

На правах рукописи

Грабовский Андрей Владимирович

**МЕБИУСОВСКАЯ ФОРМА ЯДРА
БФКЛ**

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

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

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ЛИПАТОВ Лев Николаевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Учреждение Российской академии наук 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: – Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская область.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2010 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02 Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 г.

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

В. С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Описание полужестких процессов является одним из наиболее важных и востребованных направлений в физике сильных взаимодействий. Полужесткие процессы активно исследовались на детекторе HERA (Германия) и, несомненно, будут важны в экспериментах на ускорителе LHC (Швейцария). Одним из наиболее плодотворных методов теоретического описания полужестких процессов является метод БФКЛ (Балицкого-Фадина-Кураева-Липатова), онованный на реджезации глюона. В рамках этого метода в импульсном представлении строится функция Грина, которая определяет высокоэнергетическое поведение амплитуд и сечений полужестких процессов. Она удовлетворяет линейному интегродифференциальному уравнению БФКЛ. Ядро этого уравнения известно в главном логарифмическом приближении (ГЛП) и следующем за главным логарифмическим приближении (СГЛП). Одной из основных проблем, затрудняющих использование метода БФКЛ для описания эксперимента, является очень сложная форма ядра в СГЛП, особенно для рассеяния на произвольный угол. Поэтому очень важным является построение компактной и удобной для приложений формы ядра в физическом пространстве-времени размерности 4, в которой сокращены все инфракрасные и устранены перенормировкой все ультрафиолетовые расходимости.

При построении решений уравнения БФКЛ в главном логарифмическом приближении (ГЛП) использовалась конформная инвариантность ядра БФКЛ в ГЛП. В СГЛП конформная инвариантность, очевидно, нарушается ненулевой бета-функцией КХД. Поэтому первым шагом к построению общего решения уравнения БФКЛ в СГЛП являются построение конформно инвариантного ядра в суперсимметричной теории с $N=4$ и преобразование ядра КХД к квазиконформному виду, то есть к виду, в котором все конформно неинвариантные члены пропорциональны бета-функции.

Альтернативным методом описания полужестких процессов является дипольная картина рассеяния. Уравнение, которому подчиняется функция Грина в рамках этого подхода, называется уравнением Балицкого-Ковчегова (БК). Это нелинейное уравнение, которое справедливо не только при малых партонных плотностях – в линейном режиме, но и в режиме насыщения – при больших партонных плотностях. Оно получено в координатном представлении и применимо для рассеяния бесцветных частиц. Сейчас его ядро также вычислено в СГЛП. В рамках ГЛП уравнение БК эквивалентно уравнению БФКЛ с учетом трехпомеронной вершины. Известно, что в случае рассеяния бесцветных частиц в пределе большого количества цветов уравнение БК суммирует все верные Померонные диаграммы. Чтобы

сравнивать предсказания обоих подходов в СГЛП, необходимо в первую очередь понять, как связаны ядра уравнений эволюции в общей области применимости – для рассеяния бесцветных частиц в линейном режиме.

Целью работы являлось нахождение Мебиусовской формы ядра БФКЛ в СГЛП, приведение ее к квазиконформному виду и доказательство эквивалентности ядер БФКЛ и БК в СГЛП. Мебиусовским называется ядро в координатном представлении, упрощенное для рассеяния бесцветных частиц. Для решения этих задач было необходимо привести ядро БФКЛ в СГЛП в импульсном представлении к виду, в котором сокращены все инфракрасные и устранены перенормировкой все ультрафиолетовые расходимости.

Вклад автора. Изложенные в работе результаты получены автором лично или при его определяющем вкладе.

Научная новизна работы. В работе получена наиболее простая на сегодня Мебиусовская форма ядра БФКЛ в СГЛП в координатном представлении. Она является квазиконформной в случае КХД и конформно инвариантной для SUSY $N=4$. Используя свободу в определении ядра БФКЛ, построена форма ядра, эквивалентная ядру уравнения БК в СГЛП. Таким образом, доказана эквивалентность подходов БФКЛ и БК в СГЛП. В импульсном представлении ядро БФКЛ в СГЛП получено в физическом пространстве-времени размерности 4. Для этого оно было записано через перенормированный заряд и в нем было проведено сокращение всех инфракрасных расходимостей.

Научная и практическая ценность работы. Полученная форма ядра БФКЛ не содержит расходимостей и намного проще известных на сегодняшний день форм. Она позволяет существенно упростить применение подхода БФКЛ для анализа экспериментальных данных. Во многих случаях, где ранее подход БФКЛ не применялся к описанию эксперимента из-за вычислительных трудностей, полученная форма ядра впервые позволит количественно описать данные. Полученная форма ядра универсальна и может применяться для описания любых полужестких процессов. Она позволит упростить описание данных детектора HERA и, несомненно, будет востребована на LHC. Квазиконформная форма ядра БФКЛ в СГЛП в КХД также является первым этапом для построения общего решения уравнения БФКЛ в СГЛП.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Квазиконформная Мебиусовская форма ядра БФКЛ в КХД и ее суперсимметричных обобщениях в координатном представлении для рассеяния на произвольный угол в СГЛП.

2. Форма ядра БФКЛ в СГЛП в импульсном представлении в физическом пространстве размерности 4, в которой сокращены все инфракрасные и устранены перенормировкой все ультрафиолетовые расходимости для рассеяния на произвольный угол в глюодинамике и для рассеяния вперед в КХД и суперсимметричных теориях.
3. Доказательство эквивалентности подхода БФКЛ и подхода цветowych диполей в СГЛП в линейном приближении для рассеяния бесцветных частиц.

Апробация диссертации. Материалы диссертации докладывались на Сессии отделения ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» в 2007 и 2009 гг. (Москва), на Международной конференции «Low x workshop» в 2010 г. (Кавала, Греция), на Семинаре теоретического отдела Института Ядерной Физики им. Г. И. Будкера.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, пяти приложений, изложена на 104 страницах и содержит 73 наименования библиографии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан обзор подхода БФКЛ, кратко описано сравнение предсказаний этого подхода с экспериментальными данными, приведены этапы построения ядра БФКЛ в СГЛП. Также обсуждается подход БК и сравнение ядер и решений уравнений БФКЛ и БК. Сформулированы основные цели и обозначены основные этапы работы.

Первая глава посвящена получению глюонного вклада в Мебиусовское ядро БФКЛ в СГЛП в координатном представлении. В ней приводится общий рецепт построения Мебиусовской формы ядра, то есть координатного представления ядра, упрощенного для рассеяния бесцветных частиц. Упрощения возможны, потому что импакт факторы бесцветных объектов обладают свойством калибровочной инвариантности: если их свернуть с функцией, зависящей только от координаты одного из входящих реджеонов, то свертка будет равна 0. В импульсном представлении это означает, что импакт фактор бесцветной частицы переходит в 0 при свертке с дельта-функцией от импульса одного из входящих реджеонов, то есть очень мягкий глюон не взаимодействует с бесцветным объектом. Ядро сохраняет это свойство, так как его реальная часть равна нулю при равном нулю импульсе входящего реджеона. Этих свойств достаточно, чтобы привести ядро к Мебиусовской форме, то есть заставить его зануляться при равенстве координат входящих реджеонов. При этом вклад в амплитуды физических процессов не изменится.

Далее приводится удобное для проведения преобразования Фурье разбиение глюонного вклада в ядро, ядро записывается через

перенормированный заряд и проводится сокращение инфракрасных расходимостей между реальной и виртуальной частями глюонного вклада в ядро. Для этого вводится параметр λ , который стремится к 0 после вычисления предела $\varepsilon \rightarrow 0$ и область интегрирования разбивается на λ -окрестности особых точек траектории и реальной части ядра и остальное пространство, в котором можно перейти к пределу $\varepsilon \rightarrow 0$. При действии ядра сингулярные вклады траектории и реальной части, проинтегрированные по λ -окрестностям особых точек практически полностью сокращают друг друга. После сокращения сингулярностей можно перейти к пределу $\varepsilon \rightarrow 0$ и затем $\lambda \rightarrow 0$. В результате окрестности особых точек дают конечный вклад, который нужно добавить к несингулярному вкладу остального пространства. Полученная после сокращения форма ядра записывается в физическом пространстве-времени размерности 4.

Потом вычисляется преобразование Фурье от этой формы ядра. На следующем этапе ядро в координатном представлении приводится к Мебиусовскому виду, то есть к нему добавляются члены, зависящие от координат только одного из входящих реджеонов таким образом, чтобы ядро стало равным 0, когда координаты входящих реджеонов совпадают. Далее выписывается окончательное выражение для Мебиусовской формы глюонного вклада в ядро БФКЛ в СГЛП.

Во второй главе анализируется свобода в определении ядра БФКЛ. В ней описаны такие преобразования ядра БФКЛ и импакт факторов, которые не меняют скачков амплитуды. Эти преобразования связаны с перераспределением радиационных поправок между ядром и импакт факторами с помощью несингулярных операторов. Показано, что в СГЛП можно переходить к эквивалентному ядру, отличающемуся от исходного на коммутатор борновского ядра и произвольного несингулярного оператора $\sim \alpha_s$. Другой возможной причиной свободы в определении ядра является неоднозначность в определении энергетического масштаба в Редже-факторах. Было показано, что изменение энергетического масштаба может быть скомпенсировано изменением ядра и одного из импакт факторов. При этом изменение ядра описывается с помощью преобразования общего вида с конкретным несингулярным оператором. Таким образом, продемонстрировано, что изменение энергетического масштаба не дает дополнительной свободы в определении ядра.

Далее приводится ядро БК в СГЛП и ядра БФКЛ и БК сравниваются для случая рассеяния вперед. Для этого вычисляется Мебиусовское ядро БФКЛ для рассеяния вперед. В этом случае разность ядер состоит из трех слагаемых. Непосредственным вычислением демонстрируется, что одно из них можно устранить, используя свободу в определении ядра, и строится соответствующий оператор. Второе слагаемое в разности ядер для рассеяния вперед устранить изменением схемы перенормировки. Третье слагаемое связано с ошибкой при вычислении ядра БК, которая была

исправлена в последующих статьях Балицкого и Кириллы. Следовательно, в результате данной работы показано, что ядра БФКЛ и БК эквивалентны для случая рассеяния вперед.

Для проверки правильности расчетов вычисляются собственные значения Мебиусовского ядра БФКЛ для рассеяния вперед и сравниваются с известными собственными значениями, которые были вычислены с помощью ядра в импульсном представлении. Так как собственные функции Борновского ядра являются собственными функциями ядра в СГЛП при нулевой бета-функции, то собственные значения Мебиусовского ядра БФКЛ в СГЛП и ядра БФКЛ в СГЛП в импульсном представлении должны совпадать с точностью до членов, пропорциональных бета-функции. Такое совпадение проверено вычислениями. Связь членов, пропорциональных бета-функции в Мебиусовском ядре и в ядре в импульсном представлении, также была прослежена и таким образом проверена правильность вычисления этих членов.

Далее с помощью известных кваркового и скалярного вкладов и полученного глюонного вклада было построено Мебиусовское ядро БФКЛ в СГЛП в координатном представлении для рассеяния вперед в суперсимметричных обобщениях КХД. Ядро БФКЛ в СГЛП в импульсном представлении для рассеяния вперед в SUSY $N=4$ было известно в литературе. Однако оно записано в пространстве размерности $4+2\epsilon$ для регуляризации инфракрасных расходимостей. В данной работе проведено сокращение инфракрасных расходимостей и ядро для рассеяния вперед представлено в физическом пространстве размерности 4 для суперсимметричных теорий с произвольным N . Сокращение инфракрасных расходимостей проводилось также, как и для глюонного вклада в главе 1. Было продемонстрировано, что для суперсимметричной теории с $N=4$ ядра БФКЛ в СГЛП для рассеяния вперед в импульсном и Мебиусовском координатном представлении функционально совпадают.

Третья глава посвящена доказательству эквивалентности Мебиусовского ядра БФКЛ в координатном представлении и линеаризованного ядра БК и приведению Мебиусовского ядра БФКЛ к квазиконформному виду. В ней рассматривается общий метод нахождения оператора, преобразующего ядро БФКЛ к ядру БК, в случае, если такой оператор существует. Этот метод основан на переходе в пространство собственных функций и связан с большими вычислительными трудностями. Поэтому оператор был найден другим методом, с помощью анализа различных вкладов ядро.

Было замечено, что вычитательный вклад в ядро, связанный с разделением вкладов мультiredжевской и квази-мультiredжевской кинематик, можно представить в виде коммутатора реальной части Борновского ядра БФКЛ и определенного оператора. Однако коммутатор этого оператора с полным Борновским ядром расходится. Поэтому данный

оператор был достроен таким образом, чтобы сократить возникающие расходимости. Оказалось, что построенное таким образом преобразование приводит ядро БФКЛ к ядру БК. В результате эквивалентность подходов БФКЛ и БК для описания рассеяния бесцветных частиц на произвольный угол в СГЛП в линейном режиме является доказанной.

Далее ядра БФКЛ в КХД и ее суперсимметричных обобщениях были приведены к квазиконформному виду с помощью преобразования, известного для ядер уравнения БК, и найден вид этого преобразования в импульсном представлении.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Получена квазиконформная Мебиусовская форма ядра БФКЛ в координатном представлении для рассеяния на произвольный угол в СГЛП в КХД и ее суперсимметричных обобщениях. Полученная форма ядра БФКЛ в КХД намного проще и компактнее известных ранее форм, что дает надежду на ее большое практическое применение.
2. Для рассеяния на произвольный угол в глюодинамике и для рассеяния вперед в КХД и суперсимметричных теориях построена форма ядра БФКЛ в СГЛП в импульсном представлении в физическом пространстве размерности 4, в которой сокращены все инфракрасные и устранены перенормировкой все ультрафиолетовые расходимости.
3. Доказано, что подход БФКЛ эквивалентен подходу цветных диполей в СГЛП в линейном приближении для рассеяния бесцветных частиц.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. V.S. Fadin, R. Fiore, A.V. Grabovsky, A. Papa. “The Dipole form of the gluon part of the BFKL kernel”, Nucl. Phys. B 784: 49-71, 2007, arXiv:0705.1885 [hep-ph].
2. V.S. Fadin, R. Fiore, A.V. Grabovsky. “On the discrepancy of the low-x evolution kernels”, Nucl. Phys. B820: 334-363, 2009, arXiv:0904.0702 [hep-ph], препринт ИЯФ 2008-40, Новосибирск, ИЯФ, 2008 г.
3. V.S. Fadin, R. Fiore, A.V. Grabovsky. “Matching of the low-x evolution kernels”, Nucl. Phys. B 831: 248-261, 2010, arXiv:0911.5617 [hep-ph], препринт ИЯФ 2009-36, Новосибирск, ИЯФ, 2009 г.

4. V.S. Fadin, R. Fiore, A.V. Grabovsky, A. Papa. “Low-x evolution equation in Mobius representation”, *Physics of Particles and Nuclei* 2010, Vol. 41, №6, pp. 935-938.
5. Victor S. Fadin , A.V. Grabovsky. “Ambiguities of the NLO BFKL Kernel”, *Proc. of XVII Int. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Topics*, Madrid, Spain, April 2009, doi: 10.3360/dis.2009.19

ГРАБОВСКИЙ Андрей Владимирович

Мебиусовская форма ядра БФКЛ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 18.11. 2010 г.

Подписано в печать 18.11. 2010 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 35

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11