

О Т З Ы В

официального оппонента о диссертации Грабовского Андрея Владимировича «Развитие методов исследования эффектов больших глюонных плотностей в КХД», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Тема диссертации Грабовского Андрея Владимировича посвящена одному из наиболее интересных режимов Квантовой Хромодинамики: высокоэнергетическому пределу, достигаемому при $s \gg Q^2$, где s - квадрат энергии, а Q - характерный масштаб поперечных импульсов. Этот предел связан с так-называемой реджевской кинематикой, имеющей место для процессов с двумя начальными и двумя конечными частицами, когда $s \gg t$, где t - квадрат передачи импульса. Как отмечено в диссертации, в столкновениях с участием адронов характерный масштаб поперечных импульсов Q может задаваться не только передачей t , но и виртуальностью фотона, инвариантной массой или поперечным импульсом рожденной адронной системы. Сечения таких процессов зависят от партонных плотностей, прежде всего от глюонной плотности, которая велика при $s \gg Q^2$.

В ер-экспериментах реджевский режим реализуется в таких процессах как глубоконеупругое лептон-адронное рассеяние (ГНР) при малых значениях переменной $x=Q^2/s$, а также для жесткой дифракции в ГНР.

На адронных коллайдерах реджевский режим имеет место в центральных столкновениях тяжелых ионов и в pp-столкновениях с большой множественностью, т. к. характерные значения соответствующей переменной x для рожденных частиц в центральной

области быстрот малы. Типичные наблюдаемые - дифференциальные сечения инклюзивного рождения струй с большим поперечным импульсом $\sim Q$ в центральной области быстрот, а также азимутальная угловая декорреляция струй с максимальной разностью быстрот (так называемых струй Мюллера-Навале). Реджевский предел также достигается в ультрапериферических столкновениях адронов и ядер, когда одно из ядер испускает квазиреальный фотон, который взаимодействует со вторым ядром с образованием системы с жестким масштабом, например струй, Epsilon-частицы или J/Psi-частицы, что актуально для экспериментов, выполняемых на RHIC и LHC.

С теоретической точки зрения при уменьшении x (при фиксированном Q) растет плотность глюонов в пространстве, параллельном оси столкновения. Пока плотность глюонов с поперечным импульсом Q и долей x продольного импульса небольшая, этот рост описывается линейным уравнением, которое учитывает только процессы расщепления глюона. При достаточно больших плотностях уравнение становится нелинейным и рост глюонной плотности практически прекращается.

Прекращение роста глюонной плотности при малых x называется насыщением. При этом генерируется масштаб насыщения $Q_s(x)$, т.е. характерный поперечный импульс, при котором процессы слияния глюонов становятся одного порядка с процессами их расщепления.

При таком насыщении характерное межпартонное расстояние становится порядка поперечного размера партона и поэтому нельзя пренебрегать партон-партонным взаимодействием. Именно масштаб насыщения определяет глюонную плотность и, следовательно, наблюдаемые при очень малых значениях x . В результате, любые наблюдаемые, зависящие от одного поперечного масштаба, оказываются функциями отношения этого масштаба и масштаба насыщения $Q_s(x)$.

Например, после выделения размерного множителя сечение ГНР зависит от отношения $Q/Q_s(x)$, а не от Q и x по-отдельности. Такое поведение называется геометрическим скейлингом и наблюдалось в ep -, eA - и pp -столкновениях.

В настоящее время становится актуальным изучение также более сложных наблюдаемых, зависящих от нескольких масштабов. Например, рассматриваются глубоко-виртуальное комптоновское рассеяние, глубоко виртуальное рождение мезонов и струй с ненулевой передачей импульса. Наличие третьего масштаба, т.е. передачи импульса, позволяет восстановить не только зависимость адронных матричных элементов от x , т. е. исследовать распределение партонов по продольному импульсу, но также изучать распределение партонов по поперечному импульсу. Соответствующими объектами исследования становятся неинтегрированные партонные распределения.

В реджевском пределе процессы обычно исследуются на основе следующим подходов: Балитского-Фадинова-Кураева-Липатова (БФКЛ), конденсата цветного стекла, модели цветных диполей, а также подхода, основанного на изучении вильсоновских линий, ударных волн или высокоэнергетического операторного разложения Балицкого (далее будем называть его методом Балицкого). В диссертации использованы первый и, в основном, последний методы.

В рамках этих подходов сечение любого процесса вычисляется в виде свертки жесткой части (так-называемого импакт-фактора), описывающей взаимодействие налетающей частицы с глюонным полем мишени, и матричного элемента, вычисленного по начальному и конечному состояниям глюонной функции Грина мишени. Зависимость функции Грина от быстроты вычисляется в рамках одного из вышеупомянутых подходов, которые позволяют вывести уравнения эволюции по быстрой.

Таким образом, для построения сечений необходимо уметь вычислять импакт-факторы, выводить и решать уравнения эволюции и вычислять их свертки. Диссертация посвящена всем этим этапам. В ней представлен вывод уравнений эволюции по x в рамках подхода Балицкого, обсуждается связь с подходом БФКЛ, найдено решение линеаризованного уравнения эволюции, а также вычислены импакт-факторы дифракционного фоторождения 2 и 3 струй, а также легкого мезона.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы.

Введение содержит сформулированные цели и задачи исследования, обоснование актуальности, научной новизны и практической значимости работы. Здесь перечислены также основные положения, выносимые на защиту, и отмечен личный вклад автора.

В первой главе дан вывод уравнения эволюции для барионной вильсоновской петли в приближении двух первых главных логарифмов, получены ядра этого уравнения, построено решение линейного уравнения эволюции для рассеяния вперед.

Вторая глава диссертации содержит вычисление импакт-факторов для инклюзивного дифракционного фоторождения продольно-поляризованного векторного мезона, а также двух струй в приближении двух первых главных логарифмов, а также трех струй в главном логарифмическом приближении.

Третья глава диссертации посвящена описанию метода перехода между операторами в полном и мебиусовском представлениях, отвечающих подходам БФКЛ и Балицкого, соответственно. Показано, что для калибровочно-инвариантных операторов существует процедура восстановления полной формы по мебиусовской, что позволяет сравнивать результаты, полученные в подходах БФКЛ и Балицкого.

В заключении перечислены основные результаты работы, а также сформулированы следующие из них выводы.

Диссертация и автореферат написаны очень хорошо и понятно, несмотря на очень сложную тематику исследования. Хотелось бы отметить только один недочет, имеющий место как в диссертации, так и в автореферате. Автор, вводя неинтегрируемые партонные распределения с случае появления дополнительного масштаба, говорит о них, как о новых наблюдаемых, имея в виду новые объекты исследования. Используемый термин «наблюдаемые» не очень хорош в этом случае, т. к. с квантовомеханической точки зрения, неинтегрируемые партонные распределения, как и обычные партонные распределения, не являются наблюдаемыми.

Этот недочет, однако, не является принципиальным и никаким образом не снижает научной ценности диссертации.

Диссертация Грабовского Андрея Владимировича является законченным научным исследованием, содержащим решение актуальных задач Квантовой Хромодинамики в реджевском пределе:

- построение уравнений эволюции для барионной вильсоновской петли, квадрупольного и дважды дипольного операторов, решение дипольного уравнения для рассеяния вперед (все эти результаты получены в приближении двух первых главных логарифмов);

- вычисление импакт-факторов дифракционного рождения двух струй, а также легкого мезона в двух первых порядках теории возмущений;

- вычисление импакт-факторов дифракционного рождения трех струй в ведущем порядке;

- построение процедуры восстановления полной формы калибровочно-инвариантных операторов по их мебиусовской форме.

Полученные результаты имеют важное значение для развития КХД при высоких энергиях. Они могут быть использованы для анализа данных, полученных на современных ускорителях, а также при планировании новых экспериментов.

Основные результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, докладывались на международных и российских конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Грабовский Андрей Владимирович, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

«07» сентября 2020 г.

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований
Доктор физ.-мат. наук



А.В. Котиков

Адрес: 141980, Дубна, Московская область, ЛТФ, ОИЯИ

Тел.: +7 (49621) 63339

e-mail: kotikov@theor.jinr.ru

Даю согласие на обработку моих персональных данных любым законодательно разрешённым способом.

Подпись А.В. Котикова заверяю:

Учёный секретарь

Лаборатории теоретической физики

Объединенного института ядерных исследований

Кандидат физ.-мат. наук



А.В. Андреев