

На правах рукописи

БОГДАН Андрей Владимирович

АМПЛИТУДЫ КХД С КВАРКОВЫМ ОБМЕНОМ
ПРИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

01.04.02 - теоретическая физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК-2007

Работа выполнена в Институте ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Фадин Виктор Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Липатов Лев Николаевич – член-корреспондент РАН, профессор,
Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова РАН,
г. Санкт-Петербург.

Сербо Валерий Георгиевич – доктор физико-математических наук, профессор,
Новосибирский Государственный университет,
г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – ГИЦ РФ "Институт физики высоких энергий",
г. Протвино, Московская область.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ " 2007 г.
в " ____ " часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.02
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И. Будкера СО РАН

Автореферат разослан " ____ " _____ " 2007г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Физика полужестких процессов является одним из важнейших разделов физики сильных взаимодействий. Повышенный интерес к этой области науки вызван тем обстоятельством, что эти процессы в настоящее время интенсивно исследуются экспериментально. Одним из наиболее плодотворных методов теоретического исследования полужестких процессов является в настоящее время метод, основанный на уравнения БФКЛ (Балицкий–Фадин–Кураев–Липатов) и использующий замечательное свойство квантовой хромодинамики (КХД) — реджезацию глюона. В подходе БФКЛ померон возникает как связанное состояние двух реджезованных глюонов. Однако наряду с помероном, определяющим асимптотику сечений при высоких энергиях, феноменологии адронов требуются реджеоны, которые могут быть построены в пертурбативной КХД как бесцветные состояния реджезованного кварка и антикварка. Одним из методов теоретического анализа обмена несинглетными по аромату вторичными реджеонами является метод, основанный на применении уравнения эволюции с обменом реджезованными кварками в t -канале, аналогичного уравнению БФКЛ [1]. Трудности в этой области связаны, в частности, с тем обстоятельством, что радиационные поправки к приближению главных логарифмов (ГЛП), в котором построено уравнение эволюции, неизвестны. Их нахождение позволит существенно уточнить существующие теоретические предсказания для вкладов в наблюдаемые величины, связанных с обменом реджеоном.

Целью настоящей работы являлось исследование амплитуд КХД с обменом фермионом в пределе больших энергий в главном и следующем за ним приближении. Мультиреджевская форма подобных амплитуд является гипотезой, которая не была доказана даже в главном логарифмическом приближении. Построение же следующего приближение требует, помимо доказательства гипотезы, вычисления поправок к основным элементам амплитуды: траектории Редже кварка и эффективным вершинам взаимодействия реджезованного кварка с кварком и глюоном. Настоящая диссертация посвящена решению этих задач.

Научная новизна. Основные результаты диссертации. Мультиреджевская форма амплитуд с участием кварков доказана в главном логарифмическом приближении. Доказательство проведено для мульти-

реджевской (МРК) и квази-мультиреджевской кинематики (КМРК). Гипотеза о мультиреджевской форме проверена в следующем за главным логарифмическом приближении (СГЛП) для упругого процесса кварк-глюонного рассеяния на уровне одно- и двух-петлевого приближения. Найдено точное выражение для двухпетлевой поправки к траектории Редже кварка. Найдена однопетлевая поправка к эффективной вершине рождения глюона реджезованным кварком.

Научная и практическая ценность результатов работы. С практической точки зрения исследованные в диссертации радиационные поправки к амплитудам с обменом кварка в пределе высоких энергий важны по нескольким причинам. Найденные поправки позволяют построить ядро уравнения на функцию Грина (см. [1]) вторичного реджеона в следующем за главным логарифмическом приближении. Это позволит определить область энергий и передач импульсов, где применим данный подход. Кроме того, например при вычислении по теории возмущений вклада в полное сечение рассеяния виртуальных фотонов от обмена вторичным реджеоном численный коэффициент в линейной зависимости аргумента α_s от виртуальности фотона находится вне точности главного логарифмического приближения. Это существенно уменьшает предсказательную силу этого приближения, так как численные результаты могут сильно модифицироваться изменением этого коэффициента.

Построение доказательства мультиреджевской формы амплитуд с участием кварков в главном логарифмическом приближении, а также проверка этой гипотезы в следующем приближении для упругого процесса на уровне двух петель распространяют идеи, развитые для глюонных обменов, на процессы с обменом фермионом. Исследование подобных обменов даст более глубокое теоретическое понимание высокоэнергетической асимптотики в пертурбативной квантовой хромодинамике.

Апробация диссертации. Работы, положенные в основу диссертации, обсуждались на семинаре теоретического отдела Института ядерной физики им. Г.И. Будкера, также они докладывались на научной сессии-конференции "Физика фундаментальных взаимодействий" (2-6 декабря 2002г., ИТЭФ, Москва) и XXXIX зимней школе теоретической физики ПИЯФ (14-20 февраля 2005г., п. Репино, Санкт-Петербург).

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений, изложена на 148

страницах машинописного текста, содержит 18 рисунков и 88 наименований библиографии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность задач, рассматриваемых в диссертации, сформулированы основные цели работы. Кратко изложено содержание всех глав диссертации.

В первой главе приводится полное доказательство мультиреджевской формы амплитуд для произвольного неупругого кварк–глюонного процесса во всех порядках теории возмущений. Доказательство построено для ГЛП в мультиреджевской кинематике (МРК), а также для квази–мультиреджевской кинематики (КМРК). В отличие от МРК, для которой любая пара рожденных частиц имеет инвариантную массу много больше характерного поперечного импульса, КМРК включает струи частиц с инвариантной массой порядка характерного поперечного импульса. В следующем за ГЛ приближении в КМРК может рождаться только одна пара частиц с ограниченной инвариантной массой, любые другие пары частиц в этой области должны иметь большую инвариантную массу. Рассмотрение КМРК очень близко к МРК и связано с минимальным изменением необходимых формул. Доказательство мультиреджевской формы амплитуд базируется на соотношениях, получаемых из требования совместимости этой формы с s -канальной унитарностью (соотношения бутстрапа). Эти соотношения выводятся и доказываются, что их выполнение гарантирует мультиреджевскую форму амплитуды. Каждой неупругой амплитуде соответствует свой набор соотношений бутстрапа, что приводит к бесконечному числу ограничений, накладываемых на небольшой набор эффективных вершин и траекторий Редже. Оказывается, что выполнение всех соотношений бутстрапа обеспечивается всего несколькими условиями (условиями бутстрапа) на реджеонные вершины и траектории. Выполнение условий бутстрапа продемонстрировано явным вычислением в приложении к диссертации. Использованный метод доказательства аналогичен примененному в работе [2] при доказательстве мультиреджевской формы амплитуды для глюонных обменов. Однако здесь, вместо перехода к парциальным волнам, использован операторный формализм. Этот формализм был предложен для глюонных обменов в работе [3] и затем развит в несколько иной форме в работе [4].

В этой диссертации он адаптирован к амплитудам с участием кварка таким образом, что все формулы, в частности условия бутстрапа, имеют универсальный вид независимо от квантовых чисел в t -канале.

Вторая глава посвящена анализу структуры амплитуды упругого рассеяния с обменом фермионом в t -канале в реджевской кинематике в следующем за главным логарифмическом приближении. Предсказания реджевской формы амплитуды сравниваются с точным одно- и двухпетлевым расчетом. Для этого проводится вычисление высокоэнергетического предела однопетлевой (работы [5]) и двухпетлевой (работа [6]) амплитуд кварк-глюонного рассеяния. Показано, что на двухпетлевом уровне главные логарифмические члены реальной части, а также главные и следующие за главными логарифмические члены мнимой части проекции амплитуды на положительную сигнатуру в точности совпадают с предсказанием гипотезы о реджевской форме амплитуды. Эта гипотеза определяет также вид следующего за главным логарифмического члена реальной части проекции амплитуды на положительную сигнатуру. Предположение ее верности позволило вычислить двухпетлевую поправку к траектории Редже кварка в пределе $D \rightarrow 4$ (в методе размерной регуляризации размерность пространства-времени $D = 4 + 2\epsilon$).

В третьей главе высокоэнергетическая амплитуда упругого рассеяния с обменом фермионом в t -канале исследована в СГЛП методами, основанными на s -канальной унитарности и аналитичности амплитуд рассеяния. Эти методы были развиты при исследовании процессов с обменом глюоном (см. работы [7]) и успешно применены к процессам с фермионным обменом [8]. А именно, при помощи соотношения унитарности вычислены логарифмический и нелогарифмический вклад в двухпетлевой s -канальный скачок амплитуды обратного кварк-глюонного рассеяния с положительной сигнатурой и доказано, что только состояние цветового триплета в t -канале дает вклад в скачок. Проведено сравнение вычисленного скачка со скачком амплитуды с обменом реджезованным кварком. Логарифмические члены совпадают, нелогарифмические члены скачка выражаются через однопетлевые поправки к эффективным вершинам частица-частица-реджеон (ЧЧР), которые известны, и двухпетлевую поправку к траектории кварка, что дает возможность вычислить последнюю. Двухпетлевая поправка к траектории Редже кварка вычислена для произвольной размерности пространства-времени D . В пределе $D \rightarrow 4$ выражение для траектории совпадает с полученным во второй главе данной диссертации. Это согласие является сильной про-

веркой многих промежуточных результатов, использованных в вычислениях.

Четвертая глава посвящена вычислению СГЛП поправки к эффективной вершине рождения глюона реджезованным кварком. Поправка вычислена для безмассовых кварков в пределе $D \rightarrow 4$. Для её нахождения рассмотрен процесс аннигиляции кварка–антикварка в два фотона и глюон в мультiredжевской кинематике в СГЛП. Рассмотрение фотонов (а не глюонов) в области фрагментации начальных кварков существенно упрощает задачу и справедливо в предположении гипотезы о мультiredжевской форме амплитуды (которая, хоть и не доказана окончательно в СГЛП, прошла множество нетривиальных проверок). Эффективная вершина выражается двумя функциями (вершинами) \mathcal{R} и \mathcal{L} . В ГЛП важна только сумма вершин в борновском приближении $\mathcal{R}^{(0)} + \mathcal{L}^{(0)}$. Вычисление СГЛП поправки означает нахождение разницы вершин в борновском приближении ($\mathcal{R}^{(0)} - \mathcal{L}^{(0)}$) и суммы вершин в однопетлевом приближении ($\mathcal{R}^{(1)} + \mathcal{L}^{(1)}$). Разница $\mathcal{R}^{(0)} - \mathcal{L}^{(0)}$ найдена из сравнения вычисления s -канальных скачков амплитуды, найденных с однопетлевой точностью, и скачков предсказываемых гипотезой о мультiredжевской форме. Вычисления суммы $\mathcal{R}^{(1)} + \mathcal{L}^{(1)}$ основано на сравнении неупругой амплитуды с квантовыми числами реджезованного кварка в кросс-каналах с ее реджевской формой в СГЛП. Указанная амплитуды восстанавливается при помощи методов, основанных на дисперсионных соотношениях, t -канальной унитарности и перенормируемости КХД.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. В главном логарифмическом приближении доказана мультiredжевская форма амплитуды во всех порядках теории возмущений для произвольных неупругих кварк–глюонных процессов.
2. Гипотеза о мультiredжевской форме амплитуд с участием кварков доказана для квази–мультiredжевской кинематики.
3. Реджевская форма амплитуды с обменом кварком проверена в следующем за главным приближении для упругого процесса кварк–глюонного рассеяния в реджевской кинематике в порядке α_s^2 .
4. В следующей за главным логарифмическом приближении найдена поправка к траектории Редже кварка в произвольном пространстве–времени D .

5. В следующем за главным логарифмическом приближении найдена поправка к эффективной вершине рождения глюона реджезованным кварком в пределе $D \rightarrow 4$.

Вычисленные поправки являются необходимыми элементами для построения следующего за главным логарифмического приближения (СГЛП) ядра уравнения эволюции с обменом реджезованными кварками в t -канале, аналогичного уравнению БФКЛ. Также знание этих поправок необходимо для доказательства мультiredжевской формы амплитуд с участием кварка в СГЛП.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. The Quark Regge trajectory at two loops, A.V. Bogdan, V. Del Duca, V.S. Fadin, E.W.N. Glover, JHEP **0203** (2002) 032.
2. Quark Regge trajectory in two loops from unitarity relations, A.V. Bogdan, V.S. Fadin, Ядерная Физика **68** (2005) 1659.
3. A Proof of the reggeized form of amplitudes with quark exchanges, A.V. Bogdan, V.S. Fadin, Nucl. Phys. **B740** (2006) 36.
4. Verification of bootstrap conditions for amplitudes with quark exchanges in QMRK, A.V. Bogdan, A.V. Grabovsky, Nucl. Phys. **B757** (2006) 211.
5. Radiative corrections to the Reggeized quark — Reggeized quark — gluon effective vertex, A.V. Bogdan, A.V. Grabovsky, принято к печати в Nucl. Phys. **B**, hep-ph/0701144.

Список литературы

- [1] J. Kwiecinski, Leading q anti-q regge singularities in perturbative QCD, Phys. Rev. **D26** (1982) 3293;
R. Kirschner, Regge Asymptotics Of Scattering Amplitudes In The Logarithmic Approximation Of Qcd, Z. Phys. **C31** 135 (1986).

- [2] Я.Я. Балицкий, Л.Н. Липатов, В.С. Фадин, Реджевские процессы в неабелевых калибровочных теориях, Материалы XIV зимней школы ЛИЯФ, Ленинград (1979) 109.
- [3] M. Braun and G. P. Vacca, The 2nd order corrections to the interaction of two Reggeized gluons from the bootstrap, Phys. Lett. **B454** (1999) 319; The Bootstrap for impact factors and the gluon wave function, Phys. Lett. **B477** (2000) 156.
- [4] V. S. Fadin, R. Fiore, M. I. Kotsky, and A. Papa, Strong bootstrap conditions, Phys. Lett. **B495** (2000) 329.
- [5] R. K. Ellis and J. C. Sexton, QCD Radiative Corrections To Parton Parton Scattering, Nucl. Phys. **B269** (1986) 445;
Z. Kunszt, A. Signer and Z. Trocsanyi, One loop helicity amplitudes for all $2 \rightarrow 2$ processes in QCD and N=1 supersymmetric Yang-Mills theory, Nucl. Phys. **B411** (1994) 397.
- [6] C. Anastasiou, E. W. N. Glover, C. Oleari and M. E. Tejeda-Yeomans, Two-loop QCD corrections to massless quark gluon scattering, Nucl. Phys. **B605** (2001) 486.
- [7] Л.Н. Липатов, Реджезация векторного мезона и вакуумная особенность в неабелевых калибровочных теориях, Яд. Физ. **23** (1976) 642; V.S. Fadin, E.A. Kuraev, L.N. Lipatov, On the pomeron singularity in asymptotically free theories, Phys. Lett. **B60** (1975) 50; Мультиреджевские процессы в теории Янга-Миллса, ЖЭТФ **71** (1976) 840; Особенность Померанчука в неабелевых калибровочных теориях, ЖЭТФ **72** (1977) 377.
- [8] В.С. Фадин, В.Е. Шерман, Процессы с фермионным обменом в неабелевых калибровочных теориях, ЖЭТФ **72** (1977) 1640.