

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-96-351

На правах рукописи
УДК 539.12.01

Б-432

БЕЛИЦКИЙ
Андрей Владимирович

АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ АДРОНОВ
И ФОТОНА В МЕТОДЕ КХД ПРАВИЛ СУММ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

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

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор

А.В. Ефремов

кандидат физико-математических наук

О.В. Теряев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Е.А. Кураев

доктор физико-математических наук,
профессор

В.А. Новиков

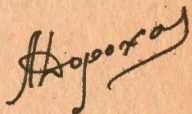
Ведущая организация: Институт Ядерных Исследований РАН. Москва.

Защита диссертации состоится "13" ноября 1996 г. в 15⁰⁰ часов на заседании специализированного совета К 047.01.01 при Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (141980 г. Дубна, Московской обл.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "7" октября 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета ЛТФ ОИЯИ
доктор физико-математических наук

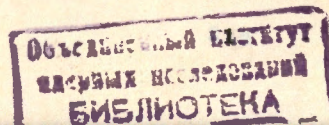

А.Е.Дорохов

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из важнейших задач современной физики высоких энергий является построение замкнутой теории сильновзаимодействующих частиц — адронов. В настоящее время общепризнанно, что Квантовая Хромодинамика (КХД) — неабелева калибровочная теория взаимодействующих цветных кварков и глюонов — является реальной теорией описывающей эту область. Свойство асимптотической свободы — логарифмическое уменьшение эффективной константы связи на малых расстояниях — позволило применить аппарат теории возмущений при описании процессов с большой передачей импульса Q^2 — жестких процессов. Однако, любой жесткий процесс зависит как от больших, так и от малых расстояний, что проявляется при наивном использовании пертурбативной теории в виде больших логарифмов $\sim (\alpha_s \ln Q^2/M_h^2)^n$, где M_h^2 — масса адрона, что свидетельствует о неправомерности прямого применения такого подхода. Теоретическую основу для корректного анализа таких процессов составляют факторизационные теоремы, позволяющие разделить эффекты, обусловленные динамикой больших и малых расстояний, в отдельные множители при расчете сечений и амплитуд. Вклады соответствующие малым импульсным инвариантам не вычислимы по теории возмущений, они аккумулируют непертурбативную информацию о процессе. В разных случаях им соответствуют матричные элементы от нелокальных операторов кварковых и глюонных полей по адронным состояниям (структурные функции), по адрону и вакууму (волновые функции), а также некоторые корреляционные функции фундаментальных полей (миллеровские "разрезанные" вершины), соответствующие функциям фрагментации.

В отсутствие полного понимания до сих пор неясного механизма конфайнмента, а значит и полной теории сильной связи, позволяющей проводить расчеты в инфракрасной области, особую роль играют подходы, которые последовательно учитывают непертурбативные эффекты. В настоящее время КХД правила сумм являются, по-видимому, самым мощным методом по извлечению низкоэнергетических характеристик адронов, и наиболее близким к стандартной теории возмуще-



ний. Новый ингредиент этого подхода — это набор непertурбативных вакуумных конденсатов, параметризующих сложную структуру хромодинамического вакуума. Используя минимальное число этих параметров, были успешно вычислены многие статические и динамические характеристики адронов.

Темой настоящей диссертации является обобщение и приложение метода КХД правил сумм к вычислению непertурбативных характеристик инклюзивных процессов — функций распределения (и их моментов) партонов в адронах и фотоне для поляризованного и неполяризованного глубоконеупругого рассеяния.

Основные задачи диссертации

1. Вычислить величину синглетной аксиальной константы, входящей в первый момент поляризованной структурной функции протона g_1^p , учитывая "аномальную" природу этой характеристики, при помощи построения правил сумм, основанных на модифицированном операторном разложении для соответствующего коррелятора.

2. Построить правила сумм для матричных элементов локальных глюонных операторов с использованием интерполяционного нуклонного тока с явным введением глюонных степеней свободы.

3. Построить операторное разложение для четырехточечной функции Грина электромагнитных токов в глубоконеупругой кинематике для поляризованной структурной функции фотона g_1^γ . Используя аналитичность по виртуальности фотона-мишени экстраполировать результат к случаю реального фотона.

4. Развить метод построения модифицированного операторного разложения для эффективной трехточечной корреляционной функции с нелокальным оператором в t -канальной вершине, с учетом нелокальных вакуумных конденсатов, в случае нулевого переданного импульса в составной вершине.

5. Используя развитую технику построить правила сумм для распределения валентных кварков в π -мезоне и сравнить результат с экспериментальными данными.

Научные результаты и новизна

Диссертация посвящена развитию метода КХД правил сумм для анализа инклюзивных процессов в рамках КХД, а именно вычислению поляризованных и неполяризованных структурных функций адронов и фотона. Получены следующие результаты:

1. Предложен метод вычисления синглетной аксиальной константы протона $G_A^{(0)}$, опирающийся на использование киральной аномалии в дивергенции синглетного аксиального тока, который позволяет свести вычисление к оценке матричного элемента псевдоскалярного глюонного оператора по протонному состоянию.

2. Построены правила сумм основанные на модифицированном операторном разложении для соответствующей амплитуды, с использованием нуклонного тока в который явно введены глюонные степени свободы, что соответствует высшей фоковской компоненте в волновой функции протона. Полученная оценка на $G_A^{(0)}$ хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

3. Предложен простой рецепт оценки билакальных вкладов соответствующих логарифмическим неаналитичностям (в отсутствие контактных членов) основанный на локальной дуальности.

4. Построено операторное разложение для четырехточечной корреляционной функции электромагнитных токов в глубоконеупругой кинематике, для тензорной структуры соответствующей поляризованной структурной функции g_1^γ .

5. С использованием дисперсионных соотношений и модели для спектральных плотностей найдена g_1^γ с правильным поведением по виртуальности фотона-мишени, что допускает экстраполяцию к случаю реального фотона.

6. Предложен альтернативный подход к вычислению адронной компоненты фотонных структурных функций, основанный на анализе борелевских правил сумм для трехточечных корреляторов.

7. Развита метод построения операторного разложения для трехточечной корреляционной функции при нулевом переданном импульсе с нелокальным оператором в "мягкой" вершине.

8. Построено обобщенное тождество Уорда для соответствующего коррелятора, позволяющее частично учитывать вклады контактных членов и величину неучтенных степенных поправок.

9. Предложен метод вычисления двухпетлевых диаграмм вершинного типа, возникающих при анализе трехточечных корреляционных функций.

10. Получены борелевские правила сумм для плотности кварков в пионе с учетом нелокальных конденсатов. Найденная x -зависимость хорошо согласуется с экспериментом в широкой области бьеркеновской переменной.

Практическая ценность диссертации

Построение правил сумм для псевдоскалярного глюонного формфактора при нулевом переданном импульсе с новым нуклонным током может быть обобщено для вычисления матричных элементов кварк-глюонных операторов твиста-4, входящих степенной поправкой в правило сумм Гросса-Ллевеллин Смита (F_3) и первый момент F_1 . Использование независимого рассмотрения импульсных инвариантов, позволяет легко следить за неаналитичностями по переданному импульсу и соответствующим образом модифицировать операторное разложение. Использование двойного преобразования Бореля улучшает как теоретическую, так и феноменологическую часть правил сумм.

Выполненное исследование структурной функции фотона диктует альтернативный подход к вычислению неполяризованной и поляризованной адронных компонент, основанных на построении правил сумм для трехточечных корреляционных функций.

Развитый метод построения модифицированного операторного разложения для корреляторов с нелокальным оператором на световом конусе, с учетом нелокальных вакуумных конденсатов, непосредственно применим для нахождения партонных распределений в мезонах и барионах с тяжелыми кварками (s -кварками).

Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в работах, указанных в списке публикаций. Они докладывались на семинарах в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, на 6-ом Международном Семинаре по Спиновым Явлениям в Физике Высоких Энергий (Протвино, 1995), на Международной Научной Конференции Отделения Ядерной Физики РАН "Фундаментальные Взаимодействия Элементарных Частиц" (Москва, 1995), на Международном Семинаре "Кварки-96" (Ярославль, 1996).

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав основного содержания, заключения, четырех приложений и 12 рисунков, содержит список литературы (107 ссылок). Объем диссертации 106 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается краткий обзор известных подходов к анализу жестких процессов в рамках Квантовой Хромодинамики, а также результатов полученных в методе КХД правил сумм из анализа двух- и трехточечных корреляционных функций. Сложности возникающие при исследовании последних в случае малого переданного импульса в одной из вершин демонстрируются на простом скалярном примере, показана процедура построения модифицированного операторного разложения для этого случая. Также излагается краткое содержание диссертации.

В **главе 1** вычисляется синглетная аксиальная константа протона $G_A^{(0)}$, связанная с первым моментом поляризованной структурной функции $g_1^p(x, Q^2)$, экспериментальное измерение которой в продольно поляризованном глубоконеупругом рассеянии привело к "спиновому кризису" в партонной модели.

В **разделе 1**, используя аномалию в дивергенции синглетного аксиального тока, находится связь между матричным элементом не-вперед от псевдоскалярного глюонного оператора $G_{\mu\nu}^a \bar{G}_{\mu\nu}^a$ и некоторым эффективным формфактором, равным $G_A^{(0)}$ при нулевом переданном им-

пульсе, в силу отсутствия безмассовых мезонов в синглетном аксиальном канале. В разделе 2 обсуждается проблема выбора нуклонного тока для вычисления матричных элементов глюонных операторов и приводятся аргументы в пользу использования интерполяционного протонного поля с явным введением глюонных степеней свободы

$$\eta_G(x) = \epsilon^{ijk} (u^i(x) C \gamma_\mu u^j(x)) \gamma_5 \gamma_\mu \sigma_{\alpha\beta} (g G_{\alpha\beta}^a(x) t^a d(x))^k,$$

который соответствует высшей фоковской компоненте в волновой функции нуклона.

В разделе 3 вводится подходящая корреляционная функция для извлечения интересующей величины и строятся борелевские правила сумм для ведущей тензорной структуры, свободной от фиктивных кинематических сингулярностей, при умеренных передачах Q^2 в t -канале. Демонстрируется необходимость модификации операторного разложения при малых Q^2 .

В разделе 4 вычисляются билोकальные степенные поправки с использованием вспомогательных правил сумм для соответствующих корреляционных функций. В общем случае сформулирован простой метод оценки билोकальных вкладов, основанный на локальной дуальности. Добавочный член имеет вид

$$W_{BL}^{add} = \frac{s_0^n/n}{Q^2 + m_t^2} - \int_0^{s_0} \frac{ds s^{n-1}}{s + Q^2},$$

где s_0 — порог континуума в t -канале, а m_t — масса нижайшего состояния. Этот рецепт применим напрямую в случаях, когда отсутствуют контактные члены в соответствующих вкладах, так как в присутствии последних происходит "перекачка" зависимости от переданного импульса, и наивное использование может приводить к ошибке.

Анализ правила сумм дает значение для синглетной аксиальной константы $G_A^{(0)} \simeq 0.2$, что хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

В разделе 5 сделаны замечания относительно имеющих в литературе вычислений $G_A^{(0)}$. Обсуждается возможность обобщения подхода для вычисления матричных элементов кварк-глюонных операторов твиста-4, входящих степенной поправкой в правило сумм Гросса-Ллевеллин Смита (F_3) и первый момент F_1 . Выписан соответствующий

коррелятор и выделена ведущая тензорная структура в системе бесконечного импульса. Намечены дальнейшие приложения.

В главе 2 вычисляется спин зависимая структурная функция поляризованного виртуального фотона $g_1^{\gamma}(x, Q^2, p^2)$, в частности ее адронная часть.

В разделе 1 даются краткие сведения о некоторых фотонных структурных функциях и важности учета адронной компоненты фотона для экспериментальных условий. Делается набросок метода используемого для вычисления.

В разделе 2 исследуется четырехточечная корреляционная функция электромагнитных токов. Для тензорной структуры соответствующей поляризованной структурной функции g_1^{γ} строится операторное разложение по обратным степеням виртуальности фотона-мишени. Обсуждается модификация при введении нелокальных конденсатов.

В разделе 3 используя аналитичность по виртуальности фотона-мишени записывается дисперсионное соотношение и строится модель спектральных плотностей в терминах адронного спектра. Из сравнения с теоретическим выражением найденным в КХД, находятся параметры спектральной плотности и, следовательно, — структурная функция виртуального фотона с учетом адронной компоненты

$$g_1^{\gamma}(x, Q^2, p^2) = \frac{\alpha_{em} N_c N_f(Q^4)}{\pi} \times \left\{ -[x^2 - (1-x)^2] + [x^2 - (1-x)^2] \left[\ln \left(\frac{Q^2}{x^2(s_0 - p^2)} \right) + \frac{p^2}{(s_0 - p^2)} \right] + \frac{1}{(p^2 - m_\rho^2)^2} \left[[x^2 - (1-x)^2] \frac{s_0^2}{2} + \frac{4}{27} \pi^2 \left(\frac{\alpha_s}{\pi} G^2 \right) \frac{1}{x^2} \right] \right\},$$

где s_0 — порог континуума в векторном канале, m_ρ — масса ρ -мезона.

В разделе 4 обсуждаются пределы применимости полученного результата и возможность экстраполяции к массовой поверхности фотона. Полученное выражение для адронной компоненты имеет вид предела локальной дуальности для структурной функции поляризованного ρ -мезона. Этот факт диктует подход для вычисления адронной компоненты фотона, основанный на анализе борелевских правил сумм для трехточечной корреляционной функции с нелокальным оператором на световом конусе. Для корректного вычисления последней в методе правил сумм необходима разработка модифицированного операторного

разложения для такой амплитуды, что последовательно проводится в главе 3 для распределения валентных кварков в π -мезоне.

В разделе 1 валентная партонная плотность в пионе записывается в виде матричного элемента от нелокального струнного оператора твиста-2 с отрицательной C -четностью

$$\mathcal{O}\left(\frac{\lambda}{2}n, -\frac{\lambda}{2}n\right) = \bar{u}\left(\frac{\lambda}{2}n\right)\gamma_+\Phi\left[\frac{\lambda}{2}n, -\frac{\lambda}{2}n\right]u\left(-\frac{\lambda}{2}n\right) + (\lambda \rightarrow -\lambda),$$

и Φ P -упорядоченная экспонента, которая обеспечивает калибровочную инвариантность партонного распределения и λ — расстояние между полями на световом конусе.

В разделе 2 выписана необходимая корреляционная функция W с выделенной ведущей тензорной структурой на световом конусе, кратко описывается метод вычислений. Обосновывается необходимость введения нелокальных вакуумных конденсатов, что связано с сингулярностями по бьеркеновской переменной при построении операторного разложения по локальным операторам.

В разделе 3 выписываются нелокальные вакуумные средние необходимые на двухпетлевом уровне, которым ограничивается анализ.

В разделе 4 вычислены теоретико-возмущенческий член и непертурбативные поправки. В пертурбативной части появляются логарифмические неаналитичности, когда активный кварк несет пренебрежимо малую долю импульса начального адрона, — свидетельство необходимости реформирования первоначального операторного разложения. Более того нормировка партонной плотности в пионе $\int_0^1 dx u_\pi(x) = 1$ нарушена при учете только обычных степенных поправок, тогда как из тождества Уорда выведенного в разделе 5 и имеющего вид

$$\begin{aligned} W_{\mu\nu} &= i^2 \int d^4x d^4y e^{ip_1x + iqy} \langle 0 | T \left\{ j_\mu^5(x), \mathcal{O}\left(y + \frac{\lambda}{2}n, y - \frac{\lambda}{2}n\right), j_\nu^{5\dagger}(0) \right\} | 0 \rangle \\ &= i \int d^4x e^{ip_1x} \frac{x_+}{(qx)} [e^{iqx} \langle 0 | T \left\{ j_\mu^5(x, x - \lambda n), j_\nu^{5\dagger}(0) \right\} | 0 \rangle \\ &\quad - \langle 0 | T \left\{ j_\mu^5(x), j_\nu^{5\dagger}(0, \lambda n) \right\} | 0 \rangle] \\ &+ \frac{\lambda}{2} \int_{-1}^1 d\tau \int d^4x d^4y e^{ip_1x + iqy} \frac{x_+}{(qx)} \langle 0 | T \left\{ j_\mu^5(x), \mathcal{G}\left(y + \frac{\lambda}{2}n, y - \frac{\lambda}{2}n, \tau\right), j_\nu^{5\dagger}(0) \right\} | 0 \rangle \\ &\quad + (\lambda \rightarrow -\lambda), \end{aligned}$$

следует, что оно должно точно выполняться в КХД. Здесь $j_\mu^5(0, \lambda n)$ — раздвинутый пионный ток на световом конусе, а \mathcal{G} — некоторый кварк-глюонный оператор.

В разделе 6 описана процедура модификации разложения. В разделе 7 вычислены важные билокальные степенные поправки (контактные члены), поправляющие поведение партонной плотности при относительно малых λ . После их учета нормировочное условие восстанавливается.

В разделе 8 с помощью результатов полученных в предыдущих разделах анализируются правила сумм при различных значениях корреляционных длин флуктуаций вакуумных полей. Используя тождества Уорда делается оценка на часть вкладов глюонного конденсата в правила сумм. Производится сравнение результатов с экспериментальными данными и находится хорошее согласие в широкой области изменения бьеркеновской переменной.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации и намечены некоторые дальнейшие приложения.

Некоторые технические детали вынесены в приложения. В приложении А представлены некоторые полезные интегралы необходимые в дополнительной факторизации больших и малых расстояний в обычных фейнмановских диаграммах с учетом вкладов нижайших трех твистов. В приложении В описан общий метод получения двойных спектральных плотностей и выписаны необходимые формулы. В приложениях С и D описаны детали метода вычисления двухпетлевых вершинных диаграмм, появляющихся в задачах формфакторного типа.

Список публикаций

- [1] Belitsky A.V., Teryaev O.V. Singlet axial constant from QCD sum rules. Phys. Lett. B, 1996, v. 366, No. 2; p. 345-353.
- [2] Belitsky A.V., Teryaev O.V. QCD sum rules calculation of the singlet axial constant. Phys. Atom. Nucl., 1997, No. 2; JINR Preprint E2-95-374, 1995.
- [3] Belitsky A.V., Teryaev O.V. Nucleon structure and QCD sum rules. In: Proc. of the VI Int. Workshop on Spin Phenomena "Spin-95", 1995.
- [4] Belitsky A.V. Hadronic component of the photon spin dependent structure function g_1^{γ} from QCD. J. Phys. G., 1996; JINR Preprint E2-95-493, 1995.
- [5] Belitsky A.V. Quark distribution in the pion from QCD sum rules with nonlocal condensates. Phys. Lett. B, 1996; JINR Preprint E2-96-134, 1996.
- [6] Belitsky A.V. Pionic parton density from QCD sum rules with nonlocal condensates. In: Proc. of the Ninth Int. Seminar "Quarks-96".

Рукопись поступила в издательский отдел
27 сентября 1996 года.