

УТВЕРЖДАЮ  
Директор  
НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ  
академик РАН С. В. Иванов

11 ноября 2020 г.

## Отзыв ведущей организации

федерального государственного бюджетного учреждения “Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра “Курчатовский Институт” на диссертацию Молокоедова Виктора Сергеевича “Эффекты высших поправок теории возмущений в КХД и их теоретические и феноменологические следствия”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Диссертация посвящена изучению поведения рядов теории возмущений в квантовой хромодинамике для различных физических величин, измеряемых в существующих экспериментах, в зависимости от выбора калибровочно-инвариантных и неинвариантных схем перенормировок, а также выявлению характерных особенностей, к которым приводит выбор той или иной процедуры устранения ультрафиолетовых расходимостей. Тематика, связанная с исследованием калибровочной зависимости в различных квантово-полевых моделях имеет давнюю историю. Стоит особо выделить определяющие вклады Л.Д. Ландау, Р. Фейнмана, Н.Н. Боголюбова, Д.В. Ширкова и А.А. Логунова в эту тему. В связи с возможностью получения более детальной информации о величине теоретических неопределённостей, вносимых схемной и калибровочной зависимостью в характеристики физических процессов, современные задачи их прецизионных измерений на ускорительных комплексах оставляют вопрос об исследовании данных зависимостей весьма актуальным как у теоретиков, так и у экспериментаторов. Рассмотрению именно этого вопроса в диссертации уделено большое внимание.

Не менее интересной темой является изучаемое в диссертации асимптотическое поведение рядов теории возмущений. Предсказанное ещё Ф. Дайсоном и исследованное в работах Л.Н. Липатова, К. Ициксона, Ж. Зюбера, Ж. Зинн-Жюстена, Е.Б. Богомольного и В.А. Фатеева, впоследствии вызвало новый интерес и новое понимание структуры рядов теории возмущений в квантовой хромодинамике для величин, определённых в евклидовой области энергий. Этот “новый” подход, базирующийся на гипотезе о ренормальной доминантности, был предложен ещё в работах Г. т’Хоофта и Д. Паризи, и в дальнейшем развит в работах В.И. Захарова, М. Бенеке, В.М. Брауна и других. Он исследуется в диссертации применительно к соотношению между полюсными и бегущими массами тяжёлых кварков. Интерес к изучению величин вкладов высших поправок теории возмущений к данному соотношению объясняется прежде всего тем, что для  $b$ , и в особенности для  $s$ -кварка,

асимптотический характер этого соотношения проявляется уже в порядках, где были произведены непосредственные диаграммные вычисления. С точки зрения современных прецизионных исследований связанных состояний тяжёлых кварков информация о том, насколько быстро асимптотический характер ряда теории возмущений для соотношения между полюсными и бегущими массами начнёт проявляться, играет важную роль, поскольку отсюда можно сделать вывод о том, понятие какой массы тяжёлого кварка предпочтительнее использовать в конкретных феноменологически ориентированных исследованиях.

Рассмотрению этих вопросов и посвящена настоящая диссертация. Она состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений, четырёх приложений и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, её основные цели, научная новизна и практическая значимость.

Первая глава диссертации посвящена изучению зависимости от выбора схем перенормировки и калибровочного параметра  $\xi$  вкладов теории возмущений для  $R(s)$ -отношения  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны и правила сумм Бьёркена процесса глубоконеупругого рассеяния заряженных лептонов на поляризованных нуклонах в четвёртом порядке ТВ. Стоит отметить, что, например,  $R$ -отношение продолжает извлекаться из экспериментальных данных коллайдера ВЭПП-2000, расположенного в Новосибирске, и поэтому его схемная и калибровочная зависимости при сравнительно небольших энергиях играют важную роль для фиксации теоретических неопределённостей при их последующем возможном сравнении с экспериментальными данными. В качестве схем, отличных от класса схем минимальных вычитаний (MS), рассматриваются калибровочно-инвариантная V-схема, связанная с видом статического кулоновского потенциала КХД, а также одна из калибровочно-неинвариантных схем импульсных вычитаний с учётом явной зависимости от калибровочного параметра  $\xi$ . Впервые демонстрируется уменьшение калибровочной зависимости ряда ТВ для  $R$ -отношения с ростом числа учтённых радиационных поправок от второго к четвёртому порядку. Показано в явном виде, что, начиная с третьего порядка теории возмущений, кулоновский потенциал КЭД выражается не только через инвариантный заряд, но и содержит поправку, связанную с проявлением эффектов рассеяния света на свете в статическом потенциале.

Во второй главе в классе схем импульсных вычитаний исследуется статус обобщённого соотношения Крютера, являющегося одним из следствий нарушения конформной симметрии процедурой перенормировок в безмассовой КХД. Данное соотношение в левой своей части содержит произведение рядов теории возмущений для функции Адлера и Бьёркена, а в правой – константный член, связанный с амплитудой распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ , и вклад, пропорциональный  $\beta(\alpha_s)$ -функции КХД, нарушающий конформную симметрию и проявляющийся начиная с двухпетлевого уровня. Значение константного члена служит подтверждением того, что кварки имеют три цвета – квантового числа, которое было введено в ряде пионерских работ Н.Н. Боголюбова, Б.В. Струминского и А.Н. Тавхелидзе и независимо М. Ханом и Й. Намбу в 1965 году. Показано, что в классе схем импульсных вычитаний в третьем порядке теории возмущений факторизация  $\beta$ -функции в члене, нарушающем конформную симметрию, возможна лишь при двух значениях калибровочного параметра  $\xi = 0, -3$ , а в четвёртом порядке только для калибровки Ландау  $\xi = 0$ . Делается вывод, что, если обобщённое соотношение Крютера будет справедливым в MS-подобных схемах во всех порядках ТВ (на что есть теоретические указания), то оно также останется справедливым во всех порядках и в классе

произвольных калибровочно-неинвариантных схем импульсных вычитаний в калибровке Ландау.

В третьей главе исследуется асимптотическое поведение рядов теории возмущений для соотношения между полюсными и бегущими в  $\overline{\text{MS}}$ -схеме массами тяжёлых кварков в КХД. При помощи различных теоретических методов демонстрируется, что в случае  $b$ -кварка асимптотический характер данного соотношения проявляется в четвёртом порядке ТВ (оцененная в диссертации пятая поправка больше четвёртой, а четвёртая близка по величине к третьей), а для  $t$ -кварка не наблюдается даже на шестипетлевом уровне. Дальнейший анализ приводит к тому, что для  $t$ -кварка асимптотическое поведение рассматриваемого соотношения проявится лишь после седьмого порядка ТВ, где факториальный рост коэффициентов начнёт доминировать над эффектом степеней относительно малой константы связи. Таким образом, делается вывод о существенном отличии в поведении рядов теории возмущений для соотношения между полюсными и бегущими массами  $s$  и  $b$ -кварка от случая  $t$ -кварка. Действительно, для  $s$  и  $b$ -кварка асимптотическая структура исследуемого соотношения проявляется во втором и четвёртом порядке соответственно, а, следовательно, в феноменологически ориентированных задачах в этих порядках целесообразнее использовать их бегущие массы. В случае  $t$ -кварка можно использовать понятия как полюсной, так и бегущей массы при обработке современных экспериментальных данных Большого Адронного Коллайдера, в которых, однако, в настоящее время учитываются лишь двухпетлевые эффекты КХД.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

Некоторые замечания и пожелания:

- При исследовании соотношения между полюсными и бегущими массами кварков в третьей главе диссертации неплохо было бы хотя бы упомянуть и о других часто используемых в физике элементарных частиц понятиях масс кварков, например, о конституентных массах, часто встречающихся при изучении спектроскопии связанных состояний тяжёлых кварков в рамках потенциальных моделей. Также представляется интересным установить возможную хотя бы качественную связь между этими различными понятиями масс кварков.
- С теоретической точки зрения полезно было бы выяснить, справедливо ли представление о том, что с ростом масштаба перенормировки значения калибровочного параметра  $\xi$  вне зависимости от начальной нормировочной точки могут стремиться к значению  $\xi = 0$ , т.е. к калибровке Ландау.
- Было бы интересно узнать, можно ли связать довольно рано проявляющийся асимптотический характер соотношения между полюсными и бегущими массами  $b$ , и в особенности  $s$ -кварка, с существованием эффектов пертурбативной природы.
- В качестве пожелания на будущее, представляет особый интерес проверка высказанной в диссертации гипотезы о том, что аномальное соотношение для следа тензора энергии-импульса безмассовой КХД может быть справедливым помимо  $\overline{\text{MS}}$ -схемы также и в классе калибровочно-неинвариантных схем импульсных вычитаний в калибровке Ландау.

В целом, представленная к защите диссертация является вполне законченным теоретическим исследованием по актуальной тематике. Диссертация написана на понятном и хорошем русском языке. Приведённые выше замечания и вопросы ни в коей мере не умаляют значимости работы.

Представленные основные результаты диссертации являются новыми. Большая часть из них была своевременно опубликована в высокорейтинговых рецензируемых журналах и неоднократно цитировалась как российскими, так и зарубежными специалистами. Этот факт подтверждает научную ценность и новизну полученных результатов, которые были апробированы в докладах автора на многочисленных конференциях и семинарах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Всё вышесказанное позволяет заключить, что диссертация “Эффекты высших поправок теории возмущений в КХД и их теоретические и феноменологические следствия” полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор Молокоедов Виктор Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация была заслушана и одобрена на семинаре Отдела теоретической физики НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ.

Отзыв составил

главный научный сотрудник Отдела теоретической физики ИФВЭ,  
доктор физико-математических наук, профессор

А. К. Лиходед

Начальник Отдела теоретической физики ИФВЭ,  
доктор физико-математических наук, профессор

В. А. Петров

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение “Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра “Курчатовский Институт”

142281, Московская обл., г. Протвино, площадь Науки, д.1

тел. (4967) 71-36-23, e-mail: fgbu@ihep.ru

Список основных публикаций сотрудников структурного подразделения НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ по теме диссертации за последние 5 лет:

1. I. Azhgirey, I. Bayshev, S. Bitioukov, V. Kachanov, D. Konstantinov, P. Mandrik, V. Petrov, R. Ryutin, S. Slabospitskii, A. Sobol, S. Troshin, N. Tyurin, A. Uzunian, A. Volkov, Determination of the strong coupling constant  $\alpha_S(m_Z)$  from measurements of inclusive  $W^\pm$  and  $Z$  boson production cross sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV, CMS Collaboration (Albert M Sirunyan (Yerevan Phys. Inst.) et al.). 45 pp. JHEP **06**, 018 (2020).
2. I. Azhgirey, I. Bayshev, S. Bitioukov, V. Kachanov, D. Konstantinov, P. Mandrik, V. Petrov, R. Ryutin, S. Slabospitskii, A. Sobol, S. Troshin, N. Tyurin, A. Uzunian, A. Volkov, Running of the top quark mass from proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, CMS Collaboration (Albert M Sirunyan (Yerevan Phys. Inst.) et al.). 24 pp. Phys. Lett. B **803**, 135263 (2020).
3. I. Azhgirey, I. Bayshev, S. Bitioukov, D. Elumakhov, A. Godizov, V. Kachanov, A. Kalinin, D. Konstantinov, P. Mandrik, V. Petrov, R. Ryutin, A. Sobol, S. Troshin, N. Tyurin, A. Uzunian, A. Volkov, Measurement of the top quark mass with lepton+jets final states using p p collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, CMS Collaboration (Albert M Sirunyan (Yerevan Phys. Inst.) et al.). 27 pp. Eur. Phys. J. C **78**, no.11, 891 (2018).
4. V.A. Petrov, Asymptotic Hadron Scattering Regimes in QCD, Theor. Math. Phys. **200**, no.2, 1171-1175 (2019).
5. A.V. Berezhnoy, I.N. Belov, A.K. Likhoded and A.V. Luhinsky,  $B_c$  excitations at LHC experiments, Mod. Phys. Lett. A **34**, no.40, 1950331 (2019).
6. A.V. Berezhnoy, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, Doubly heavy baryons at the LHC, Phys. Rev. D **98**, no.11, 113004 (2018).
7. V.V. Kiselev, A.V. Berezhnoy and A.K. Likhoded, Quark–Diquark Structure and Masses of Doubly Charmed Baryons, Phys. Atom. Nucl. **81**, no.3, 369-372 (2018).
8. A.V. Berezhnoy, A.K. Likhoded, A.I. Onishchenko and S.V. Poslavsky, Next-to-leading order QCD corrections to paired  $B_c$  production in  $e^+e^-$  annihilation, Nucl. Phys. B **915**, 224-242 (2017).
9. A.K. Likhoded, A.V. Luchinsky and S.V. Poslavsky, Production of heavy quarkonia in hadronic experiments, JETP Lett. **105**, no.11, 739-751 (2017).
10. V.G. Bornyakov, E.M. Ilgenfritz, C. Litwinski, V.K. Mitrjushkin and M. Muller-Preussker, Landau gauge ghost propagator and running coupling in SU(2) lattice gauge theory, Phys. Rev. D **92**, no.7, 074505 (2015).