

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Малышева Максима Алексеевича «Процессы рождения прямых фотонов и лептонных пар в подходе k_T -факторизации квантовой хромодинамики»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – «Физика высоких энергий».

Диссертация Малышева Максима Алексеевича посвящена весьма **актуальной** проблеме исследования процессов инклюзивного и ассоциативного рождения прямых фотонов и лептонных пар на коллайдерах высоких энергий, прежде всего таких как Tevatron в Фермилабе (США) и Большой адронный коллайдер (БАК–LHC) в ЦЕРН (Швейцария), в новой кинематической области для квантовой хромодинамики (КХД), когда полная энергия соударения много больше поперечных импульсов и масс рожденных частиц, которые в свою очередь намного превышают величину масштабного КХД параметра $\Lambda_{\text{КХД}}$ (реджевский предел пертурбативной КХД). В таком кинематическом режиме наряду с стандартной КХД-эволюцией Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД), связанной с большими логарифмами поперечного импульса, должны появиться новые динамические эффекты, связанные с новой эволюцией Липатова-Фадина-Кураева-Балицкого (БФКЛ) по большим логарифмам скейлинговой переменной x . В случае образования тяжелых кварков или лептонных пар с большой эффективной массой жесткость процесса обуславливается величинами массы кварка или массы лептонной пары.

Как известно, в обычных инклюзивных жестких процессах, когда жесткость процесса сравнима с полной энергией соударения, имеются факторизационные теоремы о (коллинеарной) факторизации мягких непертурбативных (функции распределения партонов и функции фрагментации) и жестких пертурбативных вкладов (партонный подпроцесс). В более сложном случае реджевского предела пертурбативной КХД имеются на данный момент несколько модельных подходов, так как в настоящее время прямое применение общего БФКЛ подхода с реджезованными глюонами и кварками затруднено вследствие его большой сложности и громоздкости.

Один из популярных методов, используемых в настоящее время – это так называемый подход k_T -факторизации, который подразумевает факторизацию сечений на функции распределения партонов, зависящие также от поперечного импульса, (неинтегрированные функции распределения) и партонный подпроцесс вне массовой поверхности. В общем случае, калибровочно-зависимый подпроцесс с начальными партонами вне массовой поверхности в

реджевском пределе пертурбативной КХД становится в некоторых случаях калибровочно-инвариантным. Однако, к сожалению, для k_T -факторизации проблема калибровочной инвариантности для немассовых подпроцессов и функций распределений в общем случае остается. Поэтому, строго говоря, данный подход применим только для ограниченного класса партонных подпроцессов. Этот класс, в частности, не включает один из основных подпроцессов при высоких энергиях: $g^*g^* \rightarrow gg$. Как правило, для таких подпроцессов применяется феноменологический подход с использованием физической калибровки для партонного подпроцесса вне массовой поверхности.

В данной работе представлен подход k_T -факторизации пертурбативной КХД для описания процессов инклюзивного и ассоциативного рождения прямых фотонов и лептонных пар при энергиях коллайдеров, где проблема калибровочной инвариантности не играет существенной роли.

Целью данной диссертации является исследование в рамках k_T -факторизационного подхода КХД процессов инклюзивного и ассоциативного рождения прямых фотонов и рождения лептонных пар при энергиях современных коллайдеров с целью получения адекватного описания современных экспериментальных данных, а также поиска эффектов физики малых x и универсальных неинтегрированных партонных распределений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и перечня цитируемой литературы, содержащего 185 ссылок. В диссертации содержится 31 рисунок и 1 таблица. Общий объем диссертации составляет 89 страниц.

Введение содержит краткую характеристику темы исследования и обоснование ее актуальности, а также формулировку целей работы и описание структуры диссертации. В конце введения отмечается личный вклад автора в полученные результаты и обсуждается апробация работы.

В первой главе дан краткий обзор основных существующих теоретических подходов, которые используются для описания процессов в реджевском пределе пертурбативной КХД. Обсуждается связь используемого в диссертации подхода с различными эволюционными уравнениями пертурбативной КХД: ГЛАПД, БФКЛ, а также уравнениями Катани-Чиафалони Фиорани-Маркезини (КЧФМ - CCFM) и Кимбера-Мартина-Рыскина (КМР).

Вторая глава посвящена актуальному состоянию исследования процессов рождения прямых фотонов и лептонных пар на современных коллайдерах в коллинеарном приближении и k_T -факторизационном подходе КХД. Обозначена важность исследования этих процессов, кратко описана история их

экспериментального и теоретического (как в рамках стандартного коллинеарного с использованием эволюции ГЛАПД, так и k_T -факторизационного подходов) исследования. Указано, как данная работа соотносится с общим направлением современных исследований изучаемых процессов.

Третья глава посвящена вычислению сечений подпроцессов с матричными элементами вне массовой поверхности для процессов рождения прямых фотонов и лептонных пар. Представлены соответствующие диаграммы Фейнмана и выписаны амплитуды для вычисленных в рамках данной работы матричных элементов.

Для изучения инклюзивного рождения прямых фотонов в адронных соударениях при энергиях коллайдера LHC были рассмотрены следующие подпроцессы:

$$g^*q^* \rightarrow q\gamma, q^*\bar{q}^* \rightarrow g\gamma, g^*g^* \rightarrow \gamma q\bar{q}$$

В случае инклюзивного рождения прямых фотонов в глубоконеупругом рассеянии при энергиях коллайдера HERA были использованы следующие подпроцессы:

$$\gamma q \rightarrow \gamma gq, \gamma g^* \rightarrow \gamma q\bar{q}$$

Также были использованы соответствующие матричные элементы для процессов ассоциативного рождения прямых фотонов с тяжелыми кварками и процессов образования лептонных пар в подходе k_T -факторизации.

Рассматриваемые матричные элементы были представлены для случая ненулевых поперечных импульсов начальных партонов.

В **четвертой главе** приведены результаты вычислений для сечения процессов рождения прямых фотонов и лептонных пар, вычисленные в рамках k_T -факторизационного подхода КХД.

Вычисленные сечения для образования прямых фотонов в протон-протонных соударениях при энергии LHC находятся в хорошем согласии в пределах погрешностей с данными коллабораций ATLAS и CMS.

Результаты полученные для образования прямых фотонов в инклюзивном процессе и с ассоциированным образованием адронной струи при энергии коллайдера HERA также, в основном, согласуются с недавними данными коллаборации ZEUS, хотя наблюдается некоторые расхождения с данными по распределениям в зависимости от быстроты струи при использовании только подпроцессов $2 \rightarrow 2$. Применение подпроцессов $2 \rightarrow 3$ уменьшает расхождение с

данными. Расхождение возможно объясняется не только точностью применяемого теоретического подхода, но и экспериментальными и теоретическими методическими неопределенностями для данной кинематической области, где, в частности, поперечная энергия струй всего лишь несколько ГэВ.

Результаты полученные для образования прямых фотонов с ассоциированным образованием тяжелого кварка при энергии коллайдера TEVATRON также, в целом, согласуются с данными CDF и недавними данными коллаборации DØ.

Полученные результаты для образования лептонных пар на коллайдерах TEVATRON и LHC также в пределах погрешностей согласуются с данными.

Таким образом, полученные в рамках k_T -факторизационного подхода результаты для представленного класса процессов с единым набором параметров демонстрируют указания в пользу универсальности теоретического подхода.

В **заключении** сформулированы основные результаты, представленные в диссертации.

Основные результаты диссертации выносимые на защиту:

1. В рамках k_T -факторизационного подхода КХД проведены расчеты полных и дифференциальных сечений процесса инклюзивного рождения прямых фотонов при энергиях коллайдера LHC с учетом матричных элементов вне массовой поверхности для подпроцессов $qg \rightarrow \gamma q$ и $q\bar{q} \rightarrow \gamma g$. Показано, что экспериментальные данные коллабораций CMS и ATLAS на LHC могут быть описаны с помощью неинтегрированных функций распределения КМР.

2. В рамках k_T -факторизационного подхода КХД проведены расчеты полных и дифференциальных сечений процессов инклюзивного и ассоциативного рождения прямых фотонов при энергиях коллайдера HERA. С помощью функций распределения КМР и рассмотрения матричных элементов подпроцессов $2 \rightarrow 3$ совместно с вкладом от "ящичного"-подпроцесса ($\gamma g \rightarrow \gamma g$) было получено описание экспериментальных данных коллаборации ZEUS в более широкой кинематической области по сравнению с ранее изученной. Был вычислен матричный элемент вне массовой оболочки для подпроцесса $\gamma g^* \rightarrow \gamma q\bar{q}$, и было показано, что его вклад совместно с вкладом подпроцесса $\gamma q \rightarrow \gamma qg$ эффективно включают вклады от подпроцессов $2 \rightarrow 2$ в k_T -факторизационном подходе.

3. В рамках k_T -факторизационного подхода КХД проведены расчеты полных и дифференциальных сечений процессов ассоциативного рождения прямых фотонов с адронными струями от тяжелых (b и c) кварков при энергиях

коллайдера TEVATRON с учетом матричных элементов вне массовой поверхности для подпроцессов $q^*Q \rightarrow \gamma qQ$ и $q^*q\bar{q}^* \rightarrow \gamma q\bar{q}$. Было получено лучшее описание экспериментальных данных коллабораций DØ и CDF по сравнению с результатами вычислений в рамках стандартного коллинеарного подхода. Получены предсказания для сечений рассмотренных процессов при энергиях коллайдера LHC.

4. В рамках k_T -факторизационного подхода КХД проведены расчеты полных и дифференциальных сечений процесса рождения лептонных пар при энергиях коллайдеров TEVATRON и LHC с учетом матричного элемента вне массовой поверхности для подпроцесса $qg^* \rightarrow q l^+ l^-$ с обменом виртуальным фотоном и Z-бозоном. Было получено хорошее описание большого набора экспериментальных данных коллабораций CDF, DØ (TEVATRON) и CMS (LHC).

5. Было показано, что k_T -факторизационный подход описывает широкий спектр экспериментальных данных для рождения прямых фотонов и лептонных пар с двумя наборами неинтегрированных функций распределения и при одном и том же наборе параметров стандартной КХД, что указывает на универсальность подхода для представленного класса процессов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. В отличие от предыдущих работ по инклюзивному рождению прямых фотонов в адронных столкновениях, матричные элементы соответствующих партонных подпроцессов были впервые вычислены с учетом поперечных импульсов как начальных глюонов, так и кварков. Эти матричные элементы использовались в численных расчетах вместе с неинтегрированными распределениями кварков и глюонов, полученных с помощью уравнения ССФМ и формализма КМР.

2. Для ассоциативного рождения прямых фотонов со струями тяжелых кварков, а также инклюзивного и ассоциативного со струями фоторождения прямых фотонов впервые в рамках k_T -факторизационного подхода были учтены дополнительные подпроцессы более высоких порядков.

3. В случае рождения лептонных пар в рамках k_T -факторизационного подхода впервые были учтены диаграммы, включающие распад промежуточного Z-бозона.

Диссертация написана в кратком, но ясном стиле. Небольшим недостатком диссертации можно считать некоторую фрагментарность и небрежность изложения. Так, например, в автореферате не расшифровывается аббревиатура NLO и т. п., но эти недостатки не меняют ее общей высокой положительной оценки.

Диссертация является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Содержащиеся в ней многие результаты получены впервые. Ее практическая и научная ценность состоит в описании широкого набора данных уже завершенных экспериментов на ускорителях HERA (DESY, Германия), TEVATRON (Фермилаб, США) в рамках единого подхода, а также дает основу для анализа данных современных экспериментов на недавно введенным в строй LHC (ЦЕРН, Швейцария). Результаты диссертации могут быть использованы также в ПИЯФ НИЦ КИ, ИФВЭ НИЦ КИ, ИТЭФ НИЦ КИ, ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, ФИАН, ИЯИ РАН, ИЯФ СО РАН и др.

Результаты, полученные в диссертации, являются новыми и оригинальными, с достаточной полнотой опубликованы в реферируемых научных журналах, неоднократно докладывались на международных научных семинарах, совещаниях и конференциях. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат в целом верно отражает содержание диссертации.

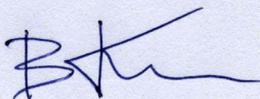
Диссертационная работа Малышева Максима Алексеевича «Процессы рождения прямых фотонов и лептонных пар в подходе k_T -факторизации квантовой хромодинамики», соответствует специальности 01.04.23 – «Физика высоких энергий» и отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, а ее автор Малышев Максим Алексеевич несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

15 мая 2014 г.

Заместитель руководителя Отделения Физики

Высоких Энергий ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ

д.ф.-м.н. Ким Виктор Тимофеевич



Подпись В.Т. Кима удостоверяю

Ученый Секретарь ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ

И.А. Зобкало

