

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им Б. П. КОНСТАНТИНОВА**

УДК 539.121.7

На правах рукописи

Ким Виктор Тимофеевич

**ПОМЕРОН В КВАНТОВОЙ ХРОМОДИНАМИКЕ И  
АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЫСОКИХ  
ЭНЕРГИЯХ**

01.04.02 – теоретическая физика

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

Гатчина – 2003

Работа выполнена в Петербургском институте ядерной физики  
им. Б. П. Константинова Российской академии наук.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

А. Б. Кайдалов член-корреспондент РАН

Э. А. Кураев доктор физ.-мат. наук  
профессор

И. Ф. Гинзбург доктор физ.-мат. наук  
профессор

ВЕДУЩАЯ Научно-исследовательский институт  
ОРГАНИЗАЦИЯ: ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
МГУ им. М. В. Ломоносова

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д-002.115.01 в Петербургском  
институте ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН по адресу:  
188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща, ПИЯФ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

И. А. Митропольский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** Квантовая хромодинамика (КХД), обладая такими свойствами, как перенормируемость и асимптотическая свобода, является существенной составной частью Стандартной Модели. КХД хорошо проверена в жестких процессах в пределе Бьеркена:  $-t = Q^2 \sim s \rightarrow \infty$  при фиксированной переменной  $x = Q^2/s = const$  (переменные Мандельштама:  $s$  – квадрат полной энергии соударения и  $-t = Q^2$  – квадрат передачи импульса), т. е., когда величина переданного импульса порядка величины полной энергии соударения. Важнейшие свойства КХД в этом кинематическом режиме: уравнение эволюции Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) и факторизация жестких процессов составляют базис пертурбативной КХД для описания жестких процессов в пределе Бьеркена при высоких энергиях. Теорема факторизации для инклюзивных жестких процессов гарантирует, что в пределе Бьеркена инклюзивное сечение рассеяния представляет собой свертку партонного подпроцесса и партонных функций распределения. Уравнение ГЛАПД определяет эволюцию по  $\log Q^2$  (при  $Q^2 \rightarrow \infty$  и фиксированной переменной  $x = Q^2/s$ ) партонных функций распределения, жестких сечений партонных подпроцессов и бегущей константой связи  $\alpha_S(Q^2)$ .

Другая кинематическая область (Редже-предел КХД:  $\Lambda_{QCD}^2 \ll Q^2 = const, s \rightarrow \infty$ ), которая становится все более и более важной при высоких энергиях, должна описываться уравнением БФКЛ, предложенным Липатовым, Фадиным и Кураевым для теорий с спонтанно нарушенной калибровочной симметрией [1] и обобщенным на случай КХД Липатовым и Балицким [2]. Уравнение БФКЛ в лидирующем приближении, суммируя ведущие вклады во *всех* порядках теории возмущений, определяет эволюцию по  $\log(1/x)$  при  $x = Q^2/s \rightarrow 0$ . При этом наибольшее собственное значение  $\omega^{\max}$  уравнения БФКЛ связано с величиной интерсепта померона  $\alpha_P = 1 + \omega^{\max}$  [1-4], который, в свою очередь, опре-

деляет асимптотику полных сечений рассеяния:  $\sigma \sim (s/s_0)^{\alpha_{IP}-1}$ , где параметр Редже  $s_0$  определяет переход к асимптотическому режиму. Таким образом, подход БФКЛ является важным теоретическим средством для исследования КХД в пределе высоких энергий [3-7].

Однако, величина интерсепта БФКЛ померона в лидирующем приближении оказывается довольно большой:  $\alpha_{IP}-1 = \omega_{LO}^{\max} \cdot 12 \log 2 (\alpha_S/\pi) \simeq 0.55$  для  $\alpha_S = 0.2$  [1-4], что приводит к слишком быстрому росту сечений, который трудно согласовать с опытными данными. К тому же, в подходе БФКЛ в лидирующем приближении за пределом точности остаются такие важные для феноменологии эффекты как сохранение поперечных импульсов и учет  $Q^2$ -эволюции бегущей константы связи  $\alpha_S(Q^2)$ . Данное обстоятельство значительно затрудняет поиск БФКЛ-эффектов при имеющихся энергиях, а также делает неопределенной оценку важности этих эффектов для энергий будущих коллайдеров.

Вычисления в БФКЛ с учетом следующих за лидирующими поправками были завершены в 1998 г. Липатовым и Фадиным [8] и подтверждены в [9], но поправки, полученные в модифицированной схеме минимальных вычитаний ( $\overline{MS}$ -схеме), оказались довольно большими, что указывало на возможную сильную зависимость от схемы и масштаба ультрафиолетовых перенормировок и весьма затрудняло интерпретацию и применение этих результатов.

**Основная цель работы** состоит в развитии теории КХД померона в рамках подхода Липатова, Фадина, Кураева и Балицкого (БФКЛ) с учетом следующих за лидирующими вкладов, и установлении роли БФКЛ померона в сложной структуре взаимодействий при высоких энергиях.

**Научная новизна работы**

Показано, что большая поправка к собственному значению уравне-

ния БФКЛ в следующем за лидирующим приближении, полученная в модифицированной схеме минимальных вычитаний ( $\overline{MS}$ -схеме), не имеет существенной зависимости от выбора схемы ультрафиолетовых перенормировок.

Предложен новый подход к КХД при высоких энергиях, развивающий теорию Липатова, Фаина, Кураева и Балицкого (БФКЛ) с учетом следующих за лидирующими вкладов и открывающий новые возможности ее применения. Подход основан на конформных свойствах БФКЛ-теории и предположении, что неконформные вклады к ядру уравнения БФКЛ-эволюции связаны с бегущей константой связи. В таком подходе сохраняются многие привлекательные свойства БФКЛ-теории в лидирующем приближении при значительном расширении области ее применения.

Показано, что суммирование вкладов, связанных с бегущей константой связи в следующем за лидирующим приближении БФКЛ-теории можно провести с помощью процедуры Бродского-Лепаж-Маккензи (БЛМ), т.е. когда неконформные члены определяют масштаб перенормировки константы связи, а конформные члены определяют эффективный коэффициент ряда теории возмущений. Для применения в БФКЛ-теории процедура БЛМ была обобщена для случая неабелевых физических схем перенормировок.

Показано, что в таком подходе предсказания БФКЛ-теории для БФКЛ померона с учетом следующих за лидирующими вкладов подтверждаются недавними данными L3-коллораации (LEP200, CERN) по полным сечениям сильно виртуальных фотонов при высоких энергиях. Эти данные являются в настоящее время наиболее сильным указанием на проявление асимптотических свойств КХД.

Сформулирован новый инклюзивный подход для описания процессов образования адронных струй в БФКЛ-теории. В рамках этого подхода вычислены инклюзивные сечения для одно- и двухструйных про-

цессов при энергиях Tevatron (Fermilab) и LHC (CERN). Показано, что инклюзивный подход в отличие от подхода, основанного на использовании струй Мюллера-Навелё, может значительно увеличить эффективность изучения БФКЛ-эффектов на коллайдерах. Методы изучения БФКЛ-эффектов, основанные на данном подходе, включены в экспериментальные программы экспериментов на коллайдерах Tevatron (Fermilab) и LHC (CERN).

Показано, что БФКЛ-вклады могут давать наблюдаемые эффекты в виде специфического нарушения скейлинга в отношении скейлинговых сечений образования инклюзивных струй при энергиях Tevatron (Fermilab) и LHC (CERN). Показано, что асимптотическое поведение отношения скейлинговых сечений образования инклюзивных струй при малых  $x$  имеет ярко выраженные особенности в виде провалов, которые могут наблюдаться на будущих коллайдерах и могут служить тестом применимости эволюции Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) в этом кинематическом пределе.

Результатом исследования явилось не только более глубокое понимание важности БФКЛ-теории для описания КХД-процессов при высоких энергиях, но и конкретные расчеты в рамках БФКЛ-подхода для многих действующих и планируемых экспериментов: CDF и D0 (Fermilab), CMS (CERN) и ряда других.

#### **Научная и практическая ценность работы**

- Предложенный подход позволяет использовать для описания КХД-процессов при высоких энергиях недавно вычисленные результаты БФКЛ-теории в следующем за лидирующим приближении, с одной стороны, и, с другой стороны, позволяет использовать методы, развитые для применения БФКЛ-теории в лидирующем приближении, т. к. эффективно сохранена конформная симметрия, нарушенная только бегущей константой связи. Предсказания для интерсепта КХД-померона,

полученные в таком подходе, подтвержденные недавними данными L3-коллораации на коллайдере LEP200 (CERN) и согласующиеся с данными, полученными на коллайдере HERA (DESY), используются при предсказаниях для коллайдеров Tevatron (Fermilab) и LHC (CERN).

- Предложенный инклюзивный подход для описания процессов образования адронных струй в БФКЛ-кинематике должен значительно повысить эффективность изучения БФКЛ-эффектов в этих процессах. Этот подход позволяет вычислять инклюзивные сечения струй в любой точке пространства быстрот, что является весьма важным в условиях эксперимента. Объяснена невысокая эффективность ранее применявшегося на эксперименте метода, основанного на детектировании двух струй наиболее удаленных в пространстве быстрот.

- Вычисления для отношения скейлинговых сечений образования инклюзивных струй показывают, что эти отношения могут служить источником изучения БФКЛ- и ГЛАПД-эффектов в области асимптотически малых  $x$ .

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались соискателем на семинарах ПИЯФ, ЛТФ и ЛВЭ ОИЯИ, МИФИ, Университета Лейпцига, Университета штата Мичиган, Университета Миннесоты, Аргоннской национальной лаборатории, Fermilab, CERN, Института теоретической и прикладной физики Университета штата Айова, Центра теоретической физики Сеульского национального университета, Корейского института высших исследований, на сессиях ОЯФ РАН, а также на многочисленных международных конференциях, в том числе: “Interplay of Soft and Hard QCD Dynamics” (Aspen, USA, 1996), Small- $x$  Physics Workshop (Argonne, USA, 1996), “International Blois Workshop” (Seoul, Korea, 1997), (Протвино, 1999), “Quarks-98” (Суздаль, 1998), “Small- $x$  Physics Workshop” Fermilab (1998), “International Symposium on Multiparticle Dynamics” (Providence, USA, 1999), “Quarks-

2000” (Пушкин, 2000), “International Workshop on Photon Interactions” (Ascona, Switzerland, 2001), ”Workshop on Low-x Physics” (Antwerpen, Belgium, 2002).

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 124 страницы. Диссертация содержит 22 рисунка, 2 таблицы и приложение. Список литературы содержит 132 ссылки.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, кратко описываются наиболее существенные результаты и формулируется основная цель работы.

**В Первой главе** рассмотрено уравнение БФКЛ с учетом следующих за лидирующими вкладов в различных схемах ультрафиолетовых перенормировок.

Собственное значение уравнения БФКЛ с учетом следующих за лидирующими поправок, полученного в модифицированной схеме минимальных вычитаний ( $\overline{MS}$  -схеме) [8, 9], может быть представлено как действие ядра уравнения (усредненного по азимутальным углам при  $t = 0$ ) на собственные функции лидирующего приближения  $(Q_2^2/Q_1^2)^{-1/2+i\nu}$ :

$$\begin{aligned} \omega_{\overline{MS}}(Q_1^2, \nu) &= \int d^2 Q_2 K_{\overline{MS}}(\vec{Q}_1, \vec{Q}_2) \left( \frac{Q_2^2}{Q_1^2} \right)^{-\frac{1}{2}+i\nu} = \\ &= N_C \chi_L(\nu) \frac{\alpha_{\overline{MS}}(Q_1^2)}{\pi} \left[ 1 + r_{\overline{MS}}(\nu) \frac{\alpha_{\overline{MS}}(Q_1^2)}{\pi} \right], \end{aligned}$$

где  $r_{\overline{MS}}(\nu)$  - коэффициент поправки в следующем за лидирующим приближении;  $\chi_L(\nu)$  - функция, связанная с собственным значением уравнения БФКЛ в лидирующем приближении;  $\nu$  - параметр конформного



Таблица 1: Функция перехода к физическим схемам перенормировок и коэффициент  $r(0)$  в следующем за лидирующим приближении

Схема		$T = T^{conf} + T^\beta$	$r(0) = r^{conf}(0) + r^\beta(0)$	$r(0)$ ( $N_F = 4$ )
М	$\xi = 0$	$7.471 - 1.281\beta_0$	$-12.64 - 0.1020N_F - 1.214\beta_0$	-22.76
О	$\xi = 1$	$8.247 - 1.281\beta_0$	$-11.87 - 0.1020N_F - 1.214\beta_0$	-21.99
М	$\xi = 3$	$8.790 - 1.281\beta_0$	$-11.33 - 0.1020N_F - 1.214\beta_0$	-21.44
V		$2 - 0.4167\beta_0$	$-18.12 - 0.1020N_F - 0.3497\beta_0$	-21.44
$\Upsilon$		$6.47 - 0.923\beta_0$	$-13.6 - 0.102N_F - 0.856\beta_0$	-21.7

веса;  $N_C$  - число цветов и  $Q_{1,2}$  - виртуальности реджеизованных глюонов.

Переходы к другим схемам перенормировок результатов, полученных в  $\overline{\text{MS}}$ -схеме, проводились конечной перенормировкой константы связи. Были рассмотрены физические схемы ультрафиолетовых перенормировок, в том числе схема импульсных вычитаний вне массовой поверхности (МOM-схема) для трехглюонной вершины, и схемы перенормировок, основанные на таких физических процессах как трехглюонный распад тяжелого кваркония ( $\Upsilon$ -схема) и взаимодействие тяжелых кварков ( $V$ -схема).

Показано, что большая поправка к собственному значению уравнения БФКЛ в следующем за лидирующим приближении, полученная в модифицированной схеме минимальных вычитаний ( $\overline{\text{MS}}$ -схеме):  $\omega_{NLO} = \omega_{LO} \left(1 + r_{\overline{\text{MS}}}(\alpha_S/\pi)\right)$  (где  $r_{\overline{\text{MS}}} \simeq -20.12 - 0.1020N_F + 0.06692\beta_0 \simeq -19.99$ ,  $N_F$  - число кварковых ароматов,  $\beta_0$  - первый коэффициент  $\beta$ -функции), не имеет существенной зависимости от выбора схемы ультрафиолетовых перенормировок (Таблица 1).

Таблица 2: Интерсепт БФКЛ померона в новом подходе с учетом следующих за лидирующими вкладов в неабелевых физических схемах перенормировок после суммирования членов, связанных с бегущей константой связи, с помощью процедуры БЛМ

Схема		$r_{BLM}(0)$ ( $N_F = 4$ )	$\alpha_{\overline{MS}}^{BLM} - 1 = \omega_{BLM}(Q^2, 0)$		
			$Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$	$Q^2 = 15 \text{ GeV}^2$	$Q^2 = 100 \text{ GeV}^2$
М	$\xi = 0$	-13.05	0.134	0.155	0.157
О	$\xi = 1$	-12.28	0.152	0.167	0.166
М	$\xi = 3$	-11.74	0.165	0.175	0.173
Г		-14.01	0.133	0.146	0.146

**Во Второй главе** предложен новый подход к КХД при высоких энергиях, развивающий теорию Липатова, Фаина, Кураева и Балицкого (БФКЛ) с учетом следующих за лидирующими вкладов. Подход основан на конформных свойствах БФКЛ-теории и предположении, что неконформные вклады к ядру уравнения БФКЛ-эволюции связаны с бегущей константой связи. В таком подходе сохраняются многие привлекательные свойства БФКЛ-теории в лидирующем приближении при значительном расширении области ее применения.

В рамках этого подхода показано, что суммирование вкладов, связанных с бегущей константой связи в следующем за лидирующим приближении БФКЛ-теории можно провести с помощью процедуры Бродского-Лепаж-Маккензи (БЛМ), т. е. когда неконформные ( $\beta$ -зависимые) члены определяют масштаб перенормировки константы связи, а конформные ( $\beta$ -независимые) члены определяют эффективный коэффициент ряда теории возмущений. Для применения в БФКЛ-теории процедура БЛМ была обобщена для случая неабелевых физических схем перенормировок. Класс неабелевых физических схем перенормировок был

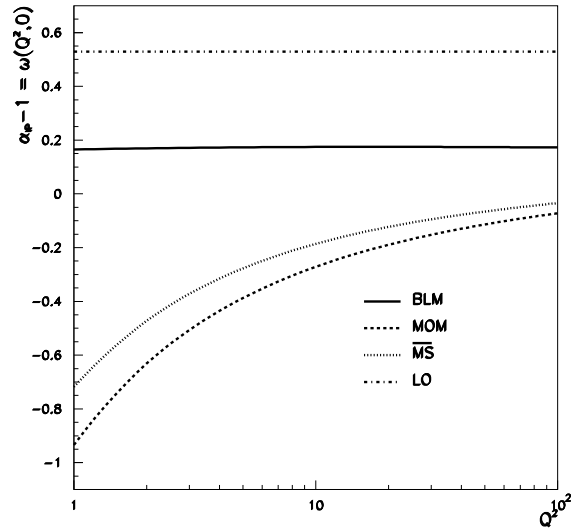


Рис. 1: Интерсепт БФКЛ померона в зависимости от  $Q^2$  в новом подходе в следующем за лидирующим приближении (сплошная линия), а также в модифицированной схеме минимальных вычитаний  $\overline{\text{MS}}$  (штриховая линия), в MOM-схеме (пунктирная линия) и в лидирующем порядке при  $\alpha_S = 0.2$  (штрих-пунктирная линия)

введен для физических схем, которые основаны на процессах, содержащих неабелевые вклады уже в лидирующем порядке, как, например, MOM-схема для трехглюонного самодействия или  $\Upsilon$ -схема, основанная на трехглюонном распаде тяжелого кваркония.

Одна из замечательных особенностей нового подхода состоит в том, что интерсепт БФКЛ померона имеет весьма слабую зависимость от виртуальности реджеизованного глюона (Таблица 2 и Рис. 1), что согласуется с универсальностью интерсепта померона в теории Грибова-Редже. Это свойство позволяет использовать методы, развитые для

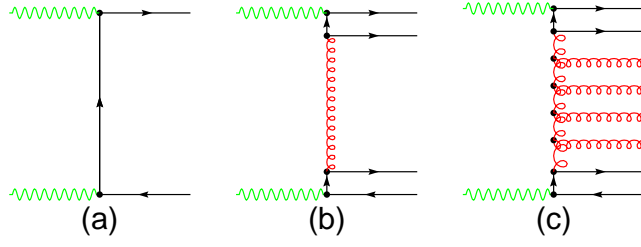


Рис. 2: Фотон-фотонные соударения при высоких энергиях в КХД: (a) ящичная кварковая диаграмма:  $\sigma \sim \alpha^2(\log s)/s$ ; (b) одноглюонный обмен:  $\sigma \sim \alpha^2\alpha_S^2s^0$ ; (c) характерная диаграмма высшего порядка в БФКЛ:  $\sigma \sim \alpha^2\alpha_S^2s^\omega$ , где  $\omega_{LO} = 12 \ln 2 (\alpha_S/\pi) \simeq 0.55$  в лидирующем приближении и  $\omega_{NLO} = 0.13 - 0.18$  в новом подходе с учетом следующих за лидирующими вкладами

применения БФКЛ-теории в лидирующем приближении, т. к. эффективно сохранена конформная симметрия, нарушенная только наличием бегущей константы связи.

В данной главе рассмотрены также другие методы суммирования высших порядков в КХД для устранения зависимости от схемы перенормировки, применявшиеся, в частности, для структурных функций глубоконеупругого рассеяния [10].

**В Третьей главе** рассматриваются фотон-фотонные соударения при высоких энергиях в КХД. БФКЛ-теория предсказывает, что с ростом энергии соударения асимптотические вклады высших порядков должны стать доминирующими (Рис. 2).

Соударения фотонов с большой виртуальностью при высоких энергиях являются прекрасным тестом для БФКЛ-теории, так как большая виртуальность фотонов обеспечивает применимость пертурбативной теории, с одной стороны, а с другой, дает возможность надеяться на

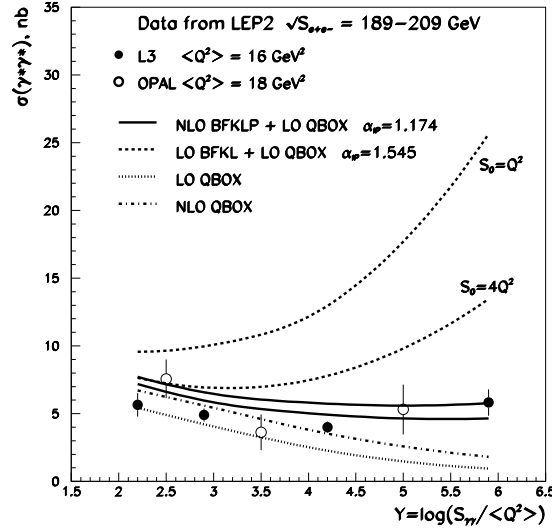


Рис. 3: Предсказания для полного сечения сильновиртуальных фотонов в зависимости энергии соударения в новом подходе (сплошные линии) в сравнении с недавними данными коллабораций OPAL [11] и L3 [12] (LEP200, CERN). Пунктирные линии соответствуют предсказаниям БФКЛ-теории с учетом только лидирующих вкладов. Предсказания сделаны при двух значениях параметра Редже:  $s_0 = Q^2$  для верхних и  $s_0 = 4Q^2$  для нижних кривых. Предсказания для ящичного кваркового вклада обозначены пунктирной (лидирующий порядок) и штрихпунктирной (с учетом следующего за лидирующим порядка) линиями

малость унитарных поправок, которые в случае соударений с участием адронов могут быть довольно значительными [4, 13, 14].

Для предсказания нового подхода в следующем за лидирующим приближении предполагалось, что основная зависимость от энергии соударения содержится в БФКЛ-подпроцессе и, таким образом, высши-

ми поправками к фотонным импакт-факторам можно пренебречь. Из Рис. 3 видно, что БФКЛ-предсказания нового подхода имеют значительно меньшую неопределенность, чем вычисления в лидирующем приближении.

Предсказания нового подхода к БФКЛ-теории с учетом следующих за лидирующими вкладов подтверждаются недавними данными L3-коллораборации на коллайдере LEP200 (CERN) по полным сечениям сильно-виртуальных фотонов при высоких энергиях (Рис. 3). Данные L3-коллораборации при максимально достигнутой энергии отличаются от предсказаний без учета БФКЛ-теории более чем на 4 стандартных отклонения. Эти данные являются в настоящее время наиболее сильным указанием на проявление асимптотических свойств КХД.

**В Четвертой главе** сформулирован новый инклюзивный подход для описания процессов образования адронных струй в БФКЛ-теории.

Как известно, в жестком режиме КХД (предел Бьеркена) имеется сильное упорядочение по поперечным импульсам струй  $k_{\perp}$ :  $k_{1,\perp} > k_{2,\perp} > \dots > k_{i,\perp} > k_{i+1,\perp} > \dots > k_{n,\perp}$  с быстротами одного порядка:  $y_1 \sim y_2 \sim \dots \sim y_n \sim y_{i+1} \sim \dots \sim y_n$ . В то время как в пределе Редже имеется сильное упорядочение по быстротам:  $y_1 > y_2 > \dots > y_n > y_{i+1} > \dots > y_n$  с поперечными импульсами одного порядка:  $k_{1,\perp} \sim k_{2,\perp} \sim \dots \sim k_{i,\perp} \sim k_{i+1,\perp} \sim \dots \sim k_{n,\perp}$ , причем, вклады БФКЛ экспоненциально растут с увеличением интервала по быстротам:  $\sim \exp((y_i - y_k)(\alpha_P - 1))$ . Поэтому, на опыте при поисках БФКЛ-эффектов изучают сечения образования двух струй наиболее удаленных в пространстве быстрот (струи Мюллера-Навелё). Однако, в экспериментах на коллайдерах Tevatron (Fermilab) и HERA (DESY) кинематические области с наибольшими быстротами расположены за пределами акцептанса детекторов, и, таким образом, данные оказываются не очень чувствительными к БФКЛ-вкладам.

Развиваемый подход дает возможность описывать инклюзивное рож-

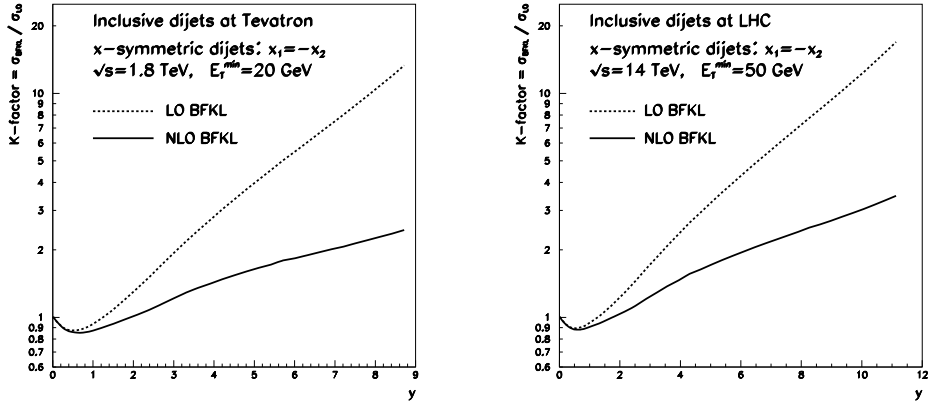


Рис. 4: К-фактор сечения инклюзивного образования двух струй как функция интервала быстроты между струями при энергиях коллайдеров Tevatron (Fermilab) и LHC (CERN). Сплошные (пунктирные) линии соответствуют предсказаниям БФКЛ-теории с учетом следующих за лидирующими (только лидирующих) вкладов

дение струй с произвольными быстротами в БФКЛ-теории. Это достигается при помощи свертки функций Грина уравнения БФКЛ, включающей интегрирования по промежуточным кинематическим переменным.

В рамках этого подхода вычислены инклюзивные сечения для одно- и двухструйных процессов при энергиях Tevatron (Fermilab) и LHC (CERN). Инклюзивные сечения для двухструйных процессов представлены в виде так называемых К-факторов (Рис. 4).

Показано, что инклюзивный подход в отличие от подхода, основанного на использовании струй Мюллера-Навелё, которые от 30 до 50% случаев при энергиях Tevatron (Fermilab) не попадают в детектор, может значительно увеличить эффективность изучения БФКЛ-эффектов

на коллайдерах.

**В Пятой главе** рассмотрено отношение скейлинговых сечений инклюзивного образования струй в адрон-адронных соударениях.

Отношение скейлинговых сечений является удобным способом изучения нарушения скейлинга в адрон-адронных соударениях. Согласно факторизации жестких процессов скейлинговое инклюзивное сечение образования струи имеет вид

$$\rho(x = x_{\perp}, y = 0, s) = E_{\perp}^4 \frac{E d\sigma}{d^3p}(x_{\perp}, y = 0, s) = \int_{x_{A,\min}}^1 \int_{x_{B,\min}}^1 dx_A dx_B F_A(x_A, Q^2) \cdot F_B(x_B, Q^2) E_{\perp}^4 \frac{\hat{s}}{\pi} \frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}} \cdot \delta(\hat{s} + \hat{t} + \hat{u}),$$

где  $\hat{s}$ ,  $\hat{t}$  и  $\hat{u}$  - переменные Манделъстама для партонного подпроцесса;  $-\hat{t} = Q^2 \sim E_{\perp}^2 \sim x_{\perp}^2 s$  - шкала жесткого партонного подпроцесса;  $y$  - быстрота; при  $y = 0$   $x = 2E/\sqrt{s}$  переходит в  $x_{\perp} = 2E_{\perp}/\sqrt{s}$ ;  $F_A$  и  $F_B$  - партонные функции распределения, удовлетворяющие эволюции ГЛАПД; а скейлинговое сечение подпроцесса дается следующей формулой:

$$E_{\perp}^4 \frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}} \sim \alpha_S^2(Q^2)[1 + C_{NLO}\alpha_S(Q^2) + \dots] = \alpha_S^2(x_{\perp}^2 s^2)[1 + C_{NLO}\alpha_S(x_{\perp}^2 s^2) + \dots].$$

Таким образом, отношение скейлинговых сечений, взятых при двух различных  $s$  и фиксированных  $x$  и  $y$ :  $\rho(x, y, s_1)/\rho(x, y, s_2)$ , является безразмерной функцией  $\alpha_S$ . При пренебрежении эффектами нарушения скейлинга это отношение равно *единице*. Учет эффектов эволюции ГЛАПД при умеренных и больших  $x$  делает отношение большим единицы (при  $s_1 < s_2$ ). Дополнительный учет БФКЛ-вкладов несколько понижает значение этого отношения.

Поведение отношения при малых  $x$  требует специального рассмотрения. Показано, что асимптотическое поведение отношения скейлинговых сечений образования инклюзивных струй при малых  $x$  имеет ярко



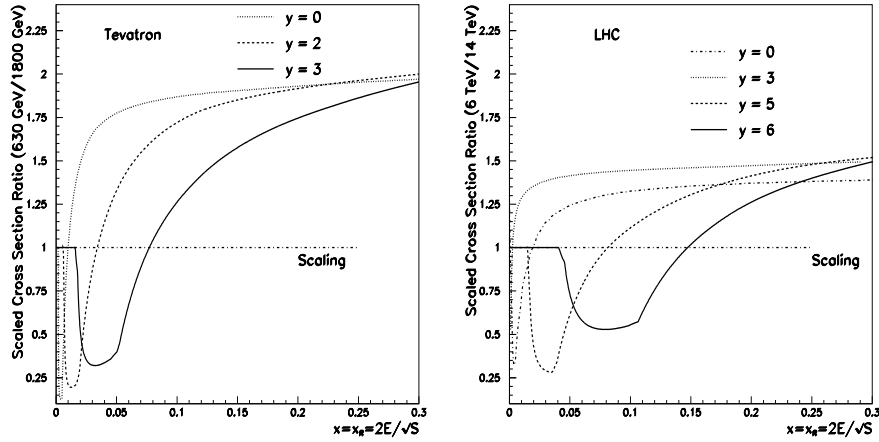


Рис. 5: Отношение скейлинговых сечений инклюзивного образования струй в ГЛАПД-режиме: (а) для энергий Tevatron (Fermilab); (b) для энергий LHC (CERN)

выраженные особенности в виде провалов, которые могут наблюдаться на коллайдерах и могут служить тестом применимости эволюции Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) в этом кинематическом пределе (Рис. 5).

Таким образом показано, что эффекты БФКЛ- и ГЛАПД- эволюции должны проявляться в виде специфического нарушения скейлинга в отношении скейлинговых сечений образования инклюзивных струй при энергиях Tevatron (Fermilab) и LHC (CERN).

**В Приложении** представлен список сокращений, используемых в диссертации.

**В Заключение** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Показано, что большая поправка к собственному значению уравнения БФКЛ в следующем за лидирующим приближении, полученная в модифицированной схеме минимальных вычитаний ( $\overline{MS}$ -схеме), не имеет существенной зависимости от выбора схемы ультрафиолетовых перенормировок.
2. Предложен новый подход к КХД при высоких энергиях в рамках теории Липатова, Фадына, Кураева и Балицкого (БФКЛ) с учетом следующих за лидирующими вкладов и открывающий новые возможности ее применения. Подход основан на конформных свойствах БФКЛ-теории и предположении, что неконформные вклады к ядру уравнения БФКЛ-эволюции связаны с бегущей константой связи. В таком подходе сохраняются многие привлекательные свойства теории БФКЛ в лидирующем приближении при значительном расширении области ее применения.
3. Показано, что суммирование вкладов, связанных с бегущей константой связи в следующем за лидирующим приближении БФКЛ-теории можно провести с помощью процедуры Бродского-Лепаж-Маккензи (БЛМ), т.е. когда неконформные члены определяют масштаб ультрафиолетовой перенормировки константы связи, а конформные члены определяют эффективный коэффициент ряда теории возмущений. Для применения в БФКЛ-теории процедура БЛМ была обобщена для случая неабелевых физических схем перенормировок.
4. Показано, что в таком подходе предсказания БФКЛ-теории с учетом следующих за лидирующими вкладов подтверждаются недавними данными L3-коллаборации на коллайдере LEP200 (CERN)

по полным сечениям сильновиртуальных фотонов при высоких энергиях. Эти данные являются в настоящее время наиболее сильным указанием на проявление асимптотических свойств КХД.

5. Сформулирован инклюзивный подход для описания процессов образования адронных струй в БФКЛ-теории. В рамках этого подхода вычислены инклюзивные сечения для одно- и двухструйных процессов при энергиях Tevatron (Fermilab) и ЛHC (CERN). Показано, что инклюзивный подход в отличие от подхода, основанного на использовании струй Мюллера-Навелё, должен значительно увеличить эффективность изучения БФКЛ-эффектов на коллайдерах.
6. Показано, что БФКЛ-вклады должны давать наблюдаемые эффекты в виде специфического нарушения скейлинга в отношении скейлинговых сечений образования инклюзивных струй уже при энергиях Tevatron (Fermilab).
7. Показано, что асимптотическое поведение отношения скейлинговых сечений образования инклюзивных струй при малых  $x$  имеет ярко выраженные особенности в виде провалов, которые могут наблюдаться на коллайдерах и могут служить тестом применимости эволюции Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) в этом кинематическом пределе.

Все перечисленные выше результаты получены либо самим соискателем, либо при его определяющем участии.

**Основные результаты диссертации опубликованы в  
следующих работах:**

1. S.J. Brodsky, V.S. Fadin, V.T. Kim, L.N. Lipatov and G.B. Pivovarov, *The QCD Pomeron with Optimal Renormalization*, Письма ЖЭТФ **70** (1999) 161-166, e-print archive: hep-ph/9901229.
2. V.T. Kim, L.N. Lipatov and G.B. Pivovarov, *The Next-to-Leading BFKL Pomeron with Optimal Renormalization*, Proc. 8th Blois Workshop (EDS99), Protvino, Russia, 1999, pp. 237-241, e-print archive: hep-ph/9911228.
3. V.T. Kim, L.N. Lipatov and G.B. Pivovarov, *The Next-to-Leading Dynamics of the BFKL Pomeron*, Proc. 29th Int. Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD99), Providence, USA, 1999, eds: I. Sarcevic and C.I.Tan (World Scientific, Singapore, 2000), pp. 79-85, e-print archive: hep-ph/9911242.
4. S.J. Brodsky, V.S. Fadin, V.T. Kim, L.N. Lipatov and G.B. Pivovarov, *High-energy QCD asymptotics of photon-photon collisions*, Письма ЖЭТФ **76** (2002) 306-309, e-print archive: hep-ph/0207297.
5. S.J. Brodsky, V.S. Fadin, V.T. Kim, L.N. Lipatov and G.B. Pivovarov, *High-energy asymptotics of photon-photon collisions in QCD* Proc. 14th Int. Conference on the Structure and Interactions of the Photon (Photon 2001), Ascona, Switzerland, Sept. 2-7 2001, eds: M.N. Kienzle-Focacci and M. Wadhwa (World Scientific, Singapore, 2002) pp. 178-181, e-print archive: hep-ph/0111390.
6. V.S. Fadin, V.T. Kim, L.N. Lipatov and G.B. Pivovarov, *The BFKL Pomeron within Physical Renormalization Schemes and Scales*, Материалы 35-й Зимней школы ПИЯФ, Репино, С.-Петербург, 19-25 февраля, 2001, ред: В.А. Гордеев и др. (ПИЯФ, С.-Петербург, 2001) сс. 259-278, e-print archive: hep-ph/0207296.

7. V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *Balitsky-Fadin-Kuraev-Lipatov QCD Pomeron in High-Energy Hadron Collisions: Inclusive Dijet Production*, Phys. Rev. **D53** (1996) 6-10, Rapid Communication, e-print archive: hep-ph/9506381.
8. V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *BFKL QCD Pomeron in High-Energy Hadron Collisions and Inclusive Dijet Production*, in: *Particle Theory and Phenomenology*, eds. K. Lassila *et al.* (World Scientific, Singapore, 1995) pp. 366-371 , e-print archive: hep-ph/9510247.
9. V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *BFKL Pomeron for Inclusive Single Jet Production at High-Energy Hadron Collisions*, Proc. the 9th Inter. Seminar: QUARKS'96, Yaroslavl, Russia, 5-11 May, 1996, eds. V.A. Matveev *et al.*, (INR, Moscow, 1997) vol. 2, pp. 112-121.
10. V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *Multi-Regge Asymptotics for Jet Production at the Tevatron*, Proc. the 3rd Workshop on Small-x and Diffractive Physics, Argonne, USA, September 26-29, 1996 (Argonne, 1996) pp. 89-98.
11. V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *Jet Production in Regge-limit of QCD*, in: *Recent Advances in Hadron Physics*, Seoul, Korea, June 10-14, 1997, eds: K. Kang *et al.* (World Scientific, Singapore, 1998) pp. 236-239, e-print archive: hep-ph/9709433.
12. V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *A Balitsky-Fadin-Kuraev-Lipatov Pomeron Manifestation in Inclusive Single Jet Production at High-Energy Hadron Collisions*, Phys. Rev. **D57** (1998) 1341-1344, Rapid Communication, e-print archive: hep-ph/9709433.
13. V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *BFKL Dynamics and Jet Production*, Proc. the Theory Institute on Deep-Inelastic Diffraction, Argonne, USA, September 14-16, 1998 (Argonne, 1998) pp. 173-182.

14. V.T. Kim, G.B. Pivovarov and J.P. Vary, *A New Qualitative Prediction of the Parton model for High-Energy Hadron Collisions*, Foundations of Physics **30** (2000) 519-527, e-print archive: hep-ph/97-09303.
15. V.T. Kim, G.B. Pivovarov and J.P. Vary, *Parton Scattering at Small- $x$  and Scaling Violation*, Proc. of the Xth Quantum Field Theory and High Energy Physics Workshop, Moscow, Russia, May 27 - June 2, 1999, eds: V.I. Savrin and B.B. Levchenko (Moscow State University, Moscow, 2000) pp. 32-40, preprint CERN-TH/2000-148, Geneva, 2000, 12 p., e-print archive: hep-ph/0005279.
16. V.T. Kim, L.N. Lipatov and G.B. Pivovarov, *BFKL-Effects at Collider Energies*, Материалы 36-й Зимней школы ПИЯФ, Репино, С.-Петербург, 25 февраля - 2 марта, 2002, ред: В.А. Гордеев и др. (ПИЯФ, С.-Петербург, 2002) сс. 44-67.

## Список литературы

- [1] V.S. Fadin, E.A. Kuraev and L.N. Lipatov, *On the Pomeron singularity in asymptotically free theories*, Phys. Lett. **B60** (1975) 50-52; Э.А. Кураев, Л.Н. Липатов, В.С. Фадин, *Мульти-реджевские процессы в теории Янга-Миллса*, ЖЭТФ **71** (1976) 840-855; *Особенность Померанчука в неабелевых калибровочных теориях*, ЖЭТФ **72** (1977) 377-389.
- [2] Я.Я. Балицкий, Л.Н. Липатов, *О Померанчуковской особенности в квантовой хромодинамике*, Ядер. Физ. **28** (1978) 1597-1611.
- [3] L.N. Lipatov, *Small- $x$  Physics in Perturbative QCD*, Phys. Rep. **C286** (1997) 131-198.

- [4] L.V. Gribov, E.M. Levin and M.G. Ryskin, *Semihard Processes in QCD*,  
Phys. Rep. **C100** (1983) 1-150.
- [5] L.N. Lipatov, *Gauge-Invariant Effective Action for High-Energy Processes in QCD*,  
Nucl. Phys. **B452** (1995) 369-400.
- [6] V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *Effective Regge QCD*,  
Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 809-812.
- [7] V.T. Kim and G.B. Pivovarov, *New Effective Feynman-Like Rules for the Multi-Regge QCD Asymptotics and Inclusive Multijet Production*,  
Phys. Rev. **D54** (1996) 725-729, Rapid Communication.
- [8] V.S. Fadin and L.N. Lipatov, *BFKL Pomeron in the Next-to-Leading Approximation*,  
Phys. Lett. **B429** (1998) 127-134.
- [9] G. Camici and M. Ciafaloni, *Energy Scale(s) and Next-to-Leading BFKL Equation*,  
Phys. Lett. **B430** (1998) 349-354.
- [10] V.T. Kim and A.V. Kotikov, *Renormalization Scheme-Invariant QCD Analysis for Non-Singlet Structure Functions*, preprint US-FT-15-90, Santiago de Compostela (1990), 15 p.
- [11] OPAL Collaboration, G. Abbiendi *et al.*, Measurement of the Hadronic Cross Section for the Scattering of Two Virtual Photons at LEP,  
Eur. Phys. J. **C24** (2002) 17-31.
- [12] L3 Collaboration, *Double Tag Events in Two Photon Collisions at LEP*, P. Achard *et al.*,  
Phys. Lett. **B531** (2002) 39-51.

- [13] В.Т. Ким, М.Г. Рыскин, *Структурные функции нелинейного уравнения ГЛР в области малых  $x$* ,  
Ядер. Физ. **55** (1992) 1107-1115.
- [14] А.Б. Кайдалов, Л.А. Пономарев, К.А. Тер-Мартirosян, *Полные сечения и дифракционное рассеяние в теории взаимодействующих померонов с  $\alpha(0) > 1$* ,  
Ядер. Физ. **44** (1986) 722-728.