

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

X-936

2-95-484

На правах рукописи
УДК 539.12.01

ХРИСТОВ
Руско Тодоров
(Р. Русков в научной литературе)

ПЕРЕХОДНЫЕ ФОРМФАКТОРЫ АДРОНОВ
ПРИ УМЕРЕННЫХ И МАЛЫХ ПЕРЕДАЧАХ
ИМПУЛЬСА ИЗ ПРАВИЛ СУММ КВАНТОВОЙ
ХРОМОДИНАМИКИ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1995

Работа выполнена в
Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор А.В.Радюшкин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук С.В.Герасимов
кандидат физико-математических наук В.Л.Елецкий

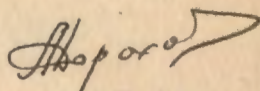
Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт Ядерных Исследований РАН (г. Москва)

Защита диссертации состоится *"17" января* 1996 г. в *15⁰⁰* часов на заседании Специализированного совета К 047.01.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований (141980 г. Дубна, Московской обл.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан *"15" декабря* 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета ЛТФ ОИЯИ
доктор физико-математических наук


А.Е.Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В настоящее время Квантовая Хромодинамика рассматривается в качестве реальной теории описывающей сильные взаимодействия элементарных частиц. Один из наиболее успешных инструментов исследования здесь — жесткие процессы. Благодаря асимптотической свободе, при наличии большого переданного импульса (т.е., на малых расстояниях), эффективная константа связи α_s мала и можно применять теорию возмущений. Любой процесс, однако, зависит как от больших (Q^2) так и от малых (p^2) импульсных инвариантов и в общем случае отделить чисто пертурбативные эффекты от непертурбативных — крайне нетривиальная задача.

Строгий подход к жестким процессам в КХД основан на методе факторизации вкладов больших и малых расстояний, позволяющий утверждать, что для определенного класса процессов, для ведущей степенной (по $1/Q^2$) асимптотики соответствующей амплитуды, вклады малых и больших расстояний факторизуются в отдельные множители. Вклады соответствующие большим расстояниям не вычислимы в теории возмущений, т.е., они аккумулируют непертурбативную информацию. В различных случаях им соответствуют различные (вакуумные или адронные) матричные элементы от составных локальных или нелокальных операторов кварковых и глюонных полей.

В многих случаях достижимые на эксперименте передачи импульса Q^2 нельзя считать асимптотическими. С уменьшением передачи импульса в игру вступают предасимптотические вклады — как факторизуемые так и нефакторизуемые.

В отсутствие полной теории, позволяющей проводить расчеты в КХД в инфракрасной области, особую роль играет метод КХД правил сумм, также основанный на факторизации больших и малых расстояний. Первоначально с его помощью были вычислены массы и константы распада ряда низколежащих мезонных и барионных резонансов. Далее метод был успешно применен для вычисления электромагнитных формфакторов (диагональных) мезонов и барионов при умеренных и малых передачах импульса, их волновых функций (амплитуд распределения по продольному импульсу). Надо отметить, что все эти величины были получены, используя минимальный набор непертурбативных вакуумных

конденсатов, параметризующих сложную структуру вакуума КХД.

Замечательным свойством переходных формфакторов, исследуемых в диссертации на примере формфактора процесса $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0$ является то, что при надлежащем обобщении подхода, правило сумм для формфактора включает в себе указанные выше непертурбативные величины — вакуумные конденсаты (локальные или нелокальные), волновые функции, бислокальные корреляторы некоторых составных токов. Задачу можно обратить: вычисленные в одном процессе конденсаты, волновые функции и бислокальные корреляторы можно подставить в другом процессе тем самым проверяя самосогласованность метода правил сумм и КХД в целом.

Основные задачи диссертации

1. Построить правило сумм для формфактора процесса $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0$ при умеренных виртуальностях двух фотонов, исследуя подходящую трехточечную функцию Грина, и проследить, с другой стороны, возможность перехода к асимптотическим формулам пертурбативной КХД.

2. Исследовать структуру сингулярностей полученного правила сумм при стремлении q_1^2 (виртуальности мягкого фотона) к нулю. Построить модифицированное операторное разложение, позволяющее вычесть указанные инфракрасные сингулярности из коэффициентных функций и “поглотить” их в новые непертурбативные множители — бислокальные корреляторы.

3. Исследование бислокальных корреляторов путем построения для них вспомогательных правил сумм и оценка различных вкладов.

4. Анализ правила сумм для формфактора и сравнение с экспериментальными данными и с пертурбативным подходом.

Научные результаты и новизна

Настоящая диссертация посвящена развитию метода правил сумм для анализа эксклюзивных процессов в рамках КХД. В диссертации получены следующие результаты:

1) Правила сумм КХД обобщаются на случай переходного (недиагонального) формфактора при умеренных и малых передачах импульса

на примере формфактора $F_{\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0}(q_1^2, q_2^2)$ процесса $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0$.

2) В области умеренных виртуальностей фотонов: $|q_1^2| \sim |q_2^2| \geq 1 \text{ ГэВ}^2$ получено правило сумм КХД для формфактора $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0$ путем исследования трехточечной функции Грина:

$$F_{\alpha\mu\nu}(q_1, q_2) = i \int d^4x d^4y e^{-iq_1x} e^{-iq_2y} \langle 0 | T \{ J_\mu(x) J_\nu(y) j_\alpha^5(0) \} | 0 \rangle, \quad (0.1)$$

Исследована область его применимости. Показана связь с пертурбативным подходом.

3) Исследована структура инфракрасных сингулярностей полученного правила сумм в области малых виртуальностей одного из фотонов. Показано, что все сингулярности по q_1^2 (виртуальность мягкого фотона) при $q_1^2 \rightarrow 0$, присутствующие при обычном операторном разложении для трехточечной функции Грина появляются из интегрирования по области больших $x^2, (x-y)^2$. Отметим, что если для пертурбативного вклада сингулярности имеют логарифмический вид (типа $q^2 \ln q^2$ и $q^4 \ln q^2$), то для конденсатных диаграмм имеются и степенного и логарифмического вида. Подиagramное рассмотрение показывает, что единственным источником этих сингулярностей являются составные операторы двух наименьших твистов кварковых и глюонных полей, возникающих в бислокальных вкладах при факторизации больших и малых расстояний для каждой диаграммы.

4) Разработана эффективная техника учета операторов возрастающей размерности, но определенного твиста — как для ведущего (наинижего), так и для неведущего твистов. Эта техника основана на разложении импульсных интегралов типа

$$\int d^D \hat{p} \frac{(py)^n \{1, p_\rho, p_\rho p_\sigma, \dots\}}{(p^2)^\alpha (p-q)^{2\beta}}, \quad (0.2)$$

возникающих из бислокалов, по степеням почти светоподобной переменной y^2 .

5) Показано, что инфракрасные (массовые) сингулярности могут быть вычтены при соответствующем модифицированном операторном разложении для существенно несимметричной кинематической ситуации и полученное модифицированное правило сумм для формфактора регулярно в пределе $q_1^2 \rightarrow 0$.

6) Исследованы различные бислокальные вклады — двухточечные корреляторы электромагнитного тока и составных токов с производными

кварковых и глюонных полей ведущего и неведущего твиста. Рассмотрен вклад в них ρ -мезона и высших возбуждений. Показано, что КХД правила сумм для этих корреляторов по сути дела являются правилами сумм для моментов $\langle x^n \rangle_\rho$ различных волновых функций $\varphi_\rho(x)$ ρ^0 -мезона ведущего и неведущего твистов.

7) Получены связи на моменты $\langle x^n \rangle_\rho$, которые следуют из уравнений движения. С их помощью, в частности, зафиксированы нормировочные константы и асимптотическая форма набора двухчастичных волновых функций ρ -мезона твиста 3, 5.

8) Вычислены различные вклады в бислокальные корреляторы, используя соображения локальной дуальности. Показано, что основной вклад дают биллокалы, генерирующие двухчастичные волновые функции ρ -мезона твиста 3.

9) Рассмотрены вклады трехчастичных волновых функций твиста 3 и двухчастичных волновых функций твиста 5 ρ -мезона и показано, что эти вклады малы по сравнению с вкладом ведущего твиста. Рассмотрен также вклад с недиагональным биллокальным коррелятором. Сделана оценка вклада в нем волновой функции ρ -мезона ведущего твиста 2.

10) Вычислены также контактные степенные поправки из биллокалов с произвольным числом n производных в приближении ведущего твиста. Для этой цели предложена эффективная техника выделения вкладов определенного твиста. Вклад контактных степенных поправок в правило сумм для $F_{\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0}(Q^2)$ тоже оказывается малым.

11) Получено правило сумм для формфактора процесса $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0$ в случае существенно несимметричной кинематики: $|q_1^2| \ll |q_2^2| \geq 1 \text{ ГэВ}^2$. Показано, что оно обладает хорошей стабильностью по параметру M^2 при $M^2 > 0.6 \text{ ГэВ}^2$ для различных Q^2 при стандартном выборе интервала дуальности s_ρ в канале ρ -мезона. При этом, для $Q^2 > 1 \text{ ГэВ}^2$ значение интервала дуальности для π^0 -мезона s_π , полученное из непосредственной обработки правила сумм, находится в пределах $0.6 < s_\pi < 0.85 \text{ ГэВ}^2$, что согласуется с известными оценками. Наш результат для формфактора $F_{\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0}(q^2 = 0, Q^2)$ находится в хорошем согласии с существующими экспериментальными данными ($1. < Q^2 < 2.5 \text{ ГэВ}^2$) коллаборации CELLO 91' (DESY - Hamburg), а также с предварительными данными коллаборации CLEO 95' ($3. < Q^2 < 8. \text{ ГэВ}^2$).

12) Наш результат, полученный в рамках правил сумм КХД, согласуется также с простой интерполяцией для формфактора $F_{\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0}(Q^2)$ между значением при $Q^2 = 0$ (которое фиксируется аномалией Адлера-

Бэлла-Джакива) и $1/Q^2$ -асимптотикой при больших Q^2 , диктуемой пертурбативной КХД. Эта интерполяция в свою очередь совпадает с формулой для формфактора, основанной на гипотезе локальной дуальности.

13) При $Q^2 > 3 \text{ ГэВ}^2$ наша кривая для $Q^2 F_{\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0}(Q^2)$ практически константа, что соответствует ожиданию пертурбативной КХД. Таким образом подход правил сумм КХД позволяет нам вычислить коэффициент при асимптотическом $1/Q^2$ -члене. Абсолютное значение этой константы дает $I \approx 2.4$, где $I = \int_0^1 \varphi_\pi(x)/x dx$. Сравнивая это значение с $I^{as} = 3$ и $I^{CZ} = 5$, мы заключаем, что наш результат соответствует волновой функции пиона $\varphi_\pi(x)$, которая даже уже чем асимптотическая форма волновой функции $\varphi_\pi^{as}(x) = 6x(1-x)$.

Практическая ценность диссертации.

Развитый метод позволяет рассмотрение других переходных (напр. $\gamma^* p \rightarrow \Delta$, $\gamma^* \pi \rightarrow \rho$) и (или) диагональных формфакторов, учитывая универсальность непертурбативных множителей таких, как биллокальные корреляторы, волновые функции, локальные (нелокальные) конденсаты и провести их совместный анализ.

Важная деталь метода состоит в том, что при рассмотрении трехточечной корреляционной функции все импульсные инварианты считаются независимыми. Поэтому проведение двойного преобразования Бореля является естественной процедурой, позволяющей выделить вклад требуемых низколежащих адронных состояний. Т.е. в нашем подходе не существует проблемы так называемых одинарных полюсных вкладов.

Другое возможное применение нашего метода связано с анализом правил сумм для четырехточечных функций Грина для исследования физических амплитуд упругого пион-нуклонного и нуклон-нуклонного рассеяния, а также вычисление структурных функций глубоко-неупругого рассеяния на нуклоне $e^- N \rightarrow e^- X$ и фотоне $e^- \gamma \rightarrow e^- X$ включительно и в области малых x_B .

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы в работах, указанных в списке публикаций. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, в Университете г.Пармы, в Институте ядерных исследований и ядерной энергетики г.София, на Сессии отделения ядерной физики РАН (ИТЭФ, 1994), на международ-

дном семинаре "Кварки-94" (Владимир, 1994), на международной конференции PHOTON 95' (Sheffield, 1995), в Институте теоретической физики при университете г.Гейдельберга.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста, заключения, четырех приложений и 12 рисунков, содержит список литературы (134 ссылки). Объем диссертации 119 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается краткий обзор известных подходов к КХД. Внимание акцентируется естественным образом на наиболее успешном из них, основанном на факторизации больших и малых расстояний. Кратко изложен метод КХД правил сумм, его статус. Излагается также содержание диссертации.

Первые четыре раздела **главы 1** имеют в основном вводный характер. В разделе 2 дается определение формфактора, вводится подходящая трехточечная корреляционная функция (см.(0.1)) необходимая для построения КХД правила сумм, рассматривается соответствующее разложение на независимые тензорные структуры и инвариантные формфакторы.

В разделе 3 обсуждается связь, которую налагает аксиальная аномалия на инвариантные формфакторы.

В разделе 4 рассмотрены предсказания для асимптотики формфактора, основанные на пертурбативной КХД, обсуждается чувствительность этих предсказаний к выбору той или иной волновой функции π^0 -мезона. В частности, в случае, когда один из фотонов — реальный, асимптотика "управляется" тем же интегралом $I = \int_0^1 dx \varphi_\pi(x)/x$ что и асимптотика электромагнитного формфактора π^+ -мезона. Поэтому необходимо иметь независимую оценку этого интеграла.

Здесь следует отметить, что в противоположность электромагнитному формфактору π^+ -мезона, диаграмма с жестким перерассеянием для процесса $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \pi^0$ имеет нулевой порядок по α_s , т.е. асимптотически ведущий член не имеет подавления. Ситуация сходна с той в глубоконеупругом рассеянии и можно надеяться, что пертурбативная КХД для $F_{\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0}$ будет работать при доступных на эксперименте передачах импульса Q^2 .

Далее, в разделах 5, 6 и 7 построено правило сумм для формфактора $F_{\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0}(q_1^2, q_2^2)$ при умеренных виртуальностях обоих фотонов: $|q_1^2| \sim |q_2^2| \geq 1 \text{ ГэВ}^2$. Получены полные $\langle 0|G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a|0\rangle, \langle 0|\bar{\psi}\psi|0\rangle^2$ степенные поправки, причем для четырехкварковых операторов использовалась гипотеза вакуумной доминантности.

Установлена область применимости правила сумм и обсуждаются возможные пути его обобщения в случае двух различных существенно несимметричных кинематических ситуациях: 1) $Q_1^2 \gg Q_2^2 \geq 1 \text{ ГэВ}^2$ и 2) $Q_1^2 \ll Q_2^2 \geq 1 \text{ ГэВ}^2$. Обсуждается связь с пертурбативным подходом и двухточечным правилом сумм для волновой функции пиона.

Глава 2 диссертации посвящена исследованию общей структуры факторизации больших и малых расстояний для указанной выше трехточечной корреляционной функции, в случае малой виртуальности одного из фотонов: $|q_1^2| \ll |q_2^2| \geq 1 \text{ ГэВ}^2$. В данной существенно несимметричной кинематической ситуации выделяются два режима малых расстояний: SD(I) и SD(II). В первом режиме все три тока находятся на малых расстояниях, т.е. все интервалы $x^2, y^2, (x-y)^2$ малы. Во втором режиме электромагнитный ток $J_\mu(x)$ находится на больших расстояниях, т.е. y^2 мало, но $x^2, (x-y)^2$ большие. Исследуются инфракрасные (массовые) сингулярности в коэффициентных функциях при различных операторах в теоретической части правила сумм, возникающие при формальном стремлении одной из виртуальностей к нулю.

В разделе 2 рассмотрены (логарифмические) сингулярности в коэффициентной функции при единичном операторе. Это типичный пример инфракрасных сингулярностей, связанных с формальным вкладом теории возмущений из области больших $x^2, (x-y)^2$. Эти сингулярности как раз сигнализируют о необходимости провести дополнительную факторизацию вкладов больших и малых расстояний. В результате проведенной факторизации они вычитаются из коэффициентной функции и "абсорбируются" в новые пертурбативные объекты — билोकальные корреляторы.

В разделе 3 на простом скалярном примере рассмотрены все существенные шаги дальнейших вычислений. В частности, показано, что сингулярности генерируются пертурбативным аналогом соответствующего двухтокового коррелятора, в котором один из токов является составным оператором с производными, определенного (наинизшего) твиста. Построено модифицированное операторное разложение для скалярного трехточечника, регулярное в пределе $q_1^2 \rightarrow 0$.

В разделе 4 исследуется структура инфракрасных сингулярностей для реалистического случая процесса $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \pi^0$. При факторизации режима малых расстояний SD(II) для каждой из диаграмм выделяются различные коэффициентные функции — одно-, двух- и трех-пропагаторного типа. Билокальные корреляторы при них содержат составные операторы кварковых и глюонных полей с n ковариантными производными. Мы рассматриваем вклады операторов двух наинизших твистов для каждого n , суммируем по n и показываем, что именно эти операторы являются единственными источниками сингулярностей при формальной подстановке в билочалах операторного разложения, верного при больших, евклидовых q_1^2 .

В главе 3 исследуются билочальные вклады соответствующие выделению различных коэффициентных функций режима малых расстояний SD(II). Вклад больших расстояний в этом режиме (билочальный коррелятор) аккумулирует непертурбативную информацию, и его нельзя вычислить по теории возмущений. Идея состоит в том, чтобы снова привлечь метод правил сумм КХД. Для двухточечного коррелятора можно записать дисперсионное соотношение (вообще говоря, с вычитаниями). В качестве следующего шага необходимо построить ОРЕ для этого коррелятора в области больших евклидовых q_1^2 и, анализируя полученное (“вспомогательное”) КХД правило сумм, определить параметры соответствующей спектральной плотности. В нашем случае они включают моменты $\langle x^n \rangle_\rho$ различных волновых функций $\varphi_\rho^i(x)$ ρ^0 -мезона. Чтобы получить теперь коррелятор при малых q_1^2 , необходимо подставить эту модельную спектральную плотность в исходное дисперсионное соотношение. Мы показываем, что ведущий вклад дают волновые функции (ВФ) ρ -мезона твиста 2 и твиста 3. Получен вклад ВФ следующего твиста 5. Приведены доводы в пользу того, что в качестве разумного приближения можно использовать асимптотические выражения для волновых функций ρ -мезона, возникающих в билочалах. Рассматривается также вклад высших резонансов (континуум). Мы рассматриваем также контактные степенные поправки из билочалов с произвольным числом n производных в приближении ведущего твиста. Наконец мы анализируем полученное правило сумм в существенно несимметричной кинематике малых q_1^2 . Получена оценка для формфактора $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0(Q^2)$ в области $Q^2 > 1 \text{ ГэВ}^2$. При этом достигается хорошее согласие с существующими экспериментальными данными. В асимптотической области

по Q^2 наш подход позволяет вычислить коэффициент при асимптотическом члене независимым образом.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации и намечены нерешенные проблемы.

В приложениях вынесены некоторые детали вычислений. В приложении А показывается как можно разлагать по степеням y^2 (y — почти светоподобная переменная) некоторые импульсные интегралы, что необходимо для эффективного выделения вкладов ведущих твистов при любом числе производных n в составных операторах.

В приложении Б, используя уравнения движения, проводится анализ различных связей между моментами волновых функций ρ -мезона ведущего и неведущего твистов.

В приложении В выведены некоторые полезные свойства бесследовых Лоренцевых тензоров, позволяющих выделять операторы определенного твиста.

В приложении Г продемонстрирован вывод контактных вкладов в билочалы при любом числе производных, в приближении ведущего твиста.

Список публикаций

- 1) Радюшкин А.В., Русков Р. Формфактор процесса $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \pi^0$ при малой виртуальности одного из фотонов и правила сумм КХД(1): структура инфракрасных сингулярностей. — Препринт ОИЯИ, Дубна, 1992, E2-92-425, 20с.; Ядерная Физика, 1993, т.56, вып.5, с.103-122.
- 2) Радюшкин А.В., Русков Р. Формфактор процесса $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \pi^0$ при малой виртуальности одного из фотонов и правила сумм КХД(II): правило сумм. — Препринт ОИЯИ, Дубна, 1994, E2-94-248, 20с.; Ядерная Физика, 1995, т.58, вып.8, с.1440-1453.
- 3) Radyushkin A.V. and Ruskov R. Form factor of the process $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \pi^0$ for small virtuality of one of the photons and QCD sum rules. — Proceedings of the conference PHOTON 95, Sheffield 1995, Ed. D.Miller and V.Khoze, World Scientific (In print); hep-ph/9507447.
- 4) Radyushkin A.V., Ruskov R. QCD Sum Rule Calculation of $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ Transition Form Factor. — Preprint CEBAF-TH-95-17, 1995, pp.13 (submitted to Phys.Lett.).
- 5) Radyushkin A.V., Ruskov R. Transition Form Factor $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ and QCD sum rules. — Preprint CEBAF-TH-95-18, 1995, pp.50 (submitted to Nucl.Phys.).

Рукопись поступила в издательский отдел
27 ноября 1995 года.