

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Аникина Игоря Валерьевича "Вклады высшего твиста в жестких процессах КХД"**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Диссертация Аникина Игоря Валерьевича "Вклады высшего твиста в жестких процессах КХД" посвящена весьма **актуальной** проблеме исследования в рамках квантовой хромодинамики (КХД) при высоких энергиях жестких эксклюзивных процессов, а также жестких инклюзивных процессов с участием поляризованных адронов. С увеличением энергии и светимости ускорителей эксперименты на L3 (LEP, ЦЕРН), HERMES (HERA, ДЭЗИ), COMPASS (SPS, ЦЕРН) позволили изучать эти процессы впервые или с ранее недостижимой точностью. Программы проектов будущих ускорителей на встречных пучках (например, проект Международного линейного коллайдера - ILC) также включают исследования данных процессов.

В жестких инклюзивных процессах с неполяризованными адронами имеющиеся подходы, основанные на теореме о факторизации сечений рассеяния для жестких партонных (пертурбативных) и мягких адронных (непертурбативных) вкладов в приближении ведущего твиста, хорошо описывают имеющиеся данные. Это дает уникальную возможность изучать непертурбативную динамику через партонные функции распределения.

В случае жестких эксклюзивных процессов (или инклюзивных процессов с участием поляризованных адронов) различные подходы, опирающиеся на теорему о факторизации амплитуд рассеяния, часто должны учитывать также высшие твисты, несмотря на то, что они формально подавлены степенью Q , где Q – передача импульса. Информация о непертурбативной динамике в данном случае содержится в амплитудах партонных распределений (волновой функции партоннов). Таким образом, становится весьма актуальной разработка методов последовательного вычисления и учета поправок по $1/Q$ в различных порядках теории возмущения по константе взаимодействия. Такие поправки необходимы для как для теоретического так и экспериментального анализа жестких эксклюзивных процессов, особенно в области умеренных значений Q .

Главной **целью** данной диссертации является разработка и развитие эффективных методов учета поправок высшего твиста для исследования составной структуры адронов в рамках различных схем факторизации КХД для различных жестких эксклюзивных процессов, а также инклюзивных процессов

с участием поляризованных адронов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и перечня цитируемой литературы, содержащего 252 ссылки. В диссертации содержится 56 рисунков и 2 таблицы. Общий объем диссертации составляет 281 страницу.

Введение содержит краткую характеристику темы исследования и обоснование ее актуальности, а также формулировку целей работы и описание структуры диссертации.

В первой главе рассмотрен процесс глубоко-виртуального комптоновского рассеяния (ГВКР) и предложен оригинальный метод учета высшего твиста в жестких эксклюзивных процессах. Изучена роль твиста 3 для восстановления абелевой калибровочной инвариантности амплитуд глубоко-виртуального комптоновского рассеяния на адронах со спинами 0, 1. Рассмотрено обобщение на случай адронов с произвольным спином. Кроме того, предложен альтернативный способ вывода соотношений Вандзуры-Вильчека для пионных обобщенных партонных распределений и пионных обобщенных амплитуд распределений, основу которого составляет требование инвариантности амплитуд по отношению обобщенных лоренцевских вращений.

Получено полное выражение для калибровочно-инвариантной амплитуды процесса $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi\pi$. Исследованы аналитические свойства амплитуд глубоко-виртуального комптоновского рассеяния и амплитуд жесткого электророждения векторных мезонов.

Показано, что точка вычитания в соответствующих дисперсионных соотношениях определяется так называемым D-членом, который необходим для выполнения фундаментального свойства полиномиальности обобщенных партонных распределений. Исследована пространственно-временная структура полиномиальности и положительной определенности для обобщенных партонных распределений. Сделано предположение о решающей роли антикоммутаторного вклада, которым по разным причинам пренебрегали, в обобщенные партонные распределения для выполнения условия полиномиальности. Продемонстрированы возможные следствия присутствия антикоммутаторного вклада в условии положительной определенности, являющееся по существу неравенством Коши-Буняковского-Шварца.

Во второй главе исследованы вклады высшего твиста в жестких процессах столкновения реального и глубоко-виртуального фотонов. Построено обобщение предложенного в первой главе метода учета высшего твиста для процессов рождения двух ρ мезонов в $\gamma\gamma^*$ -столкновениях. На основе экспериментальных данных, представленных коллаборацией L3 (LEP ЦЕРН), показана возможность существования экзотического четырех-кваркового

резонанса с массой в районе 1.6 ГэВ. При этом решающую роль в данном случае 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 теоретические оценки возможности исследования экзотических гибридных (кварк-антикварк-глюонных) состояний в двух-фотонных столкновениях. Исследован новый феномен дуальности различных механизмом факторизации амплитуд $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi\pi$. Обнаружена дуальность между t-канальной факторизацией, идущей через механизм с переходными партонными распределениями и s-канальной факторизацией, идущей через механизм с обобщенными партонными распределениями. Показано, что дуальность может служить правилом отбора для различных моделей, описывающих непертурбативные объекты в эксклюзивных амплитудах. Показано, что обобщенные амплитуды распределений твиста 3 дуальны свертке функций переходных партонных распределений твиста 2 и мезонной амплитуды распределения.

В третьей главе представлен операторный метод выделения вкладов Вандзуры-Вильчека для процессов, амплитуды которых содержат трех-кварковые 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 нуклонным электромагнитных формфакторов. В рамках правил сумм на световом конусе, вычислены нуклонные формфакторы до поправок к вкладам от амплитуд распределения твиста 3 и 4. Произведен точный учет 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 трех-кварковых 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. Для избежания 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%, используя при этом нуклонные амплитуды распределений достаточно слабо отличающиеся от асимптотических выражений.

В четвертой главе исследованы различные вклады высшего твиста в жестких процессах электророждения поперечно-поляризованного ρ -мезона и экзотического гибридного кварк-антикварк-глюонного мезона с $J^{PC} = 1^{-+}$.

Показано, что вопреки наивным ожиданиям амплитуда эксклюзивного жесткого электророждения гибридного мезона имеет неисчезающий вклад от твиста 2, поскольку соответствующие кварк-антикварковые корреляторы на световом конусе включают глюонные компоненты за счет калибровочной инвариантности и использовании уравнений движения КХД. Обоснована возможность исследования данных экзотических мезонов на эксперименте. Изучены механизмы нарушения факторизации амплитуд электророждения поперечно-поляризованных векторных мезонов.

Показан недостаток применения процедуры Бродского-Лепаж-Маккензи (БЛМ) для фиксации масштаба в эксклюзивном электророждении векторных мезонов при применении к амплитудам процесса. Недостаток связан с присутствием нефизических сингулярностей в соответствующих выражениях. Предложено обобщение процедуры БЛМ для фиксации масштаба, которое не содержит нефизических сингулярностей, при применении к наблюдаемым сечениям процессов.

В пятой главе изучены вклады высшего твиста в полуинклюзивных жестких процессах и в инклюзивных жестких процессах с участием поперечно-поляризованного адрона. 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 определенным предписанием для обработки глюонного полюса кварк-глюонной функции. Показана особая роль контурной калибровки для глюонных полей. Доказано, что данное предписание, связанное с причинностью в кварковом пропагаторе, входящим в жесткую часть стандартной диаграммы, связано с выбором контурной калибровки для глюонов и, в свою очередь, с представлением кварк-глюонной функции в форме глюонного полюса с данным предписанием.

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 учет полученных новых вкладов в одно-спиновую асимметрию процесса Дрелла-Яна с поперечно-поляризованным адроном ведет к дополнительному общему фактору 2, что важно для сравнения с

экспериментом.

Также развит новый метод факторизации, который может быть применим для любого процесса с двумя токами, и продемонстрировано приложение разработанного метода на случай e^+e^- аннигиляции, где регистрируются два адрона, будучи в различных струях.

В заключении представлены основные результаты диссертации. Также обсуждена апробация данной диссертационной работы на различных семинарах, совещаниях и конференциях.

На защиту выносятся следующие **основные результаты**:

1. Предложен метод, на основе которого впервые вычислены вклады высшего твиста в амплитудах глубоко-неупругого комптоновского рассеяния на бесспиновой мишени. Построено обобщение на случай различных жестких эксклюзивных процессов с участием адронов с произвольным спином. Предложен альтернативный способ вывода соотношений Вандзуры-Вильчека для пионных обобщенных партонных распределений и пионных обобщенных амплитуд распределений, основу которого составляет требование инвариантности амплитуд по отношению к обобщенным лоренцевским вращениям.

2. Исследованы аналитические свойства амплитуды глубоко-виртуального комптоновского рассеяния и амплитуды жесткого электророждения векторных мезонов. Показано, что точка вычитания в соответствующих дисперсионных соотношениях определяется так называемым D -членом, который необходим для выполнения фундаментального свойства полиномиальности обобщенных партонных распределений.

3. На основе предложенного подхода впервые вычислены вклады высшего твиста для процессов эксклюзивного рождения двух мезонов в $\gamma\gamma^*$ -столкновениях. При анализе экспериментальных данных, представленных коллаборацией **L3 (LEP ЦЕРН)**, показана возможность существования экзотического четырех-кваркового резонанса с массой в районе **1.6** ГэВ. Показано, что решающую роль в данном случае играют вклады твиста **4** в амплитудах процессов $\gamma\gamma^* \rightarrow \rho^0 \rho^0$ и $\gamma\gamma^* \rightarrow \rho^+ \rho^-$. Проведен теоретический анализ и обоснована возможность исследования экзотических гибридных (кварк-антикварк-глюонных) состояний в двух-фотонных столкновениях.

4. Разработан альтернативный, не зависящий от конкретных параметризаций, операторный метод выделения вкладов Вандзуры-

Вильчека для процессов с трех-кварковыми корреляторами, который основан на использовании конформного разложения нелокальных операторов в спинорном/твисторном представлении. В рамках правил сумм КХД на световом конусе вычислены нуклонные электромагнитные формфакторы вплоть до α_s -поправок к вкладам от амплитуд распределения твиста 3 и 4. На основе проведенного численного анализа сделан вывод о том, что электромагнитные формфакторы могут быть описаны с ожидаемой точностью в 10-20%, используя при этом нуклонные амплитуды распределений, достаточно слабо отличающиеся от асимптотических выражений.

5. Впервые вычислены вклады высшего твиста в жестких процессах электророждения поперечно-поляризованного мезона и экзотического гибридного кварк-антикварк-глюонного мезона с $J^{PC} = 1^{-+}$. Показано, что вопреки наивным ожиданиям амплитуда эксклюзивного жесткого электророждения гибридного мезона имеет неисчезающий вклад твиста 2. Соответствующие кварк-антикварковые корреляторы на световом конусе включают глюонные компоненты за счет, во-первых, калибровочной инвариантности и, во-вторых, использования уравнений движения КХД. Обоснована возможность исследования экзотических гибридных мезонов на эксперименте.

6. На основе использования контурной калибровки для глюонных полей, зависящей от выбранного пути в пространстве Минковского, впервые обнаружен новый вклад высшего твиста 3 в процессах Дрелла-Яна с поперечно-поляризованным адроном, с помощью которого решается проблема абелевой калибровочной инвариантности адронного тензора данного процесса. Показано, что учет полученных новых вкладов в одно-спиновую 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 на случай полуинклюзивного процесса в e^+e^- аннигиляции, где регистрируются два адрона.

Среди основных результатов диссертации отметим, что автором предложен и разработан метод коллинеарной факторизации на световом конусе, основанный на факторизации в импульсном представлении вокруг доминантного светоподобного направления. Предложенный им метод приводит к наиболее естественным определениям соответствующих корреляторов. Минимальный набор независимых корреляторов получается с помощью использования интегральных соотношений, вытекающих из уравнений движения КХД и

требования инвариантности амплитуд рассеяния относительно обобщенных лоренцевских вращений на световом конусе. Также, предложенный метод распространен на факторизацию при описании жестких инклюзивных процессов с поперечно-поляризованным нуклоном на основе ковариантного подхода без выделения доминантного направления на световом конусе.

Диссертация написана в сжатом, но довольно ясном стиле. Небольшим недостатком диссертации можно считать некоторую фрагментарность и небрежность изложения. В качестве небольшого замечания укажем, что в четвертой главе при обсуждении применения метода Бродского-Лепаж-Маккензи (БЛМ) к эксклюзивным процессам отсутствует ссылка на работу С. Бродского и др., Phys. Rev. D57 (1998) 245, первую в этом направлении. Кроме того, во второй главе не указана величина энергии $\gamma\gamma^*$ -соударений при сравнении с данными коллаборации L3 (LEP, ЦЕРН). Имеется также некоторое количество опечаток, например, в словах «несохранение» (стр. 184) и «скачок» (стр. 224), местами имеется проблема с запятыми, излишне вольное использованием дефиса и т.п. Но все эти упомянутые недостатки не меняют общей высокой положительной оценки диссертации.

Диссертация является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Содержащиеся в ней многие результаты получены впервые. Ее **научная и практическая ценность** состоит в том, дает основу для создания нового направления при описания широкого набора жестких процессов взаимодействий с участием адронов при высоких энергиях в рамках единого подхода с учетом высших твистов, а также представляет новые возможности для анализа и интерпретации экспериментальных данных. Результаты диссертации могут быть использованы в российских научных центрах ОИЯИ, ПИЯФ НИЦ КИ, ИФВЭ НИЦ КИ, ИТЭФ НИЦ КИ, НИИЯФ МГУ, ФИАН, ИЯИ РАН, ИЯФ СО РАН и др., а также в международных центрах ЦЕРН, ДЭЗИ, JLAB и др.

Результаты, полученные в диссертации, являются новыми и оригинальными, с достаточной полнотой опубликованы в реферируемых высокорейтинговых научных журналах, неоднократно докладывались на международных научных семинарах, совещаниях и конференциях. **Достоверность** результатов, полученных автором диссертации, в рамках стандартных методов квантовой теории поля не вызывает сомнения и подтверждается строгостью математических выводов, согласованностью с известными результатами в предельных случаях. Многие результаты, представленные в диссертации подтверждены также другими исследователями. Основные работы диссертации являются высокоцитируемыми и хорошо известны специалистам. Вклад автора является определяющим в работах, составляющих основу диссертации. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Диссертация Аникина Игоря Валерьевича "Вклады высшего твиста в жестких процессах КХД", соответствует специальности 01.04.02 - «Теоретическая физика» и отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, а ее автор Аникин Игорь Валерьевич несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

5 сентября 2014 г.

Ведущий научный сотрудник
Заместитель Руководителя Отделения Физики
Высоких Энергий ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ
д.ф.-м.н. Ким Виктор Тимофеевич



Подпись В.Т. Кима удостоверяю

Ученый Секретарь ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ
к.ф.-м.н. И.А. Зобкало



Данные об оппоненте:

Ким Виктор Тимофеевич, доктор физико-математических наук,
заместитель руководителя Отделения физики высоких энергий,
ПИЯФ НИЦ Курчатовский институт, г. Гатчина
e-mail: kim@pnpi.spb.ru
тел.: +7 (813 71) 46722
адрес: Россия, 188300, Ленинградская обл., г.Гатчина, Орлова роща,
ФГБУ ПИЯФ