

ОТЗЫВ

на диссертацию Аникина Игоря Валерьевича "Вклады высшего твиста в жестких процессах КХД",

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

Актуальность темы

Диссертация Игоря Валерьевича Аникина посвящена разработке и развитию наиболее эффективных методов учёта поправок высшего твиста для исследования составной структуры адронов в рамках различных схем факторизации для различных жестких процессов квантовой хромодинамики (КХД).

В расчётах, касающихся адронных взаимодействий при высоких энергиях, роль краеугольного камня играет принцип факторизации, согласно которому весь процесс может быть разделён на "жёсткую" и "мягкую" части, а соответствующая амплитуда представлена в виде произведения (свёртки) независимых сомножителей. При этом жёсткая часть отвечает за большую передачу энергии-импульса и в общем и целом определяет кинематику процесса, мягкая же часть учитывает составную структуру адронов и отвечает за формирование конкретных адронов в конечном состоянии. Принцип факторизации доказан для некоторых процессов на уровне строгой теоремы, а для многих других процессов остаётся принимаемой по умолчанию рабочей гипотезой.

Выделение жёсткой части удобно в теоретическом отношении тем, что наличие малого параметра (в данном случае – константы взаимодействия α_s) обуславливает возможность применения методов теории возмущений, являющейся фактически единственным на сегодняшний день вычислительным методом в адронной физике. Параметры мягкой части взаимодействия не могут быть ни выведены из первичных принципов, ни получены прямым вычислением, и могут быть только извлечены из феноменологического анализа экспериментальных данных. Из первых принципов могут быть установлены лишь некоторые общие свойства невычисляемых непертурбативных параметров – например, это ограничения, вытекающие из симметрии по отношению к непрерывным пространственно-временным преобразованиям или по отношению к дискретным преобразованиям некоторых групп симметрии. Основное достоинство принципа факторизации состоит во взаимной независимости мягкой и жёсткой частей и универсальности каждой из них: в частности, параметры, характеризующие структуру адрона или описывающие механизм его формирования остаются неизменными, в каком бы (жёстком) взаимодействии ни участвовал данный адрон.

Диссертация посвящена развитию вычислительных методик, относящихся к жёсткой (пертурбативной) части. Необходимо иметь в виду, что не все поправки, имеющие одинаковую степень по константе взаимодействия, одинаково важны для расчётов. Помимо константы α_s , имеются и другие малые параметры, по которым естественно строить свой ряд теории возмущений. Этими малыми параметрами могут быть отношения масс частиц к переданному импульсу, отношения импульсов частиц к полной энергии \sqrt{s} и т. д. В процессе глубоконеупругого рассеяния лептонов на

нуклонах таким малым параметром является обратная величина виртуальности фотона $1/Q^2$, на основании которой и производится разделение взаимодействия на мягкую и жёсткую части. Указанные малые параметры напрямую связаны с размерностью полевых операторов, описывающих интересующие нас процессы. Формальной основой для построения ряда теории возмущений служит величина так называемого твиста – определяемого как разность между размерностью и спином рассматриваемого полевого оператора.

Задача построения и развития эффективных расчётных методик для пертурбативной части взаимодействия становится особенно актуальной в связи с вводом в строй коллайдеров нового поколения, отличающихся высокой светимостью и высокими сечениями процессов, а также прогрессом в измерительной технике, обеспечившим возможность регистрации всех частиц конечного состояния и открывшим путь к новым наблюдаемым – в том числе спиновым и корреляционным (что означает качественный переход от исследования инклюзивных характеристик процесса к полному эксклюзивному анализу). Для будущих ускорителей, таких как Международный Линейный Коллайдер (ILC), исследования жёстких процессов составляют значимую часть среди всех научных проектов.

В диссертации предложена и развита коллинеарная факторизация на световом конусе, в основе которой лежит факторизация в импульсном представлении вокруг доминантного свето-подобного направления. Предложенный метод ведет к наиболее естественным определениям соответствующих корреляторов. Сведение их числа к минимальному набору независимых корреляторов достигнута благодаря использованию интегральных соотношений, вытекающих из уравнений движения КХД и требования инвариантности амплитуд рассеяния относительно обобщённых лоренцевских вращений на световом конусе. Кроме того, для описания нуклонных жёстких процессов предложенный метод включает ковариантный подход к факторизации без выделения доминантного направления на световом конусе.

Диссертация состоит из Введения, Заключения и пяти глав.

В первой главе рассмотрен процесс глубоко-виртуального комптоновского рассеяния. Здесь сформулирован и развит оригинальный метод учёта высшего твиста в жёстких процессах. Исследована роль твиста 3 для восстановления абелевой (КЭД) калибровочной инвариантности амплитуд глубоко-виртуального комптоновского рассеяния на адронах со спином 0 и 1. Построено обобщение на случай адронов с произвольным спином. Предложен альтернативный способ вывода соотношений Вандзуры-Вильчека для пионных обобщённых партонных распределений и пионных обобщённых амплитуд распределений, основу которого составляет требование инвариантности амплитуд по отношению к обобщённым лоренцевским вращениям. Получено полное выражение для калибровочно-инвариантной амплитуды процесса $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi\pi$. Исследованы аналитические свойства амплитуд глубоко-виртуального комптоновского рассеяния и амплитуд жёсткого электророждения векторных мезонов. Показано, что точка вычитания в соответствующих дисперсионных соотношениях определяется так называемым D -членом, который необходим для выполнения фундаментального свойства полиномиальности обобщённых партонных распределений. Исследована пространственно-временная структура полиномиальности и положительной определенности для обобщённых партонных распределений. Сделано предположение о

решающей роли антикоммутирующего вклада (пренебрегавшегося по разным причинам в известной литературе) в обобщённые партонные распределения для выполнения условия полиномиальности. Продемонстрированы возможные следствия присутствия антикоммутирующего вклада в условии положительной определённости, которое по существу является неравенством Коши-Буняковского-Шварца.

Во второй главе исследованы вклады высшего твиста в жёстких процессах столкновения реального и глубоко виртуального фотонов. Построено обобщение предложенного в первой главе метода учёта высшего твиста для процессов рождения двух ρ мезонов в $\gamma\gamma^*$ -столкновениях. На основе экспериментальных данных, представленных коллаборацией L3 (LEP), показана возможность существования экзотического четырёхкваркового резонанса с массой в районе 1.6 GeV. При этом решающую роль играют вклады твиста 4 в амплитудах процессов $\gamma\gamma^* \rightarrow \rho^0 \rho^0$ и $\gamma\gamma^* \rightarrow \rho^+ \rho^-$. Проведен теоретический анализ и приведены оценки возможности исследования экзотических гибридных (кварк-антикварк-глюонных) состояний в двухфотонных столкновениях. Исследовано новое свойство дуальности различных амплитуд $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi\pi$, отличающихся механизмом факторизации. Обнаружена дуальность между t -канальной факторизацией, идущей через механизм с переходными партонными распределениями и s -канальной факторизацией, идущей через механизм с обобщёнными партонными распределениями. Показано, что дуальность может служить правилом отбора для различных моделей, описывающих непертурбативные объекты в эксклюзивных амплитудах. Показано, что обобщённые амплитуды распределений твиста 3 дуальны свёртке между функциями переходных партонных распределений твиста 2 и мезонной амплитуды распределения.

В третьей главе представлен операторный метод выделения вкладов Вандзуры-Вильчека для процессов, амплитуды которых содержат трехкварковые корреляторы. Представленный метод основан на использовании конформного разложения нелокальных операторов в спинорном (или твисторном) представлении. Данный метод не зависит от конкретной параметризации соответствующих корреляторов, поэтому пригоден для любых процессов. Приведены конкретные конформные представления для коэффициентных функций твиста 4 и 5. Вычислены и изучены вклады высшего твиста для нуклонных электромагнитных формфакторов. В рамках правил сумм на световом конусе вычислены нуклонные формфакторы до α_s -поправок к вкладам от амплитуд распределения твиста 3 и 4. Произведен точный учёт кинематических вкладов к нуклонным амплитудам распределений твиста 4 и твиста 5, которые индуцированы операторами с низшим геометрическим твистом. Выполнено разложение на световом конусе с точностью до твиста 4 для трёхкварковых операторов, где кварковые поля определены в разных точках. Представлены новые вычисления вкладов твиста 5 вне светового конуса и предложена наиболее общая модель для амплитуд распределений лидирующего твиста, включая вклады от полиномов второго порядка. Вычислены двадцать две коэффициентные функции с точностью до α_s -поправок, причем двадцать из них вычислены впервые. Во избежание смешивания с нефизическими операторами в рамках размерной регуляризации использована перенормировочная процедура для операторов с открытыми спинорными индексами. На основе проведенного численного анализа сделан вывод о том, что электромагнитные формфакторы могут быть описаны с ожидаемой точностью в 10-20% при использова-

нии нуклонных амплитуд распределений, достаточно слабо отличающихся от асимптотических форм.

В четвёртой главе исследованы различные вклады высшего твиста в жёстких процессах электророждения поперечно-поляризованного ρ мезона и экзотического гибридного кварк-антикварк-глюонного мезона с $J^{PC} = 1^{-+}$. Показано, что вопреки наивным ожиданиям, амплитуда эксклюзивного жёсткого электророждения гибридного мезона имеет неисчезающий вклад от твиста 2, поскольку соответствующие кварк-антикварковые корреляторы на световом конусе включают глюонные компоненты за счёт калибровочной инвариантности и использования уравнений движения КХД. Обоснована возможность исследования данных экзотических мезонов на эксперименте. Изучены механизмы нарушения факторизации амплитуд электророждения поперечно-поляризованных векторных мезонов. Показан недостаток обычной процедуры Бродского-Лепаж-Маккензи для фиксации масштаба в эксклюзивном электророждении векторных мезонов – он связан с присутствием нефизических сингулярностей в соответствующих выражениях. Предложено обобщение процедуры Бродского-Лепаж-Маккензи для фиксации масштаба, которое не содержит нефизических сингулярностей.

В пятой главе изучены вклады высшего твиста в инклюзивных и полунклюзивных жёстких процессах. Доказано, что для восстановления абелевой калибровочной инвариантности адронного тензора процесса Дрелла-Яна с поперечно-поляризованным адроном необходимо добавить вклад дополнительной диаграммы с функциями твиста 3. Продемонстрировано, что новый дополнительный вклад напрямую связан с определенной комплексной прескрипцией в глюонном полюсе кварк-глюонной функции. Показана особая роль контурной калибровки для глюонных полей. Доказано, что причинная прескрипция в кварковом пропагаторе, входящем в жёсткую часть стандартной диаграммы, связана с выбором контурной калибровки для глюонов и, в свою очередь, с представлением кварк-глюонной функции в форме глюонного полюса с упомянутой комплексной прескрипцией. Полученное представление кварк-глюонной функции генерирует дополнительную диаграмму, вклад от которой прежде отсутствовал при вычислении мнимой части, и дает новый вклад в мнимую часть, который абсолютно необходим для калибровочной инвариантности. Продемонстрировано, что учёт полученных новых вкладов в односпиновую асимметрию процесса Дрелла-Яна с поперечно-поляризованным адроном ведет к дополнительному общему фактору 2, что важно для сравнения с экспериментом. Разработан новый метод факторизации, который может быть применен для любого процесса с двумя токами, и продемонстрировано приложение разработанного метода к случаю e^+e^- аннигиляции, где рождаются два адрона, принадлежащие к различным струям.

В качестве стилистического замечания можно отметить некоторую перегруженность диссертации англицизмами и аббревиатурами, которые иногда делают её неудобочитаемой. Количество используемых аббревиатур столь велико, что для них уместно было бы ввести даже отдельный словарь (МЛК, ОАР, ОПР, ПАР, АР, ПССК, ГВКР, ОСА, ВВ, БЛМ). Встречаются отдельные неуклюжие или жаргонные выражения (как например "вперёдковый Комптон-эффект") и орфографические ошибки (как систематическое употребление "тоже" вместо "то же"). В целом же опечатки и опечатки немногочисленны, а всю диссертацию приятно отличает опрятность.

Отмеченные погрешности имеют исключительно стилистический характер. Они ни в малейшей степени не касаются полученных автором результатов, не подвергают их сомнению и не умаляют их научной значимости.

Диссертация основана на опубликованных, в том числе в реферируемых высоко-рейтинговых журналах, работах. Основные результаты докладывались автором на семинарах и международных конференциях. Выводы диссертации обоснованны, полностью соответствуют поставленной задаче и логично вытекают из проведённой работы. Все выносимые на защиту результаты получены при определяющем вкладе самого автора. Автореферат полно и ясно отражает содержание диссертации. Полученные диссертантом результаты могут использоваться в ИТЭФ, ИФВЭ, ИЯИ, ИЯФ, НИИЯФ, ПИЯФ, ОИЯИ, ФИАН, а также других научных центрах России, Европы, Азии и США.

Диссертация И. В. Аникина отвечает всем требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор И. В. Аникин заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв составил:
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФИАН

Подпись С.П.Баранова удостоверяю
учёный секретарь ФИАН



С.П.Баранов

Н.Г.Полухина

Данные об оппоненте: Баранов Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории электронов высоких энергий ФИАН
Тел.: (499) 132 6317, E-mail: baranov@sci.lebedev.ru
ФГБУН Физический институт им.П.Н. Лебедева РАН
119991 Москва, Ленинский проспект 53, Тел.: (499) 132 4264, Fax: (499) 135 7880
E-mail: postmaster@lebedev.ru, <http://www.lebedev.ru>