

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Токарева Михаила Владимировича на диссертацию Егорова Анатолия Юрьевича «Поиск эффектов БФКЛ эволюции при образовании пар адронных струй с большим разделением по быстрой 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.

Целью данной работы является экспериментальный поиск эффектов ВФКЛ при рождении пар адронных струй с большим разделением по быстрой в протон-протонных столкновениях при энергии $\sqrt{s}=2.76$ ТэВ на Большом адронном коллайдере.

Актуальность темы исследования.

Квантовая хромодинамика считается современной теорией сильных взаимодействий. Она основана на уравнениях Янга-Миллса, описывающих взаимодействие кварков и глюонов. В связи с проблемой конфайнмента, точное решение нелинейных уравнений КХД в общем виде неизвестно. Свойство асимптотической свободы позволяет развивать приближенные методы для нахождения аналитических и численных решений в некоторых кинематических областях. Экспериментальная проверка свойств этих решений, осуществляемых на коллайдере LHC в протон-протонных столкновениях и поиск новой физики, является важной и актуальной задачей физики высоких энергий.

Основными уравнениями для описания эффектов КХД для процессов изучаемых на LHC в рамках Стандартной модели являются уравнения эволюции Грибова–Липатова–Альтарелли–Паризи–Докшицера (GLAPD) и Балицкого–Фадина–Кураева–Липатова (BFKL). Область применимости этих уравнений существенно отличаются. Первая соответствует режиму больших переданных импульсов порядка энергии столкновения протонов $Q \sim \sqrt{s}$ при фиксированном отношении $Q/\sqrt{s} \approx 1$. Во втором случае масштаб взаимодействия, Q , при большой энергии \sqrt{s} считается конечным и $Q/\sqrt{s} \ll 1$, но достаточно большим для применимости пертурбативной КХД. Проверка эволюции уравнений GLAPD и BFKL с учетом высших поправок NLO, NNLO и LL, NLL, соответственно, и сравнение с экспериментальными данными представляет значительный интерес как с точки зрения расширения пределов применимости этих уравнений, так и поиска новых эффектов.

Применимость уравнения GLAPD хорошо проверена на коллайдерах HERA, Tevatron и LHC. Результаты применимости уравнения BFKL остаются неоднозначными. Так, оценка интерсепта померона заметно улучшается в NLL приближении, оставляя открытым вопрос о вкладе следующего приближения. Одной из критических проверок является сравнение результатов предсказаний

эволюции GLAPD с учетом поправок на цветовую когерентность с результатами BFKL. Этот эффект, приводящий к дополнительному угловому упорядочению излучения, частично учтен в формализме BFKL. Поскольку эволюция уравнений GLAPD и BFKL по энергии \sqrt{s} и быстрой y имеет разную зависимость, то, с экспериментальной точки зрения, чрезвычайно важны измерения, которые чувствительны к эффектам BFKL при всех доступных энергиях и быстротах. Для теоретической проверки формализма BFKL необходима разработка методов расчета эволюции с учетом NLL поправок для новых измеряемых наблюдаемых, чувствительных к возможным сигналам эволюции. К таким наблюдаемым относятся — выход адронных струй в области больших значений быстрой $|y|$, рождение пар адронных струй с большим интервалом по быстрой $\Delta y = |y_1 - y_2|$, отношения сечений, измеренных при разных энергиях, с и без введения запрета на наличие дополнительных адронных струй в некоторых областях фазового пространства. Эволюция BFKL предсказывает экспоненциальный рост сечений с \sqrt{s} и Δy . Максимальный вклад в сечение ожидается от пар струй (Мюллера-Навелле) с максимальным Δy и с поперечным импульсом, p_{\perp} , выше определенного порога $p_{\perp \min} \ll \sqrt{s}$. Изучение азимутальных декорреляций между двумя струями с большим Δy позволит проверить предсказание формализма BFKL по ослаблению корреляции между струями с увеличением Δy за счет диффузии излучения по поперечному импульсу, p_{\perp} . Этот эффект отличается от сильной корреляции струй, имеющих большие импульсы в плоскости поперечной к оси сталкивающихся частиц, предсказываемой в формализме GLAPD. Изучение событий с быстрой провалом между струями в паре, характерных для обмена цветовым синглетом, описывается померонным решением уравнения BFKL.

Во Введении дан краткий обзор экспериментальных работ по рождению струй в области больших быстрой и при больших Δy на коллайдерах HERA (H1, ZEUS), Tevatron (CDF, D0), LHC (ATLAS, CMS, CMSTOTEM). Отмечается, что ни одна из моделей, основанных на GLAPD эволюции, не способна описать имеющийся набор наблюдаемых, даже с учетом эффекта цветовой когерентности. Результаты расчетов, основанные на BFKL эволюции и учитывающие NLL поправки, согласуются с экспериментальными данными, но отсутствует единая методика расчета для большей части наблюдаемых, например, для инклюзивных и Мюллера-Навелле сечений рождения пар адронных струй.

В качестве наблюдаемы в настоящей работе рассматриваются дифференциальные сечения и их отношения в зависимости от Δy : $d\sigma^{incl} / d\Delta y$, $d\sigma^{MN} / d\Delta y$,
 $R^{incl}(\Delta y) = (d\sigma^{incl} / d\Delta y) / (d\sigma^{excl} / d\Delta y)$, $R^{MN}(\Delta y) = (d\sigma^{MN} / d\Delta y) / (d\sigma^{excl} / d\Delta y)$,
 $R_{veto}^{incl}(\Delta y) = (d\sigma^{incl} / d\Delta y) / (d\sigma_{veto}^{excl} / d\Delta y)$, $R_{veto}^{MN}(\Delta y) = (d\sigma^{MN} / d\Delta y) / (d\sigma_{veto}^{excl} / d\Delta y)$,
где σ^{incl} — инклюзивное сечение, в котором каждая попарная комбинация струй с $p_{\perp} > p_{\perp \min}$ дает вклад в сечение; σ^{MN} — сечение МН, в котором пара струй с

максимальным Δy среди струй с $p_{\perp} > p_{\perp \min}$ дает вклад в сечение; σ^{excl} – эксклюзивное сечение, в котором события со строго одной парой струй с $p_{\perp} > p_{\perp \min}$ дают вклад; σ_{veto}^{excl} – эксклюзивное с вето сечение. Эксклюзивные события, в которых отсутствуют дополнительные струи с $p_{\perp} > p_{\perp \text{veto}}$, дают вклад в σ_{veto}^{excl} . Следует отметить, что σ^{excl} тоже является сечением событий со струйным вето $p_{\perp \text{veto}} = p_{\perp \min}$.

Получение новых экспериментальных данных по сечениям рождения пар струй, разделенных большим интервалом по быстроте при энергиях LHC, с целью более глубокого понимания механизма эволюции BFKL, тестирования феноменологических Монте-Карло моделей и аналитических расчетов в рамках пертурбативной КХД, несомненно является актуальной темой исследования, проведенного в диссертации. Разработка методики измерения дифференциальных сечений и отношения сечений рождения пар адронных струй, аккумулирующей современное состояние развития теории и обработки экспериментальных данных необходима для более прецизионной проверки различных режимов КХД и предсказаний Стандартной модели при поиске новой физики.

Научная новизна:

1. Разработана методика измерения дифференциальных сечений рождения пар адронных струй Мюллера-Навелле, $d\sigma^{MN}/d\Delta y$, инклюзивных пар, $d\sigma^{incl}/d\Delta y$, отношений сечений с вето $R_{veto}^{MN}(\Delta y)$ и $R_{veto}^{incl}(\Delta y)$ в зависимости от Δy , соответствующая стандартам коллаборации CMS в цикле Run II.
2. Впервые измерены сечения $d\sigma^{MN}/d\Delta y$, $d\sigma^{incl}/d\Delta y$ и отношения сечений образования пар струй с вето $R_{veto}^{MN}(\Delta y)$ и $R_{veto}^{incl}(\Delta y)$ в pp столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ. Проведено сравнение экспериментальных данных CMS по сечениям и отношениям сечений образования струй при энергии 2.76 ТэВ с предсказаниями Монте-Карло моделей, основанных на эволюции GLAPD и BFKL в различных приближениях.
3. Впервые измерены отношения сечений образования пар струй $R^{MN}(\Delta y)$ и $R^{incl}(\Delta y)$ в pp столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ. Проведено сравнение с экспериментальными данными CMS по сечениям и отношениям сечений образования струй при энергии 7 ТэВ и с предсказаниями Монте-Карло моделей, основанных на эволюции GLAPD и BFKL в различных приближениях.
4. Проведен расчет и сравнение сечения $d\sigma^{MN}/d\Delta y$ рождения пар МН адронных струй в NLL BFKL приближении с экспериментальными данными CMS и получены новые указания на проявление эффектов эволюции BFKL в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ. Предсказаны сечения $d\sigma^{MN}/d\Delta y$ рождения пар МН адронных струй в NLL BFKL приближении для pp столкновений при энергии $\sqrt{s} = 8$ и 13 ТэВ.

5. Проведен расчет и сравнение отношения $R^{MN}(\Delta y)$ дифференциальных сечений рождения МН пар адронных струй при разных (2.76, 7, 8, 13 ТэВ) энергиях и показана чувствительность этих наблюдаемых к сигналам эволюции BFKL.

6. Впервые представлена методика вычисления инклюзивных сечений рождения пар адронных струй с вето на дополнительные струи с $p_{\perp} > p_{\perp, veto}$ на основе решения уравнения BMS и произведено сравнение с экспериментальными данными CMS для pp столкновений при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ.

7. Впервые представлена методика вычисления МН сечений рождения пар адронных струй с вето на дополнительные струи с $p_{\perp} > p_{\perp, veto}$ между МН струями на рамках NLL BFKL+BMS приближения, проведено сравнение с экспериментальными данными CMS для pp столкновений при $\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ и сделаны предсказания для pp столкновений при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.

Цели и задачи диссертационной работы.

Целью данной работы является экспериментальный поиск и теоретическое исследование эффектов BFKL при рождении пар адронных струй с большим разделением по быстроте в pp столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ на Большом адронном коллайдере.

Задачи, решенные в диссертации.

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

1. Разработана методика и проведены измерения дифференциальных сечений рождения пар адронных струй Мюллера-Навеле, инклюзивных пар адронных струй, отношений дифференциальных сечений рождения пар адронных струй с вето в зависимости от Δy в pp столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ с помощью детектора CMS.
2. Проведены расчеты измеряемых наблюдаемых с использованием Монте-Карло генераторов столкновений в различных приближениях.
3. Проведены расчеты дифференциального сечения пар струй МН, $d\sigma^{MN} / d\Delta y$, в зависимости от Δy на основе аналитических выражений в NLL BFKL приближении при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ.
4. Развита методика вычисления влияния условия струйного вето на основе уравнения Banfi-Marchesini-Smye и проведен расчет отношения R^{incl} и сравнение с экспериментальными данными CMS для pp столкновений при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ.
5. Развита методика учета условия вето на основе уравнения BMS для вычислений в рамках NLL BFKL приближения. Проведены вычисления отношения сечений с вето R^{MN}, R_{veto}^{MN} в NLL BFKL+BMS приближении для pp столкновений при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ и сравнение с измерениями CMS.

6 Предсказаны дифференциальные сечения рождения пар струй МН, $d\sigma^{MN}/d\Delta y$, в NNL BFKL приближении, отношения МН сечений при различных энергиях $\sqrt{s} = 2.76, 8, 13$ ТэВ и $P_{\perp \min} = 35, 20$ ГэВ/с, отношения сечений с вето $R^{MN}, R_{\text{veto}}^{MN}$ в NLL BFKL+BMS приближении для pp столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.

Оформление диссертационной работы. Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертация составляет 164 страницы, 37 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 132 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 процесса глубоко неупругого рассеяния электронов на протонах в рамках партонной модели и в приближении Бьеркена, учитывающего поправки по теории возмущений за счет строго упорядочения излучения по поперечному импульсу. Такие поправки соответствуют суммирования всех членов $\sim [\alpha_s \text{Ln}(1/x)]^n$ пертурбативного ряда и учитываются в рамках формализма Грибова–Липатова–Альтарелли–Паризи–Докшицера (GLAPD). Полная система уравнений GLAPD описывает эволюцию структурных функций с масштабом Q при рассмотрении рассеяния глюонов на протоне. Обсуждаются пертурбативная и непертурбативная особенности партонных функций распределения (PDF) и возможность их факторизации. Отмечается, что феноменологический успех формализма GLAPD при описании ep рассеяния на коллайдере HERA при достаточно малых $x \sim 10^{-4}$ не означает, что полученных на его основе значения PDF надежны в этой области. Указывается, что GLAPD эволюция PDF не учитывает всех доминирующих вкладов в этой области.

С увеличением энергии столкновения \sqrt{s} , в области $\sqrt{s} \gg Q$, но при конечном $Q \gg \Lambda_{QCD} \approx 0.2$ ГэВ суммирование вкладов по строго упорядоченному поперечному импульсу излучения невозможно, но допускается строгое упорядочение вкладов излучения по продольной компоненте импульса, соответствующее упорядочению по быстроте. В такой кинематике излучение пропорционально $\alpha_s \text{Ln}(1/x)$ и главные логарифмические вклады $[\alpha_s \text{Ln}(1/x)]^n$ суммируются в рамках формализма Балицкого–Фадиной–Кураева–Липатова

(BFKL). Обсуждается решение уравнения BFKL в режиме, $s \rightarrow \infty$, доминирующий вклад которого соответствует максимальному собственному числу ω^{\max} , связанному с величиной интерсепта померона $\alpha_{IP} = 1 + \omega^{\max}$. Величина $\omega_{LL}^{\max} = 12 \ln 2(\alpha_s/\pi) \approx 0.55 > 0$ предсказывает рост сечений рассеяния в адроны с \sqrt{s} и Δy . Такой рост обнаружен в экспериментах ZEUS и H1 на HERA, в UA4 и UA5 на $\overline{Sp}pS$, в E710, CDF на Tevatron, в $\gamma^*\gamma^*$ рассеянии в экспериментах OPAL и L3 на LEP, в TOTEM и ATLAS на LHC. Подтверждение роста сечений рассеяния в адроны с ростом \sqrt{s} считается первым успехом формализма BFKL. Большое значение интерсепта указывает на необходимость вычисления поправок в следующем порядке за главным логарифмическим приближении (NLL). Было установлено (V.Fadin, L.Lipatov, Ciafaloni), что они обладают сильной зависимостью от выбора схемы и масштаба ультрафиолетовой перенормировки. Проблема была разрешена в работе Бродского–Фадиной–Кима–Липатова–Пивоварова путем обобщения процедуры оптимального выбора ренормализационного масштаба Бродского–Лепажая–Маккензи на неабелев случай и найдено значение $\omega_{NLL}^{\max} \approx 0.13-0.18$, которое согласуется с теорией Грибова–Редже и ростом сечений рассеяния в адроны с энергией \sqrt{s} в указанных выше экспериментах.

Автором отмечается, что поскольку не для всех наблюдаемых, используемых для поиска сигналов BFKL, разработаны методы вычисления, учитывающие NLL BFKL поправки, то разработка таких методов является важной составляющей поиска сигналов эволюции BFKL. Также обсуждается возможность использования для расчетов сечений при больших Δy вместо партон-партонных распределений эффективное PDF и глюонное сечение.

В работе описаны наблюдаемые для поиска сигналов эволюции BFKL. Построение этих величин основано на различии в характерных конечных состояниях, образующихся в результате эволюций GLAPD и BFKL. Автором отмечается, что при GLAPD эволюции ввиду строгого упорядочения излучения по p_{\perp} , лидирующая пара струй в событии оказывается сильно коррелированной по поперечному импульсу и не зависит от быстроты. Основной вклад дает рассеяние на большой угол $\sim \pi/2$, соответствующий $\Delta y \approx 0$. При BFKL эволюции все адронные струи, строго упорядоченные по быстроте y , несут поперечный импульс p_{\perp} одного порядка. Максимальный вклад в сечение дают пары струй с максимальным Δy . Струи, сильно разделенные по Δy , быстро теряют корреляцию по p_{\perp} из-за излучения в промежутке Δy . Корреляция ослабляется с ростом Δy . Сделан вывод, что максимальной чувствительностью к эффектам BFKL должны обладать наблюдаемые, в которых адронные струи рассматриваются при минимальном $p_{\perp} \ll \sqrt{s}$.

В качестве пробников для поиска сигналов эволюции BFKL в работе рассматривается рождение пар адронных струй с большим интервалом быстроты Δu и выше определенного порога («вето») по поперечному импульсу $p_{\perp \min} \ll \sqrt{s}$ (пары Мюллера–Навелле). Под «вето» понимается экспериментальное наложение запрещающих условий на излучение, дополнительное к паре струй в какой-либо области быстроты выше порога $p_{\perp \text{veto}}$. В данной работе рассматривается эксклюзивное сечение рождения пар адронных струй, в которое дают вклад события только с одной парой струй с поперечным импульсом больше $p_{\perp \min}$ (запрещено дополнительное к паре излучение выше порога вето, $p_{\perp \text{veto}} = p_{\perp \min}$, во всем диапазоне быстрот). Кроме этого условия вводится запрет на дополнительное к эксклюзивной паре излучение струй с поперечным импульсом выше порога вето, $p_{\perp \text{veto}} < p_{\perp \min}$, во всем диапазоне быстрот.

К другому классу событий, анализируемому в работе, относятся события с рождением струй с большими абсолютными значениями быстроты. Эффект азимутальной декорреляции также используется при поиске сигналов эволюции BFKL. BFKL сечение представимо в виде разложения Фурье. Коэффициенты ряда Фурье представляют собой средние косинусы угла φ . Автор считает, что измерение средних косинусов для МН пар представляет интерес для поиска сигналов эволюции BFKL. В эволюции GLAPD декорреляция подавлена, поэтому средние косинусы должны оставаться вблизи единицы во всем промежутке Δu . В случае же эволюции BFKL, нарастающая с Δu декорреляция приводит к уменьшению средних косинусов.

Ранее в рамках эволюции BFKL был предсказан (A.Muller), рост сечений с \sqrt{s} и Δu за счет обмена цветовым синглетом, который описывается померонным решением уравнения BFKL. Рождение жестких струй сопровождается наличием области быстрот, в которой отсутствует рождение адронов (jet-gap-jet и p-gap-jet-gap-jet конфигурации).

В разделе 1.4 представлено описание Монте-Карло генераторов событий (pythia, herwig, sherpa, powheg, hej, cascade ariadne), основанных, как на GLAPD, так и на BFKL эволюции. Отмечается, что для поисков сигналов эволюции BFKL, наиболее важными являются партонный подпроцесс и партонные ливни. Отмечается, что для событий с $p_{\perp \min} = 35$ ГэВ/с и $p_{\perp \text{veto}} = 20$ ГэВ/с, используемых в настоящей работе, мультипартонное взаимодействие не вносит существенного вклада.

При интерпретации результатов при поиске сигналов эволюции BFKL основную трудность вызывают учет поправок на цветовую когерентность. Они приводят к угловому упорядочению излучения, имитирующему эволюцию по быстроте, и становятся нестабильными при больших Δu . В Монте-Карло генераторах цветовая когерентность реализована либо излучением цветовых

диполей, либо за счет упорядоченного по углу партонного каскада в ливне. Автором отмечается, что отключение цветовой когерентности не предусмотрено в Монте-Карло программах, отсутствует возможность разделения вкладов от GLAPD эволюции и цветовой когерентности, дающей эффект частичной упорядоченности по скорости. Учет всех важных вкладов при больших скоростях обеспечивается только в полной BFKL эволюции.

Автором кратко обсуждается уравнение Ciafaloni-Catani-Fiorani-Marchesini (CCFM), учитывающее как GLAPD, так и NLL BFKL эволюцию (в виде углового упорядочения вкладов излучения) для неинтегрированной по поперечному импульсу глюонной функции распределения $g(x, k_{\perp}^2, \mu^2)$. Эволюция CCFM сводится к формализму LO DGLAP при умеренных x и к формализму BFKL при малых x . Отмечается, что поскольку генератор cascade намного переоценивает эффект роста отношений сечений с вето, чем генератор hej, то в настоящей работе этот генератор не используется.

В диссертации показано, что результаты моделирования pythia8, herwig++ и hej+ariadne для отношений сечений с вето $R^{incl}, R^{MN}, R_{veto}^{incl}, R_{veto}^{MN}$, полученные для pp столкновений при энергиях $\sqrt{s} = 2.76, 8, 13, 14, 27$ и 100 ТэВ с вето $p_{\perp min} = 35$ ГэВ/с и $p_{\perp veto} = 20$ ГэВ/с чувствительны к эффектам эволюции BFKL. Включение veto усиливает рост предсказаний hej+ariadne с Δy к эффектам BFKL. Автором отмечается сильная зависимость от реализации поправок на цветовую когерентность, поэтому предсказания эффектов BFKL для области скоростей и энергий на LHC и будущих коллайдерах представляет значительный интерес.

Результаты предыдущих измерений по поиску сигналов BFKL в столкновениях адронов представлены в разделе 1.5. Отмечается, что ни одна, основанная на эволюции GLAPD модель, даже с применением цветовой когерентности не описывает имеющийся набор наблюдаемых. Поэтому развитие методов вычисления, проведенное в диссертационной работе в приближении NLL BFKL с использованием veto, представляет важную и актуальную задачу.

В разделе 1.6 представлено описание наблюдаемых, изучаемых в настоящей работе. К ним относят распределения по Δy дифференциальных сечений $d\sigma^{inel} / d\Delta y, d\sigma^{MN} / d\Delta y$, измеряемые впервые, и отношений дифференциальных сечений с вето $R^{incl}, R^{MN}, R_{veto}^{incl}, R_{veto}^{MN}$, полученные коллаборацией CMS в 2013 году в pp столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ и интегральной светимости 5.4 nb^{-1} . Отбирались адронные струи с $p_{\perp} > p_{\perp min} = 35$ ГэВ/с в интервале $|y| < 4.7$ с порогом $p_{\perp veto} = 20$ ГэВ/с. Отмечается, что измерение значений абсолютных сечений позволит лучше тестировать модели по сравнению с их отношением, а введение отбора по вето на дополнительные струи с более низким, чем $p_{\perp min}$ порогом,

может улучшить чувствительность к сигналам эволюции BFKL. Также возможно определение, с учетом предыдущих измерений, энергетической зависимости КХД асимптотик. В диссертации результаты измерения сравниваются с вычислениями, как на основе МК моделирования в программных пакетах pythia8, herwig, powheg, hej+ariadne, так и аналитических расчетов в LL и NLL BFKL приближении. Отмечается, что впервые представленное сравнение измеренного сечения $d\sigma^{MN}/d\Delta y$ с теоретическим в NLL BFKL приближении указывает на лучшее, среди всех рассмотренных расчетов, согласие и рассматривается как указание на проявление эффектов эволюции BFKL.

Во **второй главе** представлено краткое описание ускорительного комплекса ЛНС и детектора CMS. Центральный элемент детектора CMS – сверхпроводящий соленоид, создающий магнитное поле до 3.8 Тл. Размеры соленоида составляют 13 м в длину и 6 м в диаметре. Во внутреннем объеме соленоида размещены кремниевый трекер, электромагнитный калориметр и адронный калориметр. Каждый калориметр состоит из центральной и торцевых частей. Передний (Forward) калориметр увеличивает покрытие по скорости. Мюонная система, состоящая из проволочных газовых камер, погружена в стальное ярмо магнита, расположенное снаружи соленоида.

Трекер используется для восстановления треков, определения вершин pp взаимодействий и импульсов частиц. Он включает кремниевый пиксельный детектор и кремниевые стриповые детекторы. Для восстановления треков используется расширенный фильтра Калмана.

Калориметрическая система состоит из трех частей: кристаллический электромагнитный калориметр (ECAL), латунно-сцинтилляционный адронный калориметр (HCAL) и форвардный (передний) адронный калориметр. Центральная и торцевая части электромагнитного и адронного калориметра покрывают область псевдобыстроты $|\eta| < 3.0$. Передний расширяет угловой аксептанс до $3.0 < |\eta| < 5.2$.

Электромагнитный калориметр состоит из трех основных частей: центральной части (EB), торцевых частей (EE) и предливневого детектора (Preshower). Цилиндрическая часть электромагнитного калориметра охватывает область псевдобыстроты $|\eta| < 1.48$. Торцевые части охватывают область по псевдобыстроте $1.48 < |\eta| < 3.0$ и располагаются на расстоянии 315 см от точки взаимодействия. Предливневый детектор предназначен для идентификации быстрых нейтральных пионов, распадающихся на пару фотонов с малым углом разлета, идентификации электронов и определения положения электронов и фотонов. Детектор охватывает область псевдобыстроты $1.653 < |\eta| < 2.6$.

Адронный калориметр состоит из центральной части (HB), двух торцевых частей (HE) и внешнего калориметра (HO). HB предназначен для регистрации адронных ливней. Он расположен между наружной поверхностью электромагнитного калориметра ($R = 1.77$ м) и внутренним радиусом сверхпроводящего соленоида ($R = 2.95$ м). Центральная часть адронного

калориметра НВ охватывает область псевдобыстроты $|\eta| < 1.3$. Внешний адронный калориметр НО, предназначенный для регистрации частиц адронных ливней, не поглощенных в НВ.

Измерение энергии заряженных и нейтральных частиц осуществляют, комбинируя информацию с трекера и калориметров, что обеспечивает разрешение энергии адронных струй $\Delta E/E \approx 100\%/\sqrt{E(\text{ГэВ})} \oplus 5\%$.

Форвардный калориметр НФ использует стальной поглотитель и кварцевые трубки, регистрирующие черенковское излучение. Две части форвардного калориметра расположены на расстоянии 11.2 м по обе стороны от точки взаимодействия. Вместе они покрывают область псевдобыстроты $3.0 < |\eta| < 5.2$. Форвардный калориметр служит также монитором светимости. Энергетическое разрешение НФ для адронных струй составляет примерно $\Delta E/E \approx 200\%/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$.

Мюонная система, предназначенная для регистрации мюонов, состоит из газовых детекторов трех типов: дрейфовых трубок (DT), катодных стриповых камер (CSC) и камер с резистивными пластинами (RPC). Дрейфовые трубки DT расположены в центральной области $|\eta| < 1.2$, Катодные стриповые камеры охватывают область псевдобыстроты $|\eta| < 2.4$.

В разделе 2.2.4 описаны процедуры восстановления событий и адронных струй. Для идентификации типа частицы (фотон, электрон, мюон, заряженный адрон, нейтральный адрон), для восстановления направления траектории частицы и ее энергии используется информация со всех детектирующих систем. Фотоны идентифицируются по энергосовпадению в кластере ECAL не сопоставленное с треком заряженной частицы. Электроны идентифицируются с помощью трека и энергосовпадения в кластере ECAL. Мюоны определяются как треки в центральном кремниевом трекаре и по энергосовпадению в калориметрах. Заряженные адроны идентифицируются как трек заряженной частицы, не идентифицированный как электрон или мюон, и ассоциированное с ним энергосовпадение в ECAL и HCAL. Нейтральные адроны идентифицируются как энергосовпадение в кластере HCAL, не сопоставленное с треком заряженной частицы, или как превышение ECAL и HCAL энергосовпадения по отношению к ожидаемому энергосовпадению от заряженного адрона. Энергия фотонов определяется из ECAL измерений. Энергия электронов определяется из комбинации информации об импульсе трека электрона в вершине взаимодействия протонов, энергии соответствующего ECAL кластера, а также энергии всех тормозных фотонов от трека электрона. Энергия мюонов определяется на основе импульса трека мюона. Энергия заряженных адронов определяется из комбинации информации об импульсе трека и энергосовпадении в ECAL и HCAL кластерах. Энергия нейтральных адронов определяется на основе энергосовпадения в ECAL и HCAL кластерах.

В каждом событии адронные струи восстанавливаются из реконструированных частиц с использованием инфракрасно и коллинеарно безопасного алгоритма анти- k_T . Величина параметра — размера струи (cone radius) зависит от энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ и составляет $R = 0.5 \div 0.7$. Импульс струи определяется как векторная сумма

импульсов частиц. Установлено, что точность восстановления энергии адронных струй составляет $\sim 15\%$ при 10 ГэВ, $\sim 8\%$ при 100 ГэВ и $\sim 4\%$ при 1 ТэВ.

Для отбора событий используется двухуровневая система. Триггеры первого уровня — сигналы с калориметров и мюонных детекторов понижают частоту с 40 МГц до 100 кГц. Триггеры второго уровня — представляют собой компьютерный кластер, на котором осуществляется полное восстановление события с помощью развернутого программного обеспечения детектора, оптимизированного для быстрого выполнения. Высокоуровневые триггеры понижают частоту записи событий до 1 кГц.

В **третьей** главе представлено описание измерения зависимости от Δy дифференциальных сечений рождения пар адронных струй, определение отношения сечений и обсуждение результатов. Процедура измерения включает: отбор событий с рождением адронных струй, объединение выборок, записанных с помощью различных триггеров, изучение и определение эффективности триггеров, изучение и учет детекторных искажений, коррекция измерений, изучение и учет систематических неопределенностей.

Автором представлены результаты измерения и обсуждение инклюзивного и Мюллера-Навеле сечений рождения пар адронных струй, отношения сечений рождения пар адронных струй $R^{incl}, R^{MN}, R_{veto}^{incl}, R_{veto}^{MN}$, проведено сравнение отношений сечений R^{incl}, R^{MN} в pp столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ.

Установлено, что ни один из использованных Монте-Карло генераторов, основанных на расчетах в приближении GLAPD, не описывает полный набор измеренных величин. Ни один из рассмотренных генераторов не описывает дифференциальные сечения $d\sigma^{incl} / d\Delta y$ и $d\sigma^{MN} / d\Delta y$. Предсказания генератора `pythia8` согласуются в пределах статистических и систематических неопределенностей с отношениями сечений с вето $R^{incl}, R^{MN}, R_{veto}^{incl}$. Установлено отклонение предсказаний `pythia8` от измерений R_{veto}^{MN} на уровне двух стандартных отклонений. Генераторы, основанные на эволюции GLAPD, не описывают отношения сечений с вето $R^{incl}, R^{MN}, R_{veto}^{incl}, R_{veto}^{MN}$.

В **четвёртой** главе представлены результаты расчетов сечений пар адронных струй Мюллера-Навеле и их отношений в приближении NLL BFKL.

Важность разработки и применения методов расчета экспериментальных наблюдаемых в NLL BFKL приближении связана с поиском сигналов этого механизма. Используя процедуру оптимального выбора ренормализационного масштаба Бродского–Липажа–Маккензи, обобщенную на неабелев случай Бродским–Фадиным–Кимом–Липатовым–Пивоваровым, в работе подробно обсуждаются функция Грина, импакт-факторы, сечение рождения пар адронных струй Мюллера-Навеле в формализме NLL BFKL, эффекты бегущей константы связи и представлены результаты вычислений сечения МН в NLL BFKL

приближении. Проведено первое сравнение результатов вычислений сечений рождения пар адронных струй MN с результатами измерений коллаборации CMS в pp столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ. Получено хорошее согласие с результатами измерений с учетом статистических и систематических неопределенностей, поддерживающее предположение о проявления эффектов эволюции BFKL в исследуемой кинематике. Предсказаны зависимости дифференциальных сечений рождения MN струй, $d\sigma^{MN}/d\Delta y$ от Δy для энергий $\sqrt{s} = 8$ и 13 ТэВ и представлено сравнение с другими расчетами. Отмечается, что предсказанные значения отношения $R^{MN}(\Delta y)$ при различных энергиях указывают на возможность разделения вкладов, основанных на GLAPD и BFKL эволюции, что также поддерживает выбор этой наблюдаемой для поиска сигналов эволюции BFKL.

Пятая глава посвящена развитию методов вычислений сечений рождения пар адронных струй с вето. Автором отмечается, что в настоящее время отсутствует аналитический метод расчета влияния условия струйного вето по поперечному импульсу, основанного на BFKL приближении. Результаты, проведенных вычислений, основанные на уравнении Banfi-Marchesini-Smye (BMS), хорошо согласуются с измерениями отношений сечений рождения пар адронных струй с межструйным вето в эксперименте ATLAS при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. В данной работе представлено описание и обобщение уравнения BMS для вычислений струйного вето на всем доступном промежутке быстроты с борновским партон-партонным подпроцессом и для межструйного вето с партон-партонным подпроцессом в приближении NLL BFKL и проверки предсказаний энергетической зависимости BMS подхода с вето для данных CMS в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 2.76$ и 7 ТэВ.

В работе представлены результаты вычислений $R^{incl}(\Delta y)$ отношения сечений инклюзивного рождения пар адронных струй и «эксклюзивных» пар адронных струй, измеренному в pp столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в эксперименте CMS. В измерении рассматриваются адронные струи с $p_{\perp} > p_{\perp min} = 35$ ГэВ/с и быстротой $|y| < 4.7$. «Эксклюзивное» рождение пар адронных струй является рождением пары струй с вето, установленным для дополнительных адронных струй с $p_{\perp veto} = p_{\perp min} = 35$ ГэВ/с. Размер адронных струй определяется параметром «струйного» алгоритма $R = 0.5$.

В работе обсуждается подход BMS для описания утечки энергии и поперечного импульса от жестких струй за счет многократного излучения мягких глюонов на большой угол. Такой механизм приводит к уменьшению энергии жестких струй и, если поперечный импульс передается в область наложения вето, то к нарушению этого условия. Область фазового пространства, где доминируют эффекты BMS и BFKL, отличаются. В первом случае поток энергии определяется излучением мягких глюонов на большие углы, но последовательное излучение

глюонов приводит к p_{\perp} -упорядоченному партонному каскаду, при котором все углы примерно одного порядка. При BFKL эволюции доминирует p_{\perp} -диффузия и упорядочение по быстрой может приводить к сильному упорядочению по углу. В работе отмечается, что имеющиеся в литературе анализы об относительном вкладе BFKL и BMS режимов в вето наблюдаемые остается открытым.

Практическая значимость.

Результаты, полученные в диссертационной работе, являются важным экспериментальным вкладом в развитие теории, направленной на понимание механизма эволюции BFKL, поиска новых физических эффектов, тестирования феноменологических Монте-Карло моделей, аналитических методов расчетов в рамках пертурбативной КХД. Расширен набор экспериментально измеряемых величин для поиска сигналов эволюции BFKL и более строго тестирования феноменологических моделей. Разработанная в диссертации методика измерения дифференциальных сечений и отношения сечений рождения пар адронных струй может использоваться в экспериментах ATLAS, CMS и анализа данных, полученных также коллаборациями DØ и CDF, при других энергиях. Несомненно, полученные в диссертации результаты расчетов сечений рождения струй в рамках различных приближений GLAPD и BFKL существенно углубляют наше понимание различных КХД вкладов при экспериментально достижимых энергиях и быстротах. Предполагается, что эти результаты позволят уточнить предсказания Стандартной модели при поиске новой физики. Полученные в диссертации результаты как экспериментальных, так и теоретических исследований могут быть включены в программу специальных дисциплин при подготовке студентов по направлению – «Физика высоких энергий и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Достоверность полученных экспериментальных результатов, представляемых диссертантом от имени коллаборации CMS, подтверждается высокой квалификацией участников этих исследований. Эти результаты докладывались на рабочих совещаниях коллаборации CMS и прошли внутреннее рецензирование. Результаты Монте-Карло вычислений, полученные с использованием разработанных программ для вычислений в рамках эволюции BMS и NLL BFKL, воспроизводят результаты других авторов. Достоверность результатов диссертации обеспечивается их публикацией в журналах, рецензируемых ВАК и представлением на международных конференциях.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях: 19th Annual Russia and Dubna Member States CMS Collaboration Conference 2016 (Варна, Болгария); 2nd CMS Workshop «Perspectives on Physics on CMS at HL-LHC» 2017 (Варна, Болгария); ЛII Зимней школе Петербургского института ядерной физики (ПИЯФ) НИЦ «Курчатовский Институт», 2018 (Рошино, Россия); The 5th international conference on particle physics and astrophysics 2020 (Москва, Россия); LXXII International conference «NUCLEUS – 2022: Fundamental

problems and applications» 2022 (Москва, Россия); The 6th international conference on particle physics and astrophysics 2022 (Москва, Россия); LV Зимней школе ПИЯФ НИЦ «Курчатовский Институт», 2023 (Луга, Россия); 21st Lomonosov conference on elementary particle physics 2023 (Москва, Россия), а также на семинарах Отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики НИЦ «Курчатовский Институт» (Гатчина, Россия), совещаниях рабочих групп коллаборации CMS (Женева, Швейцария), Всероссийском Молодежном Научном Форуме Open Science 2018 (Гатчина, Россия).

Личный вклад автора.

Автор внес определяющий вклад в анализ экспериментальных данных по измерению сечений рождения пар адронных струй с большим Δu и отношений двухструйных сечений с вето на дополнительные струи при энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ, в моделирование и расчет сечений в различных Монте-Карло генераторах. Автор внес определяющий вклад в получение результатов вычислений сечений рождения пар адронных струй с большим Δu в NLL BFKL приближении и оценку теоретических неопределенностей. Автор внес определяющий вклад в получение результатов вычислений влияния условия струйного вето. Автор разработал методику применения эволюции BMS для учета условия вето во всем диапазоне быстроты, при вычислениях в NLL BFKL приближении и внес определяющий вклад в получение результатов расчетов в NLL BFKL+BMS приближении. Автор внес существенный вклад в подготовку публикаций.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus.

В **Заключении** диссертации кратко перечислены основные результаты работы и сформулированы наиболее значимые положения, выносимые на защиту.

Замечания по работе:

1. Измерения рождение струй при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ проводились в эксперименте ATLAS при больших Δu в области $\Delta u < 8$ с ограничением $p_{\perp} > 60$ ГэВ/с, в эксперименте CMS – для $\Delta u < 9.4$ и $p_{\perp} > 35$ ГэВ/с. В какой степени ограничения по поперечному импульсу адронов $P_{\perp \min}$ при максимально возможных Δu для энергии $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ повлияют на поведение сечений (импульс $p_{\perp} > 35$ ГэВ/с, быстрота $y < 4.7$).
2. В какой степени включение полученных экспериментальных данных по сечениям при больших Δu может повлиять на результаты комбинированного анализа построения кварковых и глюонных функций распределения и функций фрагментации.
3. Могут ли механизмы образования струй (пар адронов) при разных энергиях LHC \sqrt{s} в области больших y или Δu обладать скейлинговыми свойствами по переменной x ?

4. В работе отмечается, «что для экспериментов на *ep* коллайдере HERA GLAPD эволюция удовлетворительно описывает данные вплоть до $x \sim 10^{-4}$. Феноменологический успех формализма GLAPD при столь малых x не означает, что полученные на его основе значения PDF надежны в этой области». Какие доминирующие BFKL вклады, не учитываемые GLAPD эволюцией, повысят надежность получения PDF?

В тексте диссертации присутствуют стилистические неточности и жаргонные выражения.

Заключение.

Указанные замечания не уменьшают общую положительную оценку диссертационной работы.

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» является законченной научно-квалификационной работой и 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,
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

