

*На правах рукописи*

**РЕЗНИЧЕНКО Алексей Викторович**

**АМПЛИТУДЫ КХД С ГЛЮОННЫМ ОБМЕНОМ  
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ**

**01.04.02 – теоретическая физика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2012**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ФАДИН  
Виктор Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ЛИПАТОВ  
Лев Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, академик, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН, г. Гатчина, руководитель Отделения теоретической физики.

СЕРБО  
Валерий Георгиевич – доктор физико-математических наук, профессор, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, профессор.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ – Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

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

В.С. Фадин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Полужесткие процессы квантовой хромодинамики (КХД), для которых члены ряда теории возмущений усилены большими логарифмами, представляют интерес как с точки зрения уточнения адронных параметров (прежде всего, партонных функций распределения) и фона в экспериментах по поиску “новой физики”, так и в аспекте исследования нелинейных эффектов взаимодействия партонов. Большинство методов анализа таких процессов основывается на различных уравнениях эволюции: ДГЛАП, БФКЛ, БК и т.д. В области малых  $x = Q^2/s$  для партонных функций распределения и сечений оказываются существенными логарифмы  $\ln(x^{-1})$ , задача суммирования которых решается в подходе Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова (БФКЛ). В его основе лежит гипотеза о реджезации глюона, т.е. предположение о мультиреджевской форме вещественной части амплитуды с глюонным обменом при высоких энергиях.

Реджезация глюона была доказана в КХД в главном логарифмическом приближении (ГЛП), когда суммируются только члены  $(\alpha_s \ln s)^n$  ряда теории возмущений. В следующем приближении (СГЛП), когда суммируются также члены вида  $\alpha_s(\alpha_s \ln s)^n$ , мультиреджевская форма оставалась гипотезой, актуальность обоснования которой в основном диктуется успешным развитием подхода БФКЛ в СГЛП, а также следующими причинами.

Мультиреджевская форма амплитуды активно используется в различных теоретических построениях. В частности, задача переформулировки теории полужестких процессов в терминах эффективного действия с участием полей обычных и реджезованных глюонов была успешно решена Л. Н. Липатовым в ГЛП и близка к завершению в СГЛП.

Наконец, феномен реджезации, вероятно, образует связующее звено между теорией комплексного углового момента Грибова-Редже и теорией супергравитации. Так, гипотеза Малдасены о соответствии предела сильной связи в конформной  $N = 4$  суперсимметричной теории Янга-Миллса (СЯМ) и слабой связи в теории струн типа II В в пространстве анти-де Ситтера ( $AdS_5 \times S^5$ ) принципиально позволяет провести соответствие между помероном, являющимся связанным состоянием двух реджезованных глюонов, и реджезованным гравитоном.

**Цель работы** состоит в обосновании в СГЛП гипотезы о мультиреджевской форме вещественной части многочастичной амплитуды КХД с глюонным обменом при высоких энергиях.

Доказательство гипотезы строится на анализе соотношений, вытекающих из требования совместимости мультиреджевской формы амплитуды с условием s-канальной унитарности, и сводится к проверке так называемых условий бутстрапа, представляющих собой нелинейные связи между реджевскими вершинами и траекторией глюона. Главная задача

заключается в непосредственной проверке данных условий исходя из явного вида реджевских вершин и траектории глюона. Основное внимание в диссертации уделяется наиболее сложным, глюонным, вкладам последнего из непроверенных условий бутстрапа – условию бутстрапа для рождения одного глюона в мультиреджевской кинематике. Вычисление двух его главных составляющих – импакт-фактора и матричного элемента оператора рождения глюона – позволяет осуществить проверку бутстрапа и завершить доказательство гипотезы в СГЛП.

### **Личный вклад автора**

Изложенные в работе результаты получены автором лично либо при его определяющем вкладе.

### **Научная новизна**

Мультиреджевская форма амплитуд КХД с глюонным обменом впервые обоснована в СГЛП. Для реализации этой цели в рамках специально разработанного  $t$ -канального операторного формализма сформулирована общая схема доказательства мультиреджевской формы в СГЛП: оно сведено к проверке соотношений и условий бутстрапа. Далее, в глюонном секторе установлена справедливость последнего из непроверенных до настоящего времени условий бутстрапа. Впервые в пределе  $D \rightarrow 4$  получено полное аналитическое выражение для импакт-фактора рождения глюона в мультиреджевской кинематике (МРК) при переходе реджеона в двухреджеонное состояние в  $t$ -канале, а также для матричного элемента оператора рождения глюона.

### **Научная и практическая ценность**

Мультиреджевская форма амплитуд КХД с глюонным обменом в СГЛП необходима для обоснования подхода БФКЛ в этом приближении, и в частности, для построения уравнения эволюции БФКЛ. Теоретическое развитие в СГЛП подхода БФКЛ, а также его успешное применение к описанию полужестких процессов (например, вычисление сечения  $\gamma^* \gamma^* \rightarrow VV$  фоторождения легких векторных мезонов в столкновениях виртуальных гамма-квантов, сечения  $\gamma^* \gamma^* \rightarrow V+J/\psi$  и т.д.) обуславливает практическую ценность проведенного в диссертации доказательства.

Некоторые компоненты условий бутстрапа, такие как вычисленный в диссертации импакт-фактор рождения глюона в МРК, представляют самостоятельный интерес. В частности, импакт-фактор может применяться для нахождения скачков спиральных амплитуд при исследовании их факторизационных свойств в более сложных теориях, таких как СЯМ  $N=4$ .

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Формулировка общей схемы доказательства мультиреджевской формы амплитуд КХД с глюонным обменом в приближении, следующем за лидирующим логарифмическим. Задача сведена к проверке бесконечного числа соотношений бутстрапа, которые, как показано, все выполняются, если справедливо конечное число условий бутстрапа.
2. Вычисление в следующем за главным порядке в пределе  $D \rightarrow 4$  глюонных поправок к компонентам последнего из непроверенных условия бутстрапа (условия на неупругую амплитуду рождения глюона в МРК): к импакт-фактору и к матричному элементу оператора рождения глюона.
3. Проверка справедливости условия бутстрапа на неупругую амплитуду в глюонном секторе поправок для произвольного цветового представления в t-канале.

## Апробация диссертации

Материалы диссертации докладывались на сессии Отделения ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» в 2005 г. (Москва), на Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-12) в 2006 г. (Новосибирск), на XLI Зимней школе ПИЯФ, секция «Физика атомного ядра и элементарных частиц» в 2007 г. (Санкт-Петербург), на Международной конференции «Young Researchers Workshop “Physics Challenges in the LHC Era”» в 2009 г. (Фраскати, Италия), на Семинаре теоретического отдела ИЯФ СО РАН в марте 2012 г. и опубликованы в научных журналах и препринтах.

## Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений, изложена на 129 страницах и содержит 71 наименование библиографии.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обсуждается актуальность поставленной научной задачи – доказательства в СГЛП гипотезы реджезации глюона.

**В первой главе** вводится точная формулировка гипотезы. Под реджезацией глюона подразумевается факторизованная форма вещественной части многочастичной амплитуды  $A + B \rightarrow A' + J_1 + \dots + J_n + B'$  в наиболее важной кинематической области – в мультиреджевской кинематике (МРК):

$$\text{Re } A_{2 \rightarrow n+2} = 2s \Gamma_{A'A}^{R_1} \left( \prod_{i=1}^n \frac{e^{\omega(q_i)(y_{i-1}-y_i)}}{q_i^2} \gamma_{R_i R_{i+1}}^{J_i} \right) \frac{e^{\omega(q_{n+1})(y_n - y_{n+1})}}{q_{n+1}^2} \Gamma_{B'B}^{R_{n+1}}. \quad (1)$$

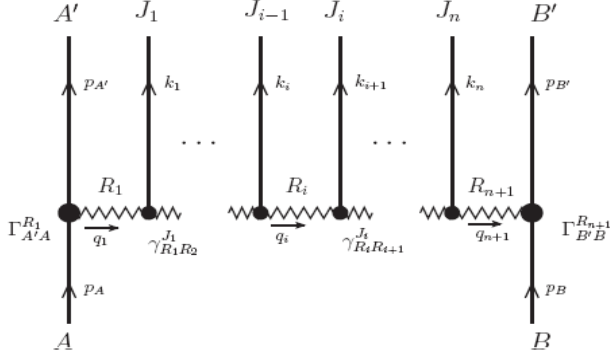


Рис. 1. Вещественная часть (1) мультиреджевской амплитуды множественного рождения струй  $J_i$ ; черные круги – эффективные реджевские вершины; линия зигзага – реджеон  $R_i$  в канале  $t_i$ .

При этом  $j(q_i) = 1 + \omega(q_i)$  – реджевская траектория глюона в канале  $t_i = q_i^2$  (см. рис. 1);  $s = (p_A + p_B)^2$ ;  $\Gamma_{B'B}^{R_j}$  и  $\Gamma_{A'A}^{R_j}$  – эффективные вершины перехода начальных частиц в конечные с излучением  $t$ -канального реджеона (реджезованного глюона)  $R_j$  с импульсом  $q_j$ ;  $\gamma_{R_i R_{i+1}}^{J_i}$  – эффективные вершины рождения струи  $J_i$  с импульсом  $k_i = q_i - q_{i+1}$  при переходе  $R_i$  в  $R_{i+1}$ ; быстроты рожденных струй обозначены как  $y_i$ . МПК подразумевает, что быстроты всех струй строго упорядочены:  $y_0 \gg y_1 \gg \dots \gg y_{n+1}$ . В СГЛП одна из струй  $J_i$  может состоять не только из одного глюона, но также из пары частиц (кварков и глюонов) с близкими быстротами.

Далее приводится подробное описание метода доказательства гипотезы о мультиреджевской форме (1) амплитуд КХД с глюонным обменом в СГЛП. Демонстрируется, что необходимым условием справедливости гипотезы как в ГЛП, так и в СГЛП является выполнение бесконечного набора так называемых соотношений бутстрапа – условий согласованности реджевской формы амплитуды с  $s$ -канальной унитарностью:

$$\frac{1}{-\pi i} \left( \sum_{l=j+1}^{n+1} \text{disc}_{S_{j,l}} - \sum_{l=0}^{j-1} \text{disc}_{S_{l,j}} \right) A_{2 \rightarrow n+2} / s = (\omega(q_{j+1}) - \omega(q_j)) \text{Re } A_{2 \rightarrow n+2} / s, \quad (2)$$

где в левой части скачки от сигнатуризованной амплитуды вычисляются по переменным  $S_{i,j} = (k_i + k_j)^2$ . Затем показывается достаточность этих условий.

Далее демонстрируется, что для выполнения бесконечного числа соотношений бутстрапа (2) достаточно установить справедливость лишь нескольких условий бутстрапа. Последние представляют собой нелинейные

соотношения, связывающие эффективные вершины и реджевскую траекторию. В первой главе также вводится операторный реджеонный формализм, на основе которого доказательство гипотезы, сформулированное в терминах соотношений и условий бутстрапа, выглядит наиболее компактно. В заключении главы приводится обзор условий бутстрапа, справедливость которых уже была установлена ранее.

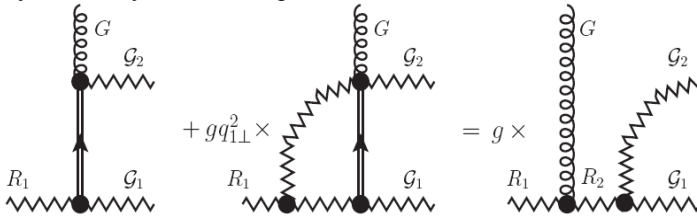


Рис. 2. Графическое изображение неупругого условия бутстрапа (3) для рождения одного глюона  $G$  в мультиреджевской кинематике. Левая часть условия – сумма импакт-фактора рождения глюона и матричного элемента оператора рождения глюона. Правая часть – свертка реджевской вершины  $\gamma_{R_1 R_2}^G$  с собственной функцией октетного ядра БФКЛ.

**Во второй главе** дается детальное описание последнего из непроверенных условий бутстрапа – условия на неупругую амплитуду рождения струи в следующем за главным порядке по константе связи. Глава начинается с обзора основных результатов, касающихся различных компонент реджевской амплитуды и подхода БФКЛ в целом: перечислены найденные ранее реджевские вершины, траектория глюона, матричные элементы ядра уравнения БФКЛ, собственная функция октетного ядра БФКЛ. Эти результаты являются базовыми для дальнейших формулировок и вычислений. Затем явно демонстрируется выполнение неупругого условия в главном порядке по константе связи. Далее дается краткое описание проверки неупругого условия бутстрапа для технически простого случая рождения струи, состоящей либо из двух глюонов, либо из кварк-антикварковой пары. После этого рассматривается наиболее сложный вариант неупругого условия бутстрапа, когда рожденная струя состоит из одного глюона  $G$  (рис. 2):

$$\langle GR_1 | \mathcal{G}_1 \mathcal{G}_2 \rangle + gq_{1\perp}^2 \langle R_w(q_{1\perp}) | \hat{\mathcal{G}} | \mathcal{G}_1 \mathcal{G}_2 \rangle = g\gamma_{R_1 R_2}^G \langle R_w(q_{2\perp}) | \mathcal{G}_1 \mathcal{G}_2 \rangle. \quad (3)$$

Далее через эффективные вершины и “реальную” часть октетного ядра БФКЛ вводятся определения для основных составных частей условия (3):  $\langle GR_1 | \mathcal{G}_1 \mathcal{G}_2 \rangle$  – импакт-фактора рождения глюона;  $\langle R_w(q_{1\perp}) | \hat{\mathcal{G}} | \mathcal{G}_1 \mathcal{G}_2 \rangle$  – матричного элемента оператора рождения глюона в МРК, а также правой части (3). В конце главы проводится анализ всех возможных цветовых

представлений в t-канале, которые допускает условие бутстрапа. Для дальнейшей проверки в следующем за главным порядке выбираются три базисные цветовые структуры.

**Третья глава** посвящена описанию методики вычисления в следующем за главным порядке наиболее сложной части неупругого условия бутстрапа (3) – импакт-фактора рождения глюона в МРК. Последовательно осуществляется явное вычисление импакт-фактора для всех возможных цветовых представлений в t-канале: находится вклад в импакт-фактор симметричной по реджеонам  $G_1$  и  $G_2$  цветовой структуры  $\text{Tr}[T^{G_2}T^GT^{G_1}T^{R_1}]$  и структуры  $\text{Tr}[T^GT^{G_2}T^{G_1}T^{R_1}]$  (а также аналогичного следа с заменой  $G_1$  на  $G_2$ ). Подробно описывается методика вычисления петлевых вкладов в импакт-фактор для каждого элемента цветового базиса. В заключении третьей главы в пределе  $D \rightarrow 4$  размерностной регуляризации представлен явный аналитический вид импакт-фактора для всех цветовых представлений в t-канале в глюонном секторе. Технические детали вычисления представлены в Приложении А. Сводка интегралов по импульсам в поперечном пространстве приведена в Приложении Г.

**Четвертая глава** диссертации посвящена проверке неупругого условия бутстрапа (3) для рождения одного глюона в МРК в случае произвольного цветового представления в t-канале. Проверка осуществляется на основе вычислений импакт-фактора, найденного в предыдущей главе, а также матричного элемента оператора рождения глюона. Глава начинается с методики его нахождения. Технические детали этого вычисления для вкладов симметричной цветовой структуры приведены в Приложении Б. В качестве побочного результата были выведены, а затем применены для упрощения оригинальные соотношения для функций дилогарифмического типа. Сводка этих формул приведена в Приложении В. Далее, представлен явный результат вычисления матричного элемента оператора рождения глюона. Заключительная часть главы посвящена проверке справедливости неупругого условия бутстрапа (3) для всех возможных цветовых представлений в t-канале. Исходя из выводов первой главы данная проверка завершает доказательство мультиреджевской формы (1) амплитуды в СГЛП.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

1. Сформулирована общая схема доказательства мультиреджевской формы амплитуды с глюонным обменом в СГЛП. Доказательство основывается на так называемых соотношениях бутстрапа, представляющих собой условия совместимости реджевской формы амплитуды с s-канальной унитарностью. Показано, что выполнение этих соотношений гарантирует



мультиреджевскую форму во всех порядках теории возмущений в рамках СГЛП.

2. Продемонстрировано, что для выполнения бесконечного числа соотношений бутстрапа достаточно установить справедливость лишь нескольких условий бутстрапа – нелинейных связей между реджеонными вершинами и траекторией глюона. Проанализировано последнее из недоказанных условий – неупругое условие бутстрапа для рождения одного глюона в МРК.
3. Для различных цветовых представлений в  $t$ -канале в пределе  $D \rightarrow 4$  вычислены глюонные поправки для всех основных компонент неупругого условия бутстрапа: для импакт-фактора и матричного элемента оператора рождения глюона в МРК.
4. В глюонном секторе проведена явная проверка справедливости неупругого условия бутстрапа для всех цветовых представлений в  $t$ -канале.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. V.S. Fadin, R. Fiore, M.G. Kozlov, A.V. Reznichenko. "Proof of the multi-Regge form of QCD amplitudes with gluon exchanges in the NLA". // Phys. Lett. **B**, 639 (2006) 74-81, arXiv: 0602006 [hep-ph].
2. М.Г. Козлов, А.В. Резниченко, В.С. Фадин. "Импакт-фактор для рождения глюона в мультиреджевской кинематике в следующем за борновским приближении". // Препринт ИЯФ 2011-23 (2011) 35 стр.
3. М.Г. Козлов, А.В. Резниченко, В.С. Фадин. "Проверка условия реджезации глюона в следующем за главным порядке. Глюонная часть". // Ядерная физика, **75** (2012) 529-542. // Препринт ИЯФ 2011-24 (2011) 31 стр.
4. М.Г. Козлов, А.В. Резниченко, В.С. Фадин. "Квантовая хромодинамика при высоких энергиях". // Вестник НГУ. Серия: Физика, том **2**, выпуск 4 (2007) 3-31.
5. M.G. Kozlov, A.V. Reznichenko. "QCD amplitudes with the gluon exchange at high energies (and gluon reggeization proof)". // Frascati Physics Series, Vol. **XLVIII** (2009), p.1-6.
6. А.В. Резниченко. "Доказательство гипотезы реджезации глюона в следующем за главным логарифмическом приближении". // Материалы конференции ВНКСФ-12, Новосибирск, НГУ, март 2006, секция "Теоретическая физика", стр. 65-66.

РЕЗНИЧЕНКО Алексей Викторович

**Амплитуды КХД с глюонным обменом  
при высоких энергиях**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 24.04. 2012 г.

Подписано в печать 24.04. 2012 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.6 печ.л., 0.5 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 10

---

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*