

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Липатова Артема Владимировича

**«Жесткие процессы КХД за рамками коллинеарного приближения»
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий» (01.04.23 – «Физика высоких энергий»)**

Представленная Диссертация Липатова А.В. посвящена важнейшему вопросу при описании процессов образования частиц в физике высоких энергий, а именно учету высших порядков теории возмущений при вычислениях амплитуд соответствующих реакций.

Хорошо известно, что вычисления в низшем порядке теории возмущений (борновское приближение) позволяет получить оценку как интегральных (сечения, распады), так и дифференциальных распределений. Учет высших порядков может привести к существенному изменению вычисленных величин и получить лучшее (а, иногда и очень хорошее) согласие теоретических вычислений с результатами эксперимента. Учет таких вкладов требует проведения большого объема вычислений (как аналитических, так и численных). Поэтому развитие методов, в которых учет высших порядков (или части таких вкладов) проводится универсальным образом, не зависящим конкретного процесса, является весьма важным и перспективным.

Важным направлением, развитым автором, является описание образования кваркониев - мезонов, состоящих из тяжелых (s и b) кварков: семейства чармониев ($M(c\bar{c})$), боттомониев ($M(b\bar{b})$) и $B_c(b\bar{c})$ мезонов. Для описания свойств и механизмов образования таких частиц возможно использовать формализм нерелятивистской Квантовой Хромодинамики (КХД).

С учетом всего сказанного, **важность** и **актуальность** результатов, полученных Липатовым А.В., не вызывает сомнения.

В диссертации Липатова А.В. вычисляются сечения процессов рождения тяжелых кварков, фотонов, калибровочных W , Z -бозонов и бозона Хиггса в рамках kt -факторизованного подхода с использованием TMD (transverse momentum dependent) функций распределения глюонов при коллайдерных энергиях.

Автором используется широко применяемый подход, основанный на уравнении эволюции партонных распределений Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (BFKL) или на уравнении Катани-Чиафалони-Фиорани-Маркезини (CCFM). В таком формализме при описании процессов рождения частиц в рамках партонной модели используются TMD-функции распределения партонов в протоне (антипротоне), зависящие как от продольного импульса партона (доли импульса начального протона), так и от его поперечного импульса. Важной особенностью и преимуществом такого формализма является учет значительной части поправок следующих порядков теории возмущений обычного (коллинеарного) подхода в лидирующем логарифмическом приближении.

В рамках kt -факторизованного подхода КХД подробно рассмотрены процессы образования связанных состояний тяжелых кварков. При описании таких реакций существенным является необходимость одновременного описания данных для распределений по поперечному импульсу и поляризационных параметров J/ψ и $\psi(2S)$ мезонов (а также, поляризационных параметров $Y(nS)$ мезонов). Автором проводится детальное изучение таких реакций и достигнуто хорошее согласие теоретических вычислений с данными эксперимента.

Основной **целью** диссертации Липатова А.В. является развитие описания динамики адронных взаимодействий и методов вычислений сечений жестких процессов КХД в рамках k_T -факторизационного подхода. Представленные в диссертации результаты обладают **научной новизной**, хорошо **обоснованы** и прошли **апробацию** на различных российских и международных

конференциях. Они также были опубликованы в 42 статьях в ведущих мировых рецензируемых журналах. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. **Личный вклад** автора в работы, выполненные в соавторстве, является определяющим. **Достоверность** подтверждается использованием апробированных методов современной теоретической физики высоких энергий.

Общая характеристика диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 259 страниц, включая 115 рисунков и 11 таблиц. Список цитированной литературы содержит 448 наименований.

Введение содержит краткую характеристику тематики исследования, обосновывается ее актуальность, формулируются цели и задачи работы. Обсуждаются научная новизна и выносимые на защиту основные положения. Описывается личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве и обсуждается апробация работы.

В первой главе диссертации детально излагаются основные моменты k_T -факторизационного подхода КХД, приводится явный вид и решение различных уравнений эволюции партонных распределений в лидирующем логарифмическом приближении - уравнений BFKL, CCFM, подхода РВ и формализма KMR. В частности, представлены полученные автором функции распределения глюонов и кварков в протоне. Детально описываются методы вычисления амплитуд партонных подпроцессов вне массовой поверхности.

Во второй главе с помощью k_T -факторизационного подхода изучаются процессы рождения тяжелых кварков при высоких энергиях. Вычисляются

вклады s и b кварков в структурные функции протона $F_2(x, Q^2)$ и $F_L(x, Q^2)$. Рассматриваются процессы инклюзивного рождения b -струй, $\psi(2S)$ и J/ψ мезонов, возникающих из распада b -адронов, а также процессы одиночного рождения t -кварков в протон-протонных столкновениях на коллайдере LHC. Показано, что такие процессы позволяют непосредственно получать информацию о функции распределения глюонов в протоне. Проводится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными коллаборациями ZEUS, H1, CMS, ATLAS и LHCb на коллайдерах HERA и LHC. Предложены и изучены наборы кинематических переменных, наиболее чувствительные к выбору TMD распределений глюонов в протоне. Получена оценка вклада механизма двойного партонного рассеяния в сечение непрямого парного рождения чармониев на коллайдере LHC.

В **третьей главе** изучаются процессы рождения связанных состояний s и b кварков: S - и P -волновых чармониев, боттомониев, а также $B_c(bc)$ мезонов на коллайдерах Tevatron и LHC. С использованием формализма нерелятивистской КХД вычисляются полные и дифференциальные сечения этих процессов, производится определение численных значений соответствующих непертурбативных матричных элементов. Проведены вычисления распределений по поперечному импульсу чармониев (J/ψ , $\psi(2S)$, η_c , χ_c) и боттомониев $Y(nS)$ и χ_b отношения их сечений, а также поляризационные наблюдаемые, находящиеся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Получена оценка величины волновой функции B_c мезонов из анализа экспериментальных данных по отношению сечений рождения B_c и B^+ мезонов.

Четвертая глава посвящена исследованию процессов рождения прямых фотонов и калибровочных бозонов в сопровождении адронных струй. В **пятой главе** изучаются процессы рождения бозона Хиггса на коллайдере LHC. В обеих главах вычисляются полные и дифференциальные сечения указанных

процессов. Описание таких процессов за счет глюон-глюонной аннигиляции производится в рамках k_T -факторизационного подхода. Вклад подпроцессов с участием кварков в начальном состоянии, существенных в области достаточно больших поперечных импульсов, производится в рамках обычного коллинеарного приближения. Показано хорошее согласие теоретических вычислений с данными экспериментов.

В шестой главе описывается Монте-Карло генератора событий PEGASUS, разработанного автором диссертации и его коллегами. Этот генератор предназначен для проведения расчетов сечений целого ряда процессов КХД в протон-протонных или протон-антипротонных столкновениях при высоких энергиях с учетом TMD динамики партонных распределений. Детально описаны алгоритмы генерации событий, выборы параметров, процедуры установки, запуска и работа с генератором PEGASUS. Развитый генератор обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с аналогичными программами (Монте-Карло генераторами CASCADE и KaTie).

В заключении приводятся полученные автором результаты, среди которых можно выделить следующие:

1. Предложенные две новые TMD функции распределения глюонов в протоне, полученные с помощью численного решения уравнения эволюции CCFM, а также аналитически решения в рамках подхода KMR.
2. В рамках k_T -факторизационного подхода КХД достигнуто вычислены сечения процессов рождения одной или двух b -струй, процессов одиночного и парного рождения $\psi(2S)$ и J/ψ мезонов (от распадов b -адронов) находящиеся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными на коллайдере LHC.
3. Определены значения непертурбативных матричных элементов η_c , $\psi(2S)$, J/ψ и χ_c мезонов из экспериментальных данных LHC для некоторых TMD

функций распределения глюонов. Разработанный автором подход позволяет достичь самосогласованного описания как распределений по поперечному импульсу всего семейства чармониев, так и их поляризационных наблюдаемых. Достигнуто хорошее согласие предсказаний k_T -факторизационного подхода КХД с экспериментальными данными (отношения сечений и поляризационные характеристики) для процессов инклюзивного рождения различных S - и P -волновых кваркониев, полученных на коллайдерах Tevatron и LHC.

4. Показано, что предсказания k_T -факторизационного подхода КХД (с учетом вычисленных в рамках коллинеарного приближения вкладов подпроцессов, включающих кварки в начальном состоянии) находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными LHC для широкого ряда процессов высоких энергий: реакции рождения фотонов или калибровочных бозонов в сопровождении адронных струй или тяжелых (c или b) кварков, процессов одиночного рождения t -кварков, процессов инклюзивного и ассоциативного (в сопровождении струй адронов) рождения бозонов Хиггса.
5. Показано, что значительная часть поправок высших порядков теории возмущений КХД может быть учтена с помощью TMD функций распределения глюонов, полученных из решений уравнения эволюции CCFM, что позволяет воспроизвести результаты традиционных вычислений с учетом поправок высших порядков в рамках коллинеарного приближения КХД
6. Разработан новый в Монте-Карло генератор событий PEGASUS предназначенный для вычислений сечений различных жестких процессов КХД с учетом TMD динамики глюонных распределений. Отличительными особенностями генератора являются включенные в генератор амплитуды различных подпроцессов для начальных партонов вне массовой поверхности. Отметим, что некоторые из включенных в PEGASUS подпроцессов отсутствуют в других генераторах.

К **замечаниям** можно отнести следующие:

На стр. 19 при описании структуры Диссертации «сбита» нумерация глав: *"В первой главе ..."* и т.д. Должно быть *"во ВТОРОЙ главе..."* и т.д.

На стр. 22 в уравнении (7) в правой части должно стоять 1 а не 0 (это уравнение выражает закон сохранения импульса). На стр. 11 в предложении *«Дело в том, что непертурбативные матричные элементы J/ψ и η_c мезонов связаны ...»* есть смысл указать ссылку.

В **главе 3** на стр. 58 указаны значения масс кварков: *«Так, следуя [216], использовались следующие значения: $m_c=1.5 \text{ GeV}$, $m_b=4.75 \text{ GeV}$, ...»*. Но в ссылке [216] указаны другие значения, например, $m_c=1.27 \text{ ГэВ}$ и т.д.

На стр. 66 не ясно, что значит *«b-кварк, возникающий в конечном состоянии, определяет кинематику соответствующей b-струи»*. По-видимому, при сравнении с экспериментальными данными импульс b-струи полагался равным импульсу b-кварка. В этой же главе при описании рождения b-кварков имеет смысл указать, что эти вычисления применимы при небольших значениях суммарного поперечного импульса пары $b\bar{b}$ кварков. Для корректного описания образования пары с большими $p_T(b\bar{b})$ следует учитывать следующие порядки теории возмущений (например, излучение жесткого глюона).

В **главе 4** на стр. 91 указано, что *«... переход пары кварков в ... кварконий Q...»* происходит с *«с испусканием одного или нескольких ... глюонов ...»*. Но, в формуле (122) первое слагаемое отвечает переходу без излучения глюона.

При описании образования кваркониев (чармониев χ_{c1} и χ_{c2} , а также B_c мезонов) очень важными параметрами являются значения волновых функций этих состояний. Автор подробно обсуждает эти вопросы. Однако, следует отметить, что полученные значения волновых функций в несколько раз (5-10) превышают значения, полученные из анализа других данных (например, из распадов мезонов χ_{c1} и χ_{c2} на адроны или из численного решения уравнения Шредингера). Обсуждению этого момента следовало бы уделить особое

внимание. Иначе, полученные автором значения можно трактовать как параметры модели образования кваркониев.

В **главе 5** на стр. 147 в предложении «... при вычислении амплитуды вне массовой поверхности для подпроцесса (190) необходимо, ... диаграммы, в которых начальные виртуальные глюоны излучаются **протонами**, ...» по-видимому «протонами» следует заменить на «кварками».

В **главе 6** на стр. 173 используется не стандартное обозначение для константы Ферми (C_F вместо стандартного G_F). В этой же главе возникает вопрос о применении эффективной вершины $gg H$. Как отмечает автор, «в пределе $m_t \rightarrow \infty$... треугольная петля ... заменяется эффективной вершиной взаимодействия». Не ясно, каким образом и на сколько виртуальность начальных глюонов может изменить эту эффективную вершину?

При обсуждении распределений по поперечным импульсам бозона Хиггса и струй было бы полезно привести отношения распределений вычисленных автором и результатов NNLO + NNLL вычислений.

В **главе 7** при описании процессов на стр. 195, в отличие от Таблицы 10, не указан топ-кварк (например, для процессов рождения тяжелых кварков указано $Q = c, b$ см. стр.195). При описании алгоритма вычислений, не ясно, используется программа VEGAS при генерации невзвешенных событий.

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

В целом диссертация Липатова А.В. представляет законченное научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне. Материал излагается подробно, основные научные предположения хорошо обоснованы, приведены подробные выводы необходимых формул и выражений. Результаты, полученные Липатовым А.В, являются вполне достоверными и обоснованными. Их научная новизна и значимость также не вызывает сомнений.

Материалы диссертации опубликованы в высокорейтинговых журналах,

индексируемых в базах данных SCOPUS и WEB OF SCIENCE, и в тезисах докладов на международных научных конференциях. Представленные в диссертации результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Автореферат написан хорошим языком, материал излагается последовательно и в достаточном для понимания объеме.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.3.15 - «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (01.04.23 – «Физика высоких энергий»), а также критериям, определенным пп. 2.1 - 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Липатов Артем Владимирович без сомнения **заслуживает** присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.3.15 - «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (01.04.23 - «Физика высоких энергий»).

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Отделения экспериментальной физики
НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

Слабоспицкий Сергей Ростиславович

Контактные данные:

Тел.: +7(965)305-4605; e-mail: Sergei.Slabospitskii@ihep.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.02 — «теоретическая и математическая физика»,
доктор физико-математических наук

Адрес места работы:

142281, Московская область, г. Протвино, Площадь науки, 1

Тел. +7(4967)713623; e-mail: fgbu@ihep.ru

Подпись Слабоспицкого С.Р. заверяю

Н.Н. Прокопенко

Ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ