

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор —

проректор по науке и инновациям
доктор технических наук, профессор

А. Б. Прокофьев



«14» 01 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Диссертация «Парные корреляции в жёстких процессах при высоких энергиях в подходе реджезации партонов», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика, выполнена Карпишковым Антоном Витальевичем на кафедре физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

В 2014 году соискатель Карпишков Антон Витальевич, 1992 г. рождения, окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет»¹ по специаль-

¹На основании приказа Министерства образования и науки РФ № 608 от 22 июня 2015 г. федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет» реорганизован в форме присоединения к федеральному государственному автономному образовательному учреждению высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)».

На основании приказа Министерства образования и науки РФ № 379 от 6 апреля 2016 г. федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» переименован в федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (сокращённое название — Самарский университет).

ности 010701.65 — «Физика» с присвоением квалификации «Физик».

В период подготовки диссертации соискатель Карпишков А. В. с 2014 г. по 2018 г. обучался в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по специальности 01.04.02 — теоретическая физика, а также работал в должности лаборанта-исследователя НОЦ ФНОС-73 Самарского университета.

Справка №169 о сдаче кандидатских экзаменов выдана 15 Ноября 2018 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», справка №125-а об обучении в аспирантуре выдана 15 Ноября 2018 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Салеев Владимир Анатольевич, профессор кафедры физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

По результатам рассмотрения диссертации Карпишкова А. В. На тему «Парные корреляции в жёстких процессах при высоких энергиях в подходе реджезации партонов» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика, на расширенном заседании кафедры физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», протокол № 5 от 25 Декабря 2018 года, принято следующее заключение.

Актуальность темы. С ростом энергии ускорителей открываются новые возможности для исследования свойств сильных взаимодействий и кварк-глюонной структуры адронов в процессах множественного рождения частиц и адронных струй с большими поперечными импульсами. Изучение корреляций в спектрах рождённых частиц позволяет прецизионным образом проверить результаты предсказаний квантовой хромодинамики (КХД) в старших порядках теории возмущений по константе сильного взаимодействия.

Традиционно, для описания жёстких процессов используется коллинеарная партонная модель (КПМ), основанная на теореме факторизации эффектов физики больших и малых расстояний или, соответственно, на факторизации непертурбативных и пертурбативных эффектов. Масштаб факторизации жёсткого процесса μ_F задаётся большим поперечным импульсом конечных частиц, $\mu_F \sim p_{TY}$, а факторизационная формула имеет вид:

$$d\sigma(p(P_1)+p(P_2) \rightarrow Y+X) = \sum_{i,j} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 f_i(x_1, \mu_F^2) f_j(x_2, \mu_F^2) d\hat{\sigma}_{CPM}^{i,j}(x_1, x_2, \mu_F^2, \mu_R^2), \quad (1)$$

где μ_R — масштаб перенормировки бегущей константы связи $\alpha_s(\mu_R)$, $f_i(x, \mu_F^2)$ — функция распределения (ФР) i -го партона, а $d\hat{\sigma}_{CPM}^{i,j}(x_1, x_2, \mu_F^2, \mu_R^2)$ — сечение партонного подпроцесса $i(q_1) + j(q_2) \rightarrow Y$. Коллинеарные ФР партонов, которые зависят только от продольных компонент импульсов сталкивающихся адронов, подчиняются уравнениям Докшицера-Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи (ДГЛАП), описывающим эволюцию партонных ФР при испускании многочисленных мягких глюонов или кварков.

Область обоснованного применения КПМ — это одномасштабные жёсткие процессы, для которых факторизационная формула выполняется с точностью до степенных поправок порядка $1/\mu_F^2$. Однако, с ростом энергии существенно возрастает доля процессов, в которых наблюдается множественное рождение жёстких партонов. Для их описания в КПМ требуется нетривиальное вычисление старших поправок по теории возмущений КХД, как виртуальных, так и реальных, связанных с испусканием нескольких дополнительных партонов.

В области высоких энергий, когда $\sqrt{S} \gg \mu_F$, в т. н. реджевском пределе КХД, учет испускания жёстких дополнительных партонов может быть проведен в рамках подхода k_T -факторизации, когда формула факторизации записывается для зависящих от поперечного импульса партонов ФР и жёсткого сечения рассеяния с немассовыми начальными кварками или глюонами. Последнее автоматически приводит к нарушению калибровочной инвариантности амплитуд жёсткого процесса, что является проблемой для использования подхода в феноменологии жёстких процессов при высоких энергиях.

В диссертации развивается, предложенный ранее в работах Салеева В. А., Шипиловой А. В. и Нефёдова М. А., подход реджезации партонов (ПРП), который основан на универсальном свойстве реджезации t -канальных партонов при высоких энергиях (БФКЛ-факторизация амплитуд), факторизации при высоких энергиях или k_T -фактори-

зации жёстких адронных сечений и эффективной теории поля реджезованных кварков и глюонов Л. Н. Липатова. Теоретическая строгость подхода обусловлена выполнением условий калибровочной инвариантности, причинности и аналитичности амплитуд и полученных из них сечений процессов в эффективной теории поля реджезованных партонов. Последнее делает возможным проведение феноменологически интересных расчётов конкретных процессов в k_T -факторизации, как в лидирующем, так и в следующем за лидирующим порядке теории возмущений по константе сильного взаимодействия.

Целью настоящей работы является развитие методов расчёта многочастичных процессов в лидирующем приближении (ЛП) и следующем за лидирующим приближении (СЛП) по константе сильного взаимодействия в подходе реджезации партонов для описания парных корреляций в рождении частиц при высоких энергиях.

Основные результаты, полученные в диссертации и их **научная новизна**:

1. Впервые показано, что в рождении пар DD доминирует вклад партонного процесса глюон-глюонного рассеяния $\mathcal{R}\mathcal{R} \rightarrow gg$ с последующей фрагментацией глюонов в D мезоны.
2. В рамках ПРП впервые была рассчитана СЛП поправка к партонному подпроцессу $\mathcal{R}\mathcal{R} \rightarrow b\bar{b}$ от подпроцесса с дополнительным глюоном в конечном состоянии $\mathcal{R}\mathcal{R} \rightarrow b\bar{b}g$. Показано, что её вклад доминирует в области малой разницы азимутальных углов струй, содержащих B мезоны, и позволяет описать данные CMS коллаборации при всех значениях $\Delta\phi$ и ΔR .
3. Впервые были получены точные аналитические выражения для квадратов модулей реджезованных спиральных амплитуд процессов $\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow (b + \bar{b})[\rightarrow \Upsilon[n]] + g$ и $\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow (b + \bar{b})[\rightarrow \Upsilon[n]] + c + \bar{c}$.
4. В рамках ПРП, без привлечения гипотезы о двойном партонном рассеянии, впервые описаны спектры совместного рождения Υ и D мезонов, полученные коллаборацией LHCb.
5. Впервые в ПРП получены амплитуды и квадраты модулей амплитуд всех древесных КХД-подпроцессов $2 \rightarrow 3$ с фотоном в конечном состоянии. С их помощью описаны спектры для ряда процессов совместного рождения фотона с одной или двумя струями на ускорителях Tevatron и LHC.

Практическая значимость исследования состоит в том, что полученные в ПРП амплитуды процессов $2 \rightarrow 3$ с реджезованными кварками и глюонами в начальном состоянии могут быть использованы в дальнейших исследованиях жёстких процессов с рождением трёхчастичных конечных состояний, а также для вычислений радиационных поправок для процессов $2 \rightarrow 2$ в ПРП. Полученные в ПРП амплитуды процессов совместного рождения кваркониев с тяжёлыми кварками или глюоном, а также фотонов с кварками или глюонами, могут быть использованы для разработки Монте-Карло генераторов событий в модели k_T -факторизации, широко применяющихся для получения феноменологических предсказаний в физике высоких энергий.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением калибровочно-инвариантного подхода при построении квадратов модулей амплитуд партонных процессов в реджеском пределе КХД. Целостность ПРП обусловлена использованием формулы факторизации и нПФР КМР, построенными в мультiredжеской кинематике, что также находится в согласии с применяемыми матричными элементами в эффективной теории поля Л.Н. Липатова, эквивалентными мультiredжеской асимптотике матричных элементов КХД. Была проверено, что амплитуды процессов, рассмотренных в данной работе, удовлетворяют условию калибровочной инвариантности, а также воспроизводят в коллинеарном пределе амплитуды КПМ.

Личный вклад соискателя состоит в том, что все полученные результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором или при его определяющем участии. Кроме того, автор в аналитическом виде в ПРП получил амплитуды многих процессов $2 \rightarrow 3$, применяемых при описании рождения фотона и струй, а также совместного рождения тяжёлых мезонов. Автором была проверена калибровочная инвариантность этих амплитуд, а также выполнение коллинеарного предела для них.

Публикации автора по теме диссертации По теме диссертационной работы опубликовано 15 работ, в том числе: 10 — в журналах, рекомендованных ВАК; 3 — в сборниках трудов международных симпозиумов и конференций; 2 работы, опубликованные в виде препринтов.

Публикации автора по теме диссертации

1. Карпишков А. В., Нефёдов М. А., Салеев В. А., Шипилова А. В., *Рождение D -мезонов на большом адронном коллайдере в реджеском пределе КХД*, IV меж-

дународная конференция «Математическая физика и её приложения» (25.08.14 - 01.09.14, Самара), 2014, ISBN 978-5-7964-1737-9.

2. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, Open charm production in the parton Reggeization approach: Tevatron and the LHC, Phys.Rev. D 91 no.5, 054009, 2015, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.054009>.
3. Карпишков А. В., Нефёдов М. А., Салеев В. А., Шипилова А. В., *Рождение D и B мезонов на Большом Адронном Коллайдере в реджевском пределе квантовой хромодинамики*, Тезисы докладов международной сессии-конференции ядерной физики ОФН РАН «ФИЗИКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ», 2014, ISBN 978-5-7262-2032-1.
4. Карпишков А. В., Нефёдов М. А., Салеев В. А., Шипилова А. В., Рождение D -мезонов на большом адронном коллайдере в реджевском пределе КХД, Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2015. Т. 19, № 3. С. 441-461, doi: 10.14498/vsgtu1402.
5. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, B -meson production in the Parton Reggeization Approach at Tevatron and the LHC, Int.J.Mod.Phys. A 30 no.04n05, 1550023, 2015, <https://doi.org/10.1142/S0217751X15500232>.
6. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, B -meson production at Tevatron and the LHC in the Regge limit of quantum chromodynamics, Physics of Atomic Nuclei, 2016, Vol. 79, No. 2, pp. 275-277, doi: 10.1134/S1063778816020095.
7. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, D -meson production at the tevatron and LHC in the parton Reggeization approach, AIP Conference Proceedings 1701, 050023 (2016), 2016, doi: 10.1063/1.4938663.
8. A. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, $D\bar{b}D$ and DD pair production at the LHCb in the parton Reggeization approach, PoS DIS2016 (2016) 125, 2016, doi: 10.22323/1.265.0125.
9. V. Karpishkov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, Large- p_T production of D mesons at the LHCb in the parton Reggeization approach, Phys. Rev. D 94 (2016) no.11, 2016, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.114012>.

10. A. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, *Heavy quark production at the LHC in the Parton Reggeization Approach*, Proceedings of the Helmholtz International Summer School 2016 (HQ 2016), 2017, doi: 10.3204/DESY-PROC-2016-04/Saleev.
11. A. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, *Hard processes at high energies in the Reggeized-parton approach*, Physics of Particles and Nuclei 48, 827 (2017), 2017, doi: 10.1134/S1063779617050227.
12. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, $B\bar{B}$ angular correlations at the LHC in the parton Reggeization approach merged with higher-order matrix elements, Phys. Rev. D 96(9), 096019 (2017), 2017, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.096019>.
13. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, Angular correlations in $B\bar{B}$ pair production at the LHC in the parton Reggeization approach, EPJ Web of Conferences 158, 03010 (2017), 2017, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715803010>, 5.331.
14. A. V. Karpishkov, V. A. Saleev, A. V. Shipilova, *Angular decorrelations in $\gamma + 2jet$ events at high energies in the parton Reggeization approach*, arXiv:1811.06942 [hep-ph], 2018.
15. A. V. Karpishkov, M. A. Nefedov, V. A. Saleev, *Correlation observables in ΥD pair production at the LHC within the parton Reggeization approach*, arXiv:1811.06733 [hep-ph], 2018.

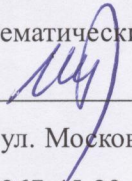
Диссертационная работа Карпишкова А. В. является фундаментальным исследованием, выполненным на современном научно-методическом уровне, в диссертации развивается подход, направленный на описание жёстких процессов с несколькими энергетическими масштабами, описание которых в рамках обычной КПМ приводит к большим радиационным поправкам за пределами ЛП. Диссертация написана чётким языком, хорошо оформлена, она полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа «Парные корреляции в жёстких процессах при высоких энергиях в подходе реджезации партонов» Карпишкова Антона Витальевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика.

Заключение принято на заседании кафедры физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева». Присутствовало на заседании 28 человек, в том числе 5 человек без ученой степени. В голосовании участвовали 23 человека, имеющих ученую степень (7 докторов и 12 кандидатов физико-математических наук, 1 доктор и 1 кандидат технических наук, 2 кандидата педагогических наук).

Результаты голосования: «за» – 28 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет. «25» Декабря 2018 г., протокол № 5.

Заведующий кафедрой физики Самарского университета,
доктор физико-математических наук, профессор



Завершинский Игорь Петрович
443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34, Корпус 3, к. 305
Телефон: +7 (846) 267-45-29
Email: ipzav63@mail.ru