

*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  $\alpha_s$  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  $\alpha_s^2$ .
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.