

ОТЗЫВ

официального оппонента,

доктора физико-математических наук, профессора И. Ф. Гинзбурга

на диссертацию

А.В. Грабовского

Развитие методов исследования эффектов больших глюонных плотностей в КХД,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02-теоретическая физика.

Предметом исследования автора являются соударения адронов или фотонов с адронами при большой энергии с вылетом систем частиц на небольшие углы так, что их поперечный импульс или эффективная масса порождающего фотона или рождённой системы Q удовлетворяют условию $\sqrt{s} \gg Q \gg \Lambda_{QCD} \sim 250$ MeV (полужесткие процессы). Второе из этих условий позволяет рассматривать в вычислениях вместо реальных адронов безмассовые кварки и глюоны, а также считать малой эффективную константу сильного взаимодействия $\alpha_s(Q)$. При выполнении первого условия в рядах теории возмущений выделяются вклады, пропорциональные $(\alpha_s \ln(1/x))^n$ где $x = Q^2/s$, и эти ряды переорганизовываются в ряды по $\alpha_s^m (\alpha_s \ln(1/x))^n$. Главное приближение (LLA) отвечает $m = 0$, следующее приближение (NLLA) отвечает $m = 1$. Естественно возникает задача выделения и суммирования таких вкладов в главном и последующих приближениях. Для упругого рассеяния в квантовой электродинамике подобная задача в LLA была решена в работах Грибова, Горшкова, Липатова и Фролова. Продолжением этих работ стали работы Балицкого, Липатова, Кураева и Фадина (БФКЛ), посвящённые квантовой хромодинамике. В этом подходе для вычисления вкладов диаграмм используется импульсное представление. Задача суммирования решается в два этапа. Сначала строятся объекты, называемые реджезованными глюонами, амплитуды физических процессов строятся с помощью этих реджезованных глюонов. Рекуррентные соотношения между вкладами диаграмм перерабатываются в уравнения для амплитуд.

Много лет назад выяснилось, что с ростом энергии $(1/x)$ плотность числа глюонов увеличивается так, что приобретают значение многократные соударения глюонов с рассевающей частицей и друг с другом, выход из приближения главных логарифмов и учёт большой плотности глюонов становятся необходимыми.

Оказалось, что исследования этих вопросов для широкого круга полужёстких процессов удобно проводить, используя для диаграмм координатное представление (метод высокоэнергетического операторного разложения Балицкого-Ковчегова). Здесь первый этап суммирования состоит в выделении калибровочно инвариантных вкладов в группах диаграмм (Вильсоновские линии вдоль эйкональных траекторий падающих частиц)

с последующим построением уравнений для этих линий – Вильсоновских петель. Удобство этого метода состоит, в частности, в том, что в нём можно использовать наглядные соображения (разумеется, с должной осторожностью). Именно этот подход используется в диссертации.

Заметим, что квантово-механическую амплитуду электромагнитного рассеяния частицы на малый угол при большой энергии в низшем приближении теории возмущений можно записать в виде свёртки формфактора $F(q)$ этой частицы с полем, создаваемом мишенью (отдельные фотоны). При описании подобного процесса в квантовой хромодинамике приходится учитывать, что наблюдаемые частицы бесцветны, а переносчик взаимодействия – глюон – имеет цвет, и обмен одним глюоном невозможен. Уже в низшем приближении формфактор заменяется на импакт-фактор, зависящий от импульсов этих глюонов $\Phi(q_1, q_2)$.

Таким образом, проблема естественным образом подразделяется на две части: (А) исследование поля мишени в компонентах, ответственных за полужесткие процессы, и (Б) вычисление импакт-факторов для перехода исходных частиц в конечные.

В первой главе диссертации автор исследует упоминаемое глюонное поле мишени в главном и следующем за главным логарифмических приближениях (**задача А**). Для этого строятся уравнения эволюции для различных Вильсоновских петель в рассматриваемых приближениях.

Балицким такое уравнение было выведено в рамках операторного разложения в КХД, где операторами являются вильсоновские линии вдоль эйкональных траекторий быстрых партонов, а коэффициентные функции – это и есть упоминавшиеся импакт-факторы. В рамках этого операторного разложения импакт-фактор налетающей частицы вычисляется по её Фоковскому разложению. Поэтому основной вклад для виртуального фотона даёт кварк-антикварковая пара, что приводит к дипольной картине. С помощью операторного разложения вычисляются поправки к этой картине за счёт старших Фоковских компонент волновой функции фотона (в этом отношении подход близок к почти забытым идеям метода Фока-Тамма-Данкова). Соответствующее уравнение ренормализационной группы для дипольного оператора – следа пары вильсоновских линий является уравнением Балицкого-Ковчегова.

Простыми дипольными структурами дело не исчерпывается. Решения, описывающие более сложные, чем диполь операторы, принадлежат автору. Например, если налетающая частица – физический барион из трёх夸克ов, не обладающий цветом, его невозможно представить в виде диполя. Автор замечает, что операторное разложение – универсальный метод, необходимо только выбрать правильный оператор. Для случая барионов это – барионная вильсоновская петля – три вильсоновские линии, свернутые по индексам в соответствие с цветовой структурой протона. Для такого оператора в первой главе построено уравнение эволюции по быстроте в главном и следующем за

главным логарифмических приближениях. Для этого построения оказалось достаточным использовать теорию возмущений КХД и операторное разложение, без привлечения внешних качественных соображений. Объём необходимых вычислений выглядит вполне впечатляющим. Результат – замкнутое уравнение для барионной вильсоновской петли в главном логарифмическом приближении. Решение этого уравнения – дело дальнейших исследований.

Подобным образом и в тех же приближениях автор строит уравнения эволюции и для ещё более сложных операторов, составленных из 4 вильсоновских линий – квадруполя и двойного диполя, которые встречаются при изучении рождения струй.

К этим исследованиям примыкает материал главы 3, посвящённой технической задаче описания соотношения между импульсным представлением, в котором сформулирован подход БФКЛ, и координатным представлением, в котором сформулирован подход Балицкого. Автор ограничивается случаем рассеяния бесцветных частиц, для которого оператор – это дипольный вильсоновский оператор с исключённой невзаимодействующей частью. Автор замечает, что в таком пространстве функция Грина обращается в нуль при совпадении поперечных координат кварка и антикварка, т.е. цветовой диполь с размером, меньшим длины волны глюона выглядит бесцветным – он не взаимодействует с глюоном. На основе этого автор показывает, что существует одно-однозначное соответствие между обоими представлениями не только на языке наблюдаемых величин, но и на языке составных блоков, ядер и импакт-факторов. Эти результаты кажутся полезными для многих последующих анализов.

К сожалению, изложение в работе построено таким образом, что проследить путь от исходных диаграмм Фейнмана до изучаемых уравнений трудно, и представленные качественные аргументы кажутся по-началу дополнительными феноменологическими соображениями. В моих глазах работа сильно выиграла бы, если бы этот путь – от диаграмм к изучаемым объектам – был бы описан в тексте.

Помимо этого, в первой главе построено решение уравнения БФКЛ для рассеяния вперед в указанных приближениях в пространстве собственных функций борновского ядра БФКЛ. Оно основано на наблюдении, что в этом пространстве конформно неинвариантные члены в ядре БФКЛ, пропорциональные бета-функции, имеют вид производной от собственной функции. В результате уравнение БФКЛ можно записать как уравнение в частных производных первого порядка и решить методом характеристик. Здесь мне не хватает обсуждения поведения полных сечений на основе этих решений.

Задача Б. Импакт-факторы зависят от свойств сталкивающихся частиц, они вычислимые в терминах теории возмущений КХД только в случае, когда и начальная частица и конечное состояние допускают полужёсткое описание. В частности, при описании столкновений протона существенно, что связь кварков в нём происходит на больших расстояниях, и соответствующие импакт-факторы невычислимые в рамках теории

возмущений, для их описания используются феноменологические модели (другими авторами). Для элементарных частиц – фотонов, глюонов и кварков при наличии жёсткого масштаба поперечных импульсов импакт-факторы вычислимые в рамках теории возмущений КХД. В обсуждаемой работе в главе 2 вычислены в следующем за главным приближении импакт-факторы для переходов виртуального фотона 1) в квark и антиквark, 2) в квark, антиквark и глюон, 3) в лёгкий продольно поляризованный векторный мезон. В первых двух случаях речь идёт о наблюдении рождения двух или трёх струй, здесь используется стандартная феноменологическая гипотеза квark-адронной дуальности, что ограничивает точность получающихся предсказаний. Импакт-фактор перехода фотона в лёгкий продольный векторный мезон построен на основе импакт-фактора фоторождения квark-антиквартовой пары.

В этой части мне не хватает качественного анализа получившихся результатов. Так, хорошо известно, что в главном приближении рождение поперечно поляризованного ρ подавлено степенным образом. Сохраняется ли этот результат в следующем приближении?

Сечения процессов с виртуальными фотонами довольно сильно подавлены, значительно больше сечения процессов с квазиреальными фотонами, использованная методология несомненно применима для рождения векторных мезонов с умеренно большим поперечным импульсом (для поперечного импульса $p_T = Q$ наблюдаемое сечение в десятки раз больше, чем в случае с виртуальным фотоном, имеющим массу Q). В этом случае измерение поляризации рождённого ρ должно быть чётким предсказанием модели. Точно так же картина несомненно применима для описания рождения тяжёлых векторных мезонов J/Ψ реальным фотоном даже при малых переданных импульсах. В этом случае в главном приближении J/Ψ рождается поперечно поляризованным при $p_T < M_\Psi$ и продольно поляризованным при больших p_T . Что изменится при учёте приближения, следующего за главным? Существуют ли какие-нибудь корреляции в угловых распределениях рождённых струй, отвечающие упоминаемым поляризационным свойствам мезонов?

В целом в излагаемом тексте я не нашёл и ответа на вопрос, приводят ли эффекты большой глюонной плотности к каким-нибудь качественным изменениям в поведении наблюдаемых сечений по сравнению с более низкими энергиями, когда эти эффекты отсутствуют, или речь идёт только об изменении деталей распределения.

Наконец, способ изложения автора свидетельствует о том, что он не любит читателя. Некоторые аббревиатуры – ГНР, ГЛП, СГЛП,... – вводятся без объяснения. Иногда расшифровка требует усилий. Подобным образом, начинаю читать, и не понимаю формулу (1.1). Оказывается, её надо понимать через (1.3), но это удается узнать только из расспросов. Раздел (1.7) начинается со слов. "Наши обозначения будут такие же, как в [95]." Полного перечисления этих обозначений я не обнаружил.

Несколько слов хочу добавить об оптимизме автора по поводу использования ультрапериферических соударений для наблюдения обсуждаемых эффектов. На мой взгляд, этот оптимизм не оправдан. Действительно, в соударениях релятивистских ядер возникает поток виртуальных фотонов, который в Z^2 раз больше, чем при рождении протона. Это усиление имеет место только для фотонов с малой виртуальностью < 70 МэВ (масштаб ядерного формфактора). Поэтому среди полужёстких процессов здесь могло бы наблюдаваться только фоторождение мезонов реальными фотонами. Однако, в столкновениях ядер соответственно усиливается и прямое множественное рождение таких мезонов в чисто ядерных соударениях. Трудно ожидать, что в наблюдениях удастся различить эти механизмы, чтобы выделить ультрапериферический механизм с приемлемой точностью.

Указанные недочёты не отменяют общего вывода о том, что представленная диссертация является завершенной научной работой, в которой существенно развито актуальное для физики элементарных частиц научное направление – применение квантовой хромодинамики к описанию эффектов больших глюонных плотностей. Результаты, представленные в диссертации, являются новыми и важными, а разработанные методы перспективными. Эти результаты хорошо известны как теоретикам, так и экспериментаторам, они активно цитируются.

В целом, представленная диссертация "Развитие методов исследования эффектов больших глюонных плотностей в КХД" удовлетворяет всем необходимым требованиям, а её автор, Андрей Владимирович Грабовский, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико – математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Автореферат правильно передаёт содержание диссертации.

25 августа 2020г.

Доктор физ.-мат. наук,
профессор,

И.Ф. Гинзбург

главный научный сотрудник Лаборатории теоретической физики Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института математики
им. С. Л. Соболева Сибирского отделения РАН,
проспект академика Коптюга, д. 4, 630090, Новосибирск, ИМ СО РАН,
тел. +7-383-3297555, e-mail: ginzburg@math.nsc.ru

Подпись д.ф.-м.н. И.Ф. Гинзбурга заверяю
Ученый секретарь ИМ СО РАН
к.ф.-м.н.



И. Е. Светов