



МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА  
(МГУ)

Ленинские горы, д. 1, Москва,  
ГСП-1, 119991  
Тел.: 939-10-00  
Факс: 939-01-26

*11.09.2022 № 495-20/013-03*  
На № \_\_\_\_\_

Ученому секретарю  
диссертационного  
совета Д 003.016.02  
при ИЯФ СО РАН  
чл.-корр. РАН

**В.С. Фадину**

Глубокоуважаемый Виктор Сергеевич!

В ответ на Вашу просьбу от 23.06.2020 № 15311-10/6215.1-888 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова направляет Вам официальный отзыв нашей организации о диссертации **Грабовского Андрея Владимировича** «**Развитие методов исследования эффектов больших глюонных плотностей в КХД**», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Отзыв подготовлен в Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скobel'цына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Проректор  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
профессор

А.А. Федянин



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор  
Московского государственного  
университета  
имени М.В.Ломоносова  
профессор

*Федянин*  
А.А.Федянин

2020 г.



ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" на диссиерацию Грабовского Андрея Владимировича "Развитие методов исследования эффектов больших глюонных плотностей в КХД", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Квантовая хромодинамика является основой современных представлений о физике сильных взаимодействий и составной частью Стандартной Модели, подтвержденной огромным количеством экспериментальных данных. Она необходима для понимания любых процессов, изучаемых на современных ускорителях при высоких энергиях. Важнейшая черта квантовой хромодинамики — явление асимптотической свободы, которое позволяет использовать теорию возмущений для описания жестких процессов, то есть процессов с характерным масштабом  $Q^2$ , для которых константа связи  $\alpha_s(Q^2) < 1$ .

При описании полужестких процессов, то есть процессов с малыми долями продольных импульсов  $x = Q^2/s \ll 1$  (где  $s$  — квадрат энергии в системе центра масс), ряды теории возмущений содержат большие логарифмы  $\ln \frac{1}{x}$ , что приводит к необходимости суммировать все усиленные члены ряда для  $\alpha_s(Q^2) \ln \frac{1}{x} \sim 1$ . Такое суммирование проводится с помощью уравнений эволюции по быстроте ( $\ln \frac{1}{x}$ ) для функций Грина, отвечающих различным наблюдаемым. В настоящее время такие уравнения эволюции построены в главном и следующем за главным логарифмических приближениях (ГЛП и СГЛП), есть частичные результаты в следующем за следующим за главным логарифмическом приближении, строятся и активно изучаются решения этих уравнений, они применяются для описания данных.

Полужесткие процессы целенаправленно исследовались экспериментально на ускорителе HERA, где была доступна область до  $x \sim 10^{-5}$ . Они активно изучаются на LHC. Физика малых  $x$  является существенной частью экспериментальной программы планируемых установок EIC и LHeC. Особый интерес представляет исследование глюонных функций распределения, которые растут при малых  $x$ . В этой области экспериментальных наблюдается качественные эффекты, например, геометрический скейлинг, который можно объяснить динамической генерацией масштаба насыщения. Это масштаб попечных импульсов, при котором рост глюонной функции распределения существенно

замедляется за счет процессов слияния глюонов, которые становятся одного порядка с процессами расщепления глюонов при больших глюонных плотностях.

Такие процессы описываются нелинейными уравнениями эволюции, которые рассмотрены в диссертации А. В. Грабовского, поэтому **актуальность** темы не вызывает сомнений. В диссертационной работе А. В. Грабовского впервые получены нелинейные уравнения эволюции для барионной вильсоновской петли в ГЛП и СГЛП, для квадрупольного и дважды дипольного операторов в СГЛП, впервые вычислены импакт факторы эксклюзивного дифракционного фоторождения 2 струй и легкого векторного мезона в произвольной кинематике с точностью следующего за главным приближения. Полученные импакт факторы можно применять для описания уже имеющихся данных HERA. Это свидетельствует о **научной новизне, практической ценности и высокой значимости диссертации.**

Результаты работы опубликованы в 10 журнальных статьях и 7 статьях в сборниках трудов, многократно докладывались на международных конференциях. Вычисление ядер уравнений эволюции и импакт факторов основано на методе высокоэнергетического операторного разложения Я. Балицкого, хорошо проверенном в квантовой теории поля и активно используемом при описании экспериментов, поэтому результаты можно признать **обоснованными**. Этот метод позволяет получать нелинейные уравнения эволюции, которые в линейном пределе можно сравнить с уравнениями Балицкого - Фадина - Кураева - Липатова для померона и уравнением Бартельса - Квичинского - Прашаловича для оддерона, а в дипольном пределе с уравнением Балицкого - Ковчегова. Такие сравнения проделаны в диссертационной работе. Правильные линейный и дипольный пределы, а также совпадение уравнений эволюции для различных операторов, связанных  $SU(3)$  тождествами подтверждают **достоверность** результатов.

Диссертация представляет собой законченный труд в виде введения, 3 глав, заключения и 6 приложений, содержит 193 страницы, список литературы из 104 ссылок и 7 рисунков.

Во введении описана постановка задач, приведен краткий обзор литературы и приведены защищаемые положения. Также во введении обоснована актуальность темы и обозначен личный вклад автора в полученные результаты.

В первой главе с помощью метода высокоэнергетического операторного разложения выведено уравнение эволюции по быстроте для барионной вильсоновской петли в ГЛП и СГЛП, описывающей рассеяние барионов в поле ударной волны, созданной мишенью. Также получены квазиконформное и линеаризованное ядра этого уравнения, построено решение линейного уравнения эволюции для рассеяния вперед в СГЛП. Для квадрупольного оператора и дважды дипольного оператора получены ядра уравнений эволюции в СГЛП и соответствующие квазиконформные ядра. Показано, что все уравнения в дипольном пределе переходят в уравнение Балицкого - Ковчегова и проведены другие проверки.

В второй главе методом высокоэнергетического операторного разложения вычислены импакт факторы для эксклюзивного дифракционного фоторождения продольно поляризованного легкого векторного мезона в главном приближении (ГП) и следующем за главным приближением (СГП), двух струй в ГП и СГП, трех струй в ГП.

В третьей главе разработана процедура перехода между операторами в полном и мебиусовском представлениях, отвечающих подходам Балицкого - Фадина - Кураева - Липатова и высокоэнергетического операторного разложения соответственно. Показано, что для калибровочно инвариантных операторов существует возможность восстановления полной формы по мебиусовской и построенной процедуре проведена для оператора, приводящего полное ядро уравнения Балицкого - Фадина - Кураева - Липатова,

това в СГП к квазиконформному виду.

В заключении приведены основные результаты работы и список публикаций с результатами диссертации.

В приложения вынесены вычисление  $SU(3)$  тождеств, список использованных в работе компонент ядер уравнений эволюции, описание процедуры построения 4-точечного конформного оператора, необходимые интегралы, выражения для конечной части виртуальных поправок к импакт фактору рождения двух струй и выражения для реальных поправок к этому импакт фактору.

Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

В качестве **замечаний** к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. В автореферате на странице 1 и в диссертации на странице 6 неправильно указано название установки Large Hadron electron Collider - LHeC.

2. В главе 2 применяются разные обозначения для амплитуд  $M, T$  (страницы 101 - 113),  $\mathcal{A}$  (страницы 114 - 115),  $A$  (страницы 120, 122, 130, 131).

3. Обилие громоздких формул при недостаточном физическом обосновании (объяснении) некоторых приближений затрудняет чтение текста диссертации, которая выявлена бы значительно при наличии обсуждения феноменологических приложений и области применимости развитого сложного математического аппарата.

Оценивая работу в целом, можно сделать вывод, что диссертационная работа А. В. Грабовского представляет собой научно-квалификационную работу, в которой найдены решения ряда важных задач квантовой хромодинамики, что подтверждает высокую квалификацию соискателя. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах и известны специалистам.

Таким образом, диссертация А. В. Грабовского "Развитие методов исследования эффектов больших глюонных плотностей в КХД" соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным "Положении о порядке присуждения ученых степеней", утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а сам Грабовский Андрей Владимирович, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Отзыв составил:

ведущий научный сотрудник  
Отдела экспериментальной физики  
высоких энергий НИИЯФ МГУ,  
доктор физ.-мат. наук  
телефон: 8(495)9391257  
e-mail: snigirev@lav01.sinp.msu.ru  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы,  
дом 1, строение 2

А.М.Снигирев

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании семинара ОЭФВЭ  
НИИЯФ МГУ 07.09.2020.

Зав. ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ,  
член-корреспондент РАН

Э.Э. Бос

Директор НИИЯФ МГУ,  
профессор

М.И. Панасюк