

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Есть особые причины, почему диссертационная работа именно такого содержания представлена к защите именно на этом Диссертационном Совете. Основы современного подхода к глубоконеупругим процессам имеют свои корни в почти полувековой давности работах, выполненных именно в Институте имени Будкера. Важнейшим шагом к современной партонной модели был метод квазиреальных электронов, предложенный в 1973 году В.Н. Байером, В.С. Фадиным и В.А. Хозе (кстати, буквально в эти дни Владимиру Николаевичу исполнилось бы 90 лет...). В 1974 году коллинеарной партонной модели во всех теориях поля был придан окончательный вид Л.Н. Липатовым, но конкретно квантовая хромодинамика (КХД) была странным образом опущена. Вместо этого, в 1975 году В.С. Фадин, Э.А. Кураев и Л.Н. Липатов опубликовали основополагающую работу по квантовохромодинамическому померону (аббревиатура БФКЛ укоренилась после работы Я.Я. Балицкого и Л.Н. Липатова), т.е., по описанию глубоконеупрого рассеяния в высокозенергетическом пределе малых  $x$ . И только в 1977 Ю.Л. Докшицером, Г. Алтарелли и Д. Паризи, в развитие работ Байера, Фадина, Хозе, Грибова и Липатова, был предложен современный КХД формализм коллинеарных партонов (ДГЛАП) для конечных значений Бьёркеновского параметра  $x$ . Настоящая проверка формализма ДГЛАП вне рамок главного логарифмического приближения стала возможной только после запуска в начале 1990-х коллайдера ГЕРА (HERA) в Гамбурге. И тогда же пришло понимание того, что при малых  $x$ , доступных на ГЕРА, область применимости формализма ДГЛАП заканчивается и следует переходить к формализму БФКЛ.

Еще в 1990 году Б.Г. Захаровым и оппонентом формализм БФКЛ был переформулирован на простом квантовомеханическом языке взаимодействия цветовых диполей. Последовали предсказания скейлинговых свойств ядерной экранировки, указанных на качественном уровне еще в 1975 году В.И. Захаровым и оппонентом, и дифракционного глубоконеупрого рассеяния с большой быстротной щелью. Наблюдение последних на ГЕРА в 1993 году было шоком для экспериментаторов и важным подтверждением дипольного подхода. В течение последующих нескольких лет в формализме цветовых диполей оппонентом с соавторами были получены полукаличественные предсказания как для инклузивных структурных функций, так и широкого спектра дифракционных глубоконеупругих процессов и для рождения струй в рассеянии адронов на ядрах. Одновременно была осознана фундаментальная роль остававшейся в тени работы Липатова 1986 года по решению задачи о помероне БФКЛ в пространстве прицельных параметров как предшественника дипольного формализма. Важным шагом была интерпретация в 1993 году Б.Г. Захаровым и оппонентом, и независимо А. Мюллером, ядра БФКЛ эволюции на языке волновой функции диполя с дополнительным глюоном, и эйкональное обобщение уравнения БФКЛ эволюции на ядерные мишени в нулевом приближении разложения по обратному числу цветов  $N_c$ . Язык цветовых диполей оставался полукаличественным, так как и ядро БФКЛ эволюции, и дипольные волновые функции взаимодействующих систем описывались в низшем порядке теории возмущений. Многочисленные работы разных авторов по насыщению

ядерных партонных плотностей фактически не вышли за рамки этого приближения. Этим эра легких задач была исчерпана.

Очередным фундаментальным шагом в физике малых  $x$  была серия работ В.С. Фадина с соавторами по выводу ядра БФКЛ в следующем порядке теории возмущений и впоследствии работ Д.Ю. Иванова с соавторами по поправкам следующего порядка к интегралу перекрытия волновых функций фотона и векторного мезона (импакт-фактора). Решение обеих задач оказалось технически крайне нетривиальным, и будет справедливо подчеркнуть, что в мире просто нет других групп, способных к столь сложным выводам. Параллельным развитием было воспроизведение результатов дипольного подхода в формализме вильсоновских петель. Как это зачастую происходит, новый формализм вильсоновских петель позволяет не просто воспроизвести известные до него результаты, но порождает и обоснованные ожидания на новые результаты, недоступные в старых подходах.

Приведенный выше исторический обзор позволяет лучше понять роль и место диссертационной работы Андрея Владимировича Грабовского в современной физике малых  $x$ . Она посвящена развитию техники вильсоновских петель в приложении к проблеме насыщения ядерных партонных плотностей. Эта задача приобретает особую актуальность и практическую ценность в связи с началом строительства электрон-ионного коллагенда eRHIC (eIC) в Брукхэйвенской национальной лаборатории в США. Во-первых, ожидается кардинальное повышение точности измерения структурных функций за счет резкого роста светимости в новом коллагенде. Сверх того, первая в мире реализация электрон-ионных столкновений даст возможность проверить с высокой точностью не только идеи о насыщении плотностей партонов с малыми  $x$  в ядрах, но и впервые изучить в широкой кинематической области ядерную зависимость дифракционных глубоконеупругих процессов при малых  $x$ . Запросы количественной интерпретации будущих прецизионных экспериментальных данных с eRHIC требуют существенного повышения точности теории, и именно эта задача решается докторантом.

Было бы нереалистично требовать от отдельно взятой диссертационной работы, даже докторской, исчерпывающего ответа на весь круг возникающих вопросов. Андреем Владимировичем Грабовским сделан существенный шаг в этом направлении, оправдывающий появление на свет этой диссертационной работы. Предваряя обсуждение диссертации по существу, хочу выразить сожаление, что докторант опустил свои результаты по обсуждению экспериментальных данных, ограничившись своими вкладами в развитие теоретического формализма.

Вкратце, в диссертационной работе А. В. Грабовского с помощью формализма вильсоновских линий найдена кварк-антикварк-глюонная компонента фоковского разложения волновой функции фотона без мягкого и коллинеарного приближений, а также вычислена однопетлевая поправка к кварк – антикварковой компоненте этого разложения. Результат вычислений использован для получения импакт факторов перехода виртуального фотона в легкий векторный мезон в однопетлевом приближении, в две струи в однопетлевом приближении, в 3 струи в борновском приближении. Также в этой работе построены ядра уравнений эволюции в следующем за главным приближении для многопартональных функций Грина: трехкварковой – барионной вильсоновской петли, четырехкварковых – двойного диполя и квадруполя. Научная новизна и высокая значимость этих результатов неоспоримы. Что касается обоснованности и достоверности

развиваемого диссидентом подхода, во всех случаях проведены тесты на согласие с полученными ранее другими методами результатами.

Перейду к более детальному обсуждению диссертации в духе инструкций ВАК. Диссертация состоит из Введения, трех глав, заключения и приложений, содержит 193 страницы, список литературы из 104 ссылок и 7 рисунков.

Во Введении описана постановка задач, приведен краткий обзор литературы и перечислены защищаемые положения. Тут диссидентта следует упрекнуть за излишнюю краткость - более развернутый обзор литературы был бы несомненно полезен не специализирующимся в теме диссертации коллегам для ознакомления с новой интересной тематикой.

В главе 1 выведено уравнение эволюции по быстроте для барионной вильсоновской петли в главном и следующем за ним приближениях. Также получены квазиконформное и линеаризованное ядра этого уравнения. Функция Грина для оператора барионной вильсоновской петли является естественным обобщением дипольной функции Грина на бесцветное трехкварковое состояние с квантовыми числами протона. Идея в том, чтобы описать протон так же, как с помощью дипольной картины описывается фотон. В рамках дипольной картины рассеяния виртуальный фотон флюктуирует в кварк – антикварковую пару, которая взаимодействует с мишенью. Амплитуда такого процесса вычисляется в виде свертки волновых функций фотона, конечного состояния, в которое он переходит, и дипольного сечения – дипольной функции Грина, подчиняющейся уравнению БФКЛ и его нелинейным обобщениям. Для процесса с жестким масштабом с участием протона, например, распада протона на три струи при взаимодействии с мишенью, можно записать амплитуду в виде такой же свертки, где роль дипольной функции Грина будет играть функция Грина для барионной вильсоновской петли, уравнение эволюции для которой найдено в диссертации. Показано, что это уравнение имеет замечательные свойства: в линейном пределе его С-четная часть переходит в три уравнения БФКЛ, С-нечетная – в уравнение Бартельса – Квичинского – Прашаловича (БКП). Более того, полученное уравнение содержит нелинейные поправки.

Первая глава также содержит решение линейного уравнения эволюции для рассеяния вперед в следующем за главным приближении. В главном приближении ядро БФКЛ конформно инвариантно, в следующем за главным приводимо к квазиконформному виду, где все неинвариантные части пропорциональны бета-функции. Решение конформно инвариантного уравнения строится в виде разложения по конформным собственным функциям, которые в случае рассеяния вперед являются степенными функциями размера диполя. В следующем за главным приближении неконформный член пропорционален логарифму размера диполя, что можно представить как производную собственной функции. В результате уравнение в следующем за главным приближении переходит в уравнение в частных производных, которое было решено методом характеристик.

Далее в первой главе рассмотрены функции Грина, отвечающие четырехпартонным состояниям: бесцветным состояниям со структурой двойного диполя и квадруполя. Эти функции Грина возникают, например, при рассмотрении рождения 4 частичных состояний. Для квадрупольного оператора и дважды дипольного оператора получены ядра уравнений эволюции в следующем за главным приближении и соответствующие квазиконформные ядра. Показано, что все уравнения, полученные в первой главе, в дипольном пределе переходят в уравнение Балицкого - Ковчегова и проведены другие проверки, основанные

на связи различных функций Грина с помощью групповых соотношений. Для этого были получены около десятка новых SU(3) тождеств.

В главе 2 методом вильсоновских линий вычислены импакт факторы для эксклюзивного дифракционного фоторождения продольно поляризованного легкого векторного мезона, двух струй в главном и следующем за ним приближениях, трех струй в главном приближении. Для рождения струй расчет проведен в общей кинематике: с ненулевыми виртуальностью исходного фотона, массой рожденной системы струй, конечной передачей импульса в  $t$ -канале, произвольной поляризацией исходного фотона. Получено полностью дифференциальное сечение рождения двух струй, определенных с помощью конусного алгоритма в пределе малого раствора конуса в следующем за главным приближением, полностью дифференциальное сечение рождения трех струй в главном приближении.

Для рождения легкого векторного мезона расчет проведен при произвольных поляризации и виртуальности исходного фотона, произвольной передаче импульса в  $t$ -канале, продольной поляризации мезона. Этот расчет выполнен совместно с Д. Ю. Ивановым и обобщает полученный им ранее результат для импакт фактора перехода продольно поляризованного фотона с ненулевой виртуальностью в продольно поляризованный легкий векторный мезон с нулевой передачей в  $t$ -канале. Использование метода вильсоновских линий позволило найти не только импакт факторы, связанные с дипольными функциями Грина, но и импакт факторы, сворачивающиеся с функцией Грина оператора двойного диполя, который отсутствует при рассмотрении в рамках подхода БФКЛ.

Сравнение импакт фактора для фоторождения мезона, полученного в диссертации методом вильсоновских линий, с результатом Д. Ю. Иванова, полученным методом БФКЛ, в общей области применимости, очень нетривиально. Для этого, помимо линеаризации, необходимо построить процедуру преобразования импакт факторов и функций Грина, определенных в рамках подхода вильсоновских линий, в представление, используемое в подходе БФКЛ, так как два этих подхода по-разному распределяют радиационные поправки между импакт фактором и функцией Грина. Построению такой процедуры посвящена глава 3.

В главе 3 разработан также алгоритм перехода между операторами в полном и мебиусовском представлениях, отвечающих подходам Балицкого - Фадина - Кураева - Липатова и вильсоновских линий соответственно. Показано, что для калибровочно-инвариантных операторов существует возможность восстановления полной формы по мебиусовской, найдены условия, при которых оператор восстанавливается единственным образом. Такими условиями являются калибровочная инвариантность, инфракрасная стабильность и отсутствие членов, пропорциональных дельта функциям от импульсов реджеонов. Алгоритм перехода состоит в вычитании расходящейся части, преобразовании Фурье, добавлении членов, восстанавливающих калибровочную инвариантность без изменения сечения. Построенная процедура проведена для оператора, приводящего полное ядро уравнения БФКЛ в следующем за главным приближении к квазиконформному виду, получены полная и мебиусовская формы этого оператора.

В Заключении дана сводка основных результатов работы.

В приложения вынесены такие многочисленные технические приемы как вычисление SU(3) тождеств. Дан полный перечень использованных в работе компонент ядер уравнений

эволюции. Описаны детали построения 4-точечного конформного оператора, дана сводка необходимых интегралов. Приведен вывод конечной части виртуальных поправок к импакт фактору рождения двух струй и выражения для реальных поправок к этому импакт фактору.

Оценивая диссертацию в целом, я повторю замечание, что было бы чрезмерным требовать от диссертанта полного решения всех задач, стоящих перед физикой глубоконеупругого рассеяния при малых  $x$  в нелинейной области высоких partонных плотностей. Я рассматриваю диссертацию как важные пролегомены к будущему описанию этой области теоретической физики высоких энергий с полным учетом первых петлевых поправок. Диссертант получил впечатляющие новые результаты в этом направлении, которые с полным правом можно охарактеризовать как развитие нового подхода к в высшей степени актуальной теме, и в этом качестве совокупность опубликованных результатов А.В. Грабовского удовлетворяет главному критерию, предъявляемому ВАК к докторским диссертациям. Так, импакт факторам, полученным в диссертации в следующем за главным логарифмическим приближением, уготована важная роль при анализе режима насыщения partонных плотностей на уровне точностей экспериментальных данных, которые будут достигнуты на будущем электрон-ионном коллайдере eIC. Как технически очень важное для последующих приложений следует отметить установленное в диссертации соответствие между операторами в полном и мёбиусовском представлениях. Говоря о перспективах развивающегося А.В. Грабовским подхода, оппоненту хотелось бы увидеть в один прекрасный день соответствие между описанием режима насыщения partонных плотностей на языке вильсоновских петель и условием унитарности в духе классической работы Абрамовского-Грибова-Канчели из эпохи до квантовой хромодинамики и формулировкой высокоэнергетической КХД на языке реджеонной теории поля. В этом смысле тематику диссертации А.В. Грабовского ждет большое будущее.

Как привыкший к сопоставлению собственных работ с экспериментом, я уже пожаловался, что напрасно были опущены результаты по сравнению с экспериментальными данными. Может, и чересчур пространный экскурс в историю вопроса во вводной части этого отзыва был вызван, кроме желания обрисовать подробнее место диссертанта в этой области теоретической физики, и недостаточно полным обзором литературы по теме диссертации.

Работы А. В. Грабовского, на основе которых написана представленная к защите диссертация, опубликованы в ведущих международных журналах. Автореферат диссертации правильно и полно отражает как содержание самой диссертационной работы, так и основные идеи и выводы составивших диссертацию публикаций.

Сделанные выше замечания не меняют общей положительной оценки диссертационной работы А. В. Грабовского «Развитие методов исследования эффектов больших глюонных плотностей в КХД». Она полностью соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом 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.

Николай Николаевич Николаев

Доктор физико-математических наук (01.04.02), главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук

142432, Россия, Московская область, Ногинский район, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1-А, Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН

Тел. +7(495)702-93-17, e-mail: [nikolaev@itp.ac.ru](mailto:nikolaev@itp.ac.ru)

Подпись Н.Н. Николаева удостоверяю

0409.2020г.



С.А. Крашаков

Кандидат химических наук, Ученый секретарь Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН