколько более верным следовало бы определить тематику работы, как связанную с поиском эффектов поправок высших порядков теории возмущений в области высоких энергий (малых  $x$ ), поскольку последовательный (и достаточно трудоемкий) учет вкладов следующих порядков в рамках формализма DGLAP будет все более и более приближать полученный результат к асимптотическому пределу BFKL. Далее будет использоваться (общепринятая) терминология, принятая в диссертационной работе.

Одними из возможных процессов, с помощью которых может производиться поиск и изучение эффектов динамики ВФКЛ, являются процессы инклюзивного рождения двух струй адронов, хорошо отделенных друг от друга по скорости, а также процессы, в которых пара образующихся струй обладает максимальным разделением по скорости  $\Delta\eta$  среди всех струй в событии, а поперечные импульсы каждой струи превышают некоторый порог  $p_T \ll \sqrt{s}$  (пары струй Мюллера-Навелле). Дополнительной мотивацией исследований является возможность непосредственного проведения измерений сечений таких процессов на LHC в рамках коллаборации CMS. С другой стороны, получение теоретических предсказаний для сечений рассматриваемых процессов с учетом вкладов

следующего за главным логарифмическим приближения (NLL) в рамках формализма ВФКЛ требует достаточно сложных и трудоемких вычислений также представляется чрезвычайно важным и интересным. Действительно, поправки к результатам, полученным в лидирующем логарифмическом порядке ВФКЛ существенно зависят от выбора схемы и масштаба перенормировки. Использование процедуры Бродского, Лепажа, Маккензи (BLM) для оптимального выбора масштаба ренормализации приводит к удовлетворительным результатам. Однако, в настоящее время такие расчеты выполнены не для всех наблюдаемых, поэтому выработка и сравнение теоретических предсказаний с экспериментальными данными (в особенности для двухструйных процессов) имеет несомненный научный интерес. Разработанные вычислительные методы могут оказаться полезными при интерпретации экспериментальных результатов (в том числе результатов поиска проявлений эффектов новой физики за рамками Стандартной Модели), полученных как на современных коллайдерах (LHC), так и на коллайдерах следующего поколения (NICA, FCC, EIC, EICС и др.).

## **Общая характеристика диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 164 страниц, включая 37 рисунков и 7 таблиц. Список литературы насчитывает 132 наименования.

**Введение** содержит краткую характеристику темы исследования, обоснование ее актуальности, формулировку цели и задач работы, обсуждение научной новизны работы и основных положений, выносимых на защиту. Отмечается личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве и обсуждается апробация работы.

**В первой главе** диссертации рассматриваются основные свойства КХД при высоких энергиях в асимптотических режимах, описываемых уравнениями DGLAP и ВФКЛ. Приводится явный вид этих уравнений, обсуждаются условия их применимости и роль поправок за пределами лидирующего логарифмического приближения. Подробно обсуждается и аргументируется выбор наблюдаемых для экспериментального поиска проявлений эффектов эволюции ВФКЛ в двухструйных событиях с большим разделением по быстроте при энергии коллайдера LHC. Такими наблюдаемыми, в частности, являются дифференциальные сечения процессов инклюзивного рождения пар адронных струй (т.е. процессов, в которых учитывается каждая попарная комбинация струй с поперечным импульсом выше некоторого порога) и процессов рождения пар струй Мюллера-Навелле в зависимости от разделения струй по быстроте  $\Delta\eta$ , а также их некоторые отношения

к сечениям процессов эксклюзивного рождения пар струй (т.е. процессов, в которых учитываются события только с одной парой струй):  $R^{\text{incl}}$ ,  $R^{\text{MN}}$ ,  $R^{\text{incl}}(\text{veto})$ ,  $R^{\text{MN}}(\text{veto})$ . Перечисляются Монте-Карло генераторы, которые используются в работе (PYTHIA8, HERWIG, POWHEG, HEJ), описываются их ключевые особенности, теоретические подходы, лежащие в основе моделируемых событий. Кроме того, приводится обзор предыдущих результатов измерений по тематике исследований, выполненных на коллайдерах Tevatron и LHC.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальной установки — коллайдера LHC и детектора CMS. Рассматриваются особенности работы трекерной, калориметрической, мюонной систем детектора, а также кратко излагается сущность алгоритмов восстановления событий и отбора адронных струй.

**В третьей главе** подробно представлена разработанная автором методика измерения сечений различных классов двухструйных событий с большим разделением по быстройте  $\Delta y$  в столкновениях протонов при высоких энергиях с использованием детектора CMS. Описаны алгоритмы отбора, объединения выборок сигналов, записанных с помощью различных триггеров, изучено влияние детекторных искажений и получена оценка систематических неопределенностей предложенной методики. С помощью последней были проведены измерения сечений процессов инклюзивного рождения двух струй и пар струй Мюллера-Навеле при энергии сталкивающихся протонов в системе центра масс 2.76 ТэВ, а также их некоторых отношений к сечениям процессов эксклюзивного парного рождения струй адронов (с учетом или без учета кинематических ограничений  $p_T > 20$  ГэВ — условий вето — на дополнительные струи в событии). Измерения были выполнены для струй с поперечным импульсом  $p_T > 35$  ГэВ и быстротой  $|y| < 4.7$ . Проведено сравнение полученных результатов с теоретическими предсказаниями Монте-Карло генераторов PYTHIA8, HERWIG (в ведущем порядке теории возмущений КХД), POWHEG (в следующем за ведущем порядке теории возмущений), HEJ (в рамках лидирующего логарифмического приближения BFKL). Измеренные дифференциальные сечения  $d\sigma^{\text{incl}}/d\Delta y$  и  $d\sigma^{\text{MN}}/d\Delta y$  быстро падают при больших значениях  $\Delta y$ , при этом падение быстрее, чем предсказывается уравнениями DGLAP. В тоже время отношения измеренных сечений к сечениям эксклюзивного парного рождения адронных струй растут с увеличением разности быстрот  $\Delta y$ , что связано с увеличением фазового пространства для упорядоченного по быстройте излучения. Последнее является указанием на проявление эффектов эволюции BFKL. Продемонстрировано, что ни один из используемых генераторов не описывает всю совокупность полученных экспериментальных данных в достаточной степени. Более того, показана сильная

зависимость предсказаний этих генераторов от реализации моделей цветовой когерентности. Проведено сравнение с результатами более ранних измерений (при энергии протон-протонных столкновений 7 ТэВ).

**Четвертая глава** посвящена вычислению сечений процессов рождения пар адронных струй Мюллера-Навеле (и их некоторых отношений) в протон-протонных столкновениях при высоких энергиях в рамках NLL-приближения VFKL. В этих расчетах используется процедура VLM для оптимального выбора ренормализационного масштаба, позднее обобщенная на неабелев случай в работах С. Бродского, В.С. Фадына, В.Т. Кима, Л.Н. Липатова и А.А. Пивоварова. Приведены основные формулы для сечений рассматриваемых процессов и импакт-факторов, которые используются при проведении численных вычислений, при этом для восстановления струй используется  $k_t$ -алгоритм. Впервые представлено сравнение полученных предсказаний NLL VFKL с экспериментальными данными, описанными в главе 3 (при энергии 2.76 ТэВ). Выполнена оценка теоретических неопределенностей проведенных вычислений. Продемонстрировано, что результаты NLL VFKL расчетов находятся в хорошем согласии с результатами измерений, в то время как предсказания Монте-Карло генераторов PYTHIA8, HERWIG, POWHEG и HEJ значительно переоценивают экспериментальные данные в области больших  $\Delta\eta$ . Тем самым получено новое и весьма сильное указание на проявление эффектов эволюции VFKL в рассматриваемом процессе. Продемонстрировано, что вклады следующего за ведущим порядка VFKL являются существенными для описания экспериментальных данных. Представлены теоретические предсказания NLL VFKL для сечений процессов рождения струй Мюллера-Навеле при энергиях 8 и 13 ТэВ, которые могут быть проверены экспериментально. Показано, что отношения сечений этих процессов при разных энергиях могут служить хорошим источником информации для поиска сигналов VFKL эволюции.

**Пятая глава** посвящена развитию методов вычисления сечений процессов парного рождения адронных струй в протон-протонных столкновениях при высоких энергиях с учетом кинематических ограничений на импульсы дополнительных струй, регистрируемых в событии (вето). Используется подход, основанный на уравнении Banfi-Marchesini-Smye (BMS), который успешно применялся ранее для описания таких событий с «межструйным» вето (т.е. вето, наложенным в интервале  $\Delta\eta$  между струями в паре, «interjet veto») в эксперименте ATLAS при энергии 7 ТэВ. Этот подход обобщен на случай, когда условие вето наложено во всем диапазоне доступных быстрот («струйное», или «jet veto») для партонных подпроцессов в борновском приближении. Приведены основные формулы, которые используются в расчетах и изложены алгоритмы численного решения уравнения BMS для случаев «межструйного» и «струйного» вето. Изучено

влияние условий вето на наблюдаемые и проведено сравнение результатов вычислений с экспериментальными данными коллаборации CMS для отношений сечений процессов инклюзивного и эксклюзивного рождения пар адронных струй при энергии 7 ТэВ. Впервые предложенный подход использован для расчетов сечений процессов рождения пар Мюллера-Навеле в рамках NLL BFKL приближения. Показано, что учет NLL вкладов значительно улучшает согласие теоретических предсказаний с экспериментальными данными коллаборации CMS при больших  $\Delta y$ . В то же время продемонстрировано, что эволюция BMS предсказывает более слабую зависимость рассчитанных отношений сечений процессов рождения пар струй Мюллера-Навеле к сечениям процессов эксклюзивного парного рождения адронных струй от энергии протонного соударения, чем наблюдается в эксперименте. Это указывает на необходимость дальнейшего развития методов вычисления влияния условия вето на дополнительные струи в рамках подхода, основанного на эволюции BFKL.

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

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Впервые измерены в  $pp$  столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ  $\Delta y$ -дифференциальные сечения рождения инклюзивных,  $d\sigma^{\text{incl}}/d\Delta y$ , и Мюллера-Навеле,  $d\sigma^{\text{MN}}/d\Delta y$ , пар адронных струй и отношения сечений  $R^{\text{incl}}(\text{veto})$ ,  $R^{\text{MN}}(\text{veto})$ .
2. Впервые измерены в  $pp$  столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ отношения сечений  $R^{\text{incl}}$  и  $R^{\text{MN}}$  и проведено сравнение с измерениями, выполненными ранее при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ.
3. Получены новые указания на проявление эффектов BFKL в  $pp$  столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ при измерении абсолютных величин сечений  $d\sigma^{\text{incl}}/d\Delta y$  и  $d\sigma^{\text{MN}}/d\Delta y$ . Абсолютные величины сечений  $d\sigma^{\text{incl}}/d\Delta y$  и  $d\sigma^{\text{MN}}/d\Delta y$  быстро падают при больших значениях  $\Delta y$ . Падение быстрее чем предсказывается основанными на DGLAP моделями PYTHIA8, HERWIG++, POWHEG + PYTHIA8/HERWIG++/HERWIG7. Измеренное  $\Delta y$ -дифференциальное сечение рождения пар адронных струй Мюллера-Навеле,  $d\sigma^{\text{MN}}/d\Delta y$ , согласуется в пределах систематических неопределенностей с выполненным в настоящей работе NLL BFKL расчетом.
4. Отношения сечений  $R^{\text{incl}}$ ,  $R^{\text{MN}}$ ,  $R^{\text{incl}}(\text{veto})$ ,  $R^{\text{MN}}(\text{veto})$  растут с увеличением  $\Delta y$ , что связано с увеличением фазового пространства для упорядоченного по

быстроте излучения согласно ожиданиям ВФКЛ. При самых больших  $\Delta y$  рост сменяется падением, что связано с кинематическими ограничениями фазового объема на излучение струй, дополнительных к паре Мюллера-Навелле. Отношения  $R^{\text{incl}}$  и  $R^{\text{MN}}$  растут быстрее при энергии  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ, чем при 2.76 ТэВ, и переход от роста к падению наблюдается при больших значениях  $\Delta y$ .

5. Сравнение результатов измерений отношений сечений  $R^{\text{incl}}$ ,  $R^{\text{MN}}$ ,  $R^{\text{incl}}(\text{veto})$ ,  $R^{\text{MN}}(\text{veto})$  с моделями, использующими  $p_T$ -упорядоченный DGLAP партонный каскад с поправками на цветовую когерентность (PYTHIA8, HERWIG++, POWHEG + PYTHIA8/HERWIG++/HERWIG7, BMS эволюция), демонстрируют сильную зависимость от реализации цветовой когерентности при больших  $\Delta y$ . Это указывает на необходимость учета струйного вето на основе эволюции ВФКЛ как формализма последовательно учитывающего вклады при больших  $\Delta y$ .

Диссертация написана в кратком и достаточно ясном стиле. Некоторым **недостатком** диссертации можно считать тот факт, что при широком использовании в работе Монте-Карло генераторов, основанных на партонной эволюции DGLAP (PYTHIA8, POWHEG, HERWIG) и наличии в настоящее время достаточного количества генераторов, основанных на эволюции типа ВФКЛ (например, CASCADE, KaTie, HEJ и др.) автор применяет только один из них (HEJ), аргументируя свой выбор неудовлетворительными результатами, полученными с помощью CASCADE и представленными в экспериментальной работе коллаборации CMS (ссылка [37], работа вышла в апреле 2012 года). Однако в этой публикации использовалась старая версия (2.2.03) генератора почти 14-летней давности. Последняя версия CASCADE (версия 3), вышедшая в 2021 году (в августе), включает в себя ряд новых наборов глюонных распределений, полученных с помощью решения уравнения эволюции CCFM (Catani, Ciafaloni, Fiorani, Marchesini), которые справедливы как в асимптотической области малых  $x$  (предел ВФКЛ), так и в области промежуточных и больших значений  $x$  (предел DGLAP). Кроме того, в этой версии доступны также функции распределения глюонов и кварков в протоне, вычисленные в рамках подхода РВ (Parton Branching) в следующем за ведущим порядке теории возмущений. Сравнение таких предсказаний с полученными в диссертационной работе экспериментальными данными представляет, конечно, существенный интерес.

Здесь же следует отметить, что для вычислений сечений рассматриваемых процессов с учетом условий вето на импульсы дополнительных струй в событии может использоваться метод, основанный на численном моделировании каскада

глюонной эволюции с помощью TMD генератора партонных ливней, включенного в последнюю версию Монте-Карло генератора CASCADE. Этот метод уже успешно применялся при вычислении сечений некоторых процессов с образованием одной или нескольких струй в конечном состоянии. В частности, полученные с его помощью результаты для сечений процессов ассоциативного рождения хиггсовских частиц и одной или двух струй находятся в прекрасном согласии с NNLO предсказаниями пертурбативной КХД. Применение такого метода для рассматриваемого класса процессов и сравнение соответствующих результатов с представленными в главе 5 (полученными на основе формализма BMS) также представляет значительный интерес.

Наконец, нельзя не отметить достаточно большое количество допущенных опечаток (которые присутствуют даже в оглавлении, п. 3.6), множество пропущенных запятых, а также некоторое некритичное использование англоязычных терминов (например, «форвардная область» и пр.)

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

В целом диссертация Егорова А.Ю. представляет законченное научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне. Материал излагается подробно, основные научные предположения хорошо обоснованы. Полученные результаты являются вполне **достоверными** и **обоснованными**. Их **научная новизна и значимость** также не вызывает сомнений. Они прошли **апробацию** на различных российских и международных конференциях, а также были опубликованы в 6 печатных изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Представленные в диссертации результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном и определяющем участии.

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».  
Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела теоретической физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова

Липатов Артем Владимирович

26.02.2024

*Артем А.В. Липатов удостоверяю.*  
*Членом совета ИИЯФ МГУ*



*/Липатов А.В./*