

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-99-283

На правах рукописи
УДК 539.12.01

Б-912

БУРДАНОВ
Яков Викторович

**МАССЫ ЛЕГКИХ МЕЗОНОВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ
СТРУКТУРА ПИОНА В МОДЕЛИ ИНДУЦИРОВАННЫХ
НЕЛОКАЛЬНЫХ КВАРКОВЫХ ТОКОВ**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1999

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. До настоящего времени природа сильного взаимодействия, определяющего динамику адронных процессов на масштабах 0.1-1 фм, остается предметом интенсивного теоретического и экспериментального изучения.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что специфике сильного взаимодействия определяют следующие явления: асимптотическая свобода на малых расстояниях; нарушение киральной симметрии; адронизация, т.е. возникновение адронов в результате кварк-глюонных взаимодействий, и отсутствие (конфайнмент) кварков и глюонов в наблюдаемом физическом спектре частиц.

Описание статических и динамических свойств адронов в области малых расстояний осуществляется в рамках калибровочной теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамики (КХД). Ее основными достоинствами являются перенормируемость и асимптотическая свобода. Уменьшение эффективной кварк-глюонной константы с ростом энергии позволяет использовать для вычисления адронных характеристик теорию возмущений, которая лежит в основе математического аппарата КХД. Однако, рост константы взаимодействия в области низких и промежуточных энергий делает теорию возмущений абсолютно неприменимой для решения проблемы связанного состояния и вычисления таких фундаментальных характеристик адронов, как массы, константы распадов, формфакторы и т.д.

На сегодняшний день понято, что при описании непертурбативных эффектов, определяющих мир адронов (нарушение киральной симметрии и конфайнмент), главную роль играет нетривиальная структура вакуума КХД, который реализовывался бы вполне определенными классическими конфигурациями глюонного поля.

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

Научные руководители:

доктор физико-математических наук Г.В. ЕФИМОВ
кандидат физико-математических наук С.Н. НЕДЕЛЬКО

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Э.А. КУРАЕВ
доктор физико-математических наук А.Л. КАТАЕВ

Ведущая организация:

Институт физики высоких энергий, г. Протвино

Защита диссертации состоится "8" сентября 1999 г. на заседании диссертационного совета К047.01.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

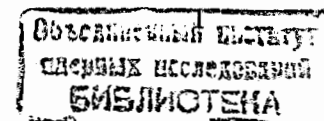
Автореферат разослан "2" ноября 1999 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь
диссертационного совета

доктор физико-математических наук

А.Е. ДОРОХОВ



С начала 80-х годов стала проясняться физическая картина непертурбативного вакуума КХД, характеризуемого однородным (анти-)самодуальным глюонным полем. Именно, было показано, что в противоположность чистым хромоэлектрическим или хромомагнитным конфигурациям само- и антисамодуальные однородные поля являются стабильными в том смысле, что эффективный потенциал для этих полей является действительной функцией.

Эффективный потенциал для такой вакуумной конфигурации вычислялся в однопетлевом приближении. Однако, эти результаты не могут служить основанием для каких-либо строгих выводов, поскольку квантовые поправки к потенциалу оказались сравнимыми с классическим вкладом, соответствующим нулевому порядку.

Помимо некоторых попыток изучения на решетке эффективного потенциала для хромомагнитного вакуума Саввиди, аналогичные непертурбативные вычисления для случая самодуального однородного фонового поля не проводились.

Общая причина отсутствия оценок напряженности однородного самодуального фонового поля заключается в следующем: в квантовополевых системах фазовые переходы, сопровождаемые появлением ненулевых вакуумных полей, выходят за рамки области применения теории возмущений. Поэтому несмотря на имеющиеся сильные указания (но не строгое доказательство) на то, что это поле способно минимизировать эффективный потенциал КХД, вопрос о существовании однородного самодуального вакуумного поля остается открытым.

Тем не менее было понято, что это поле может иметь отношение к основным свойствам КХД: конфайнменту кварков и нарушению киральной симметрии. В то же время проявления данной полевой конфигурации в адронной феноменологии в терминах бозонизации и состава

внешних мезонных полей не изучались.

Предположение о том, что непертурбативный вакуум КХД реализуется длинномасштабными флуктуациями (анти-)самодуального глюонного поля, легло в основу модели индуцированных нелокальных кварковых токов.

В модели вакуумные флуктуации аппроксимируются однородным (анти-)самодуальным глюонным полем, а все мезонные амплитуды усредняются по различным вакуумным конфигурациям этого поля. Вакуумное поле учитывается как в глюонном, так и в кварковом пропагаторах.

Модель обладает следующими отличительными свойствами.

- Рассматриваемое поле приводит к аналитическому конфайнменту кварков и глюонов: кварковый и глюонный пропагаторы являются целыми функциями в импульсном представлении, т.е. не имеют полюсов, соответствующих свободным физическим частицам.
- Эффективная мезонная теория, получаемая в результате бозонизации одноглюонного обмена в присутствии фонового поля, является ультрафиолетово-конечной благодаря нелокальности мезон-кваркового взаимодействия. При этом различные кварковые петли, разделенные мезонными линиями, усредняются по пространственным направлениям вакуумного поля и по само- и антисамодуальным конфигурациям независимо друг от друга.
- Взаимодействие спина кварка с однородным самодуальным полем порождает бесконечное число (континуум) нулевых мод оператора Дирака во внешнем поле. Нулевые моды приводят к неаналитичности функций Грина по массе кварка в точке $m_q = 0$. Ненулевой безмассовый предел произведения массы кварка и плотности кваркового конденсата $m_q \langle \bar{\psi}\psi \rangle_V$ указывает на неголдстоуновский меха-

низм нарушения киральной симметрии. Нарушение киральной симметрии возникает как вторичный эффект спонтанного нарушения четности.

- Конфайнированные глюонные поля обеспечивают естественное разложение билакальных бесцветных кварковых токов в ряд по нелокальным токам с полным набором квантовых чисел: спином, изоспином, радиальным и орбитальным числами. Нелокальное четырехкварковое взаимодействие генерирует суперперенормированную теорию возмущений.

В свете дальнейшего развития модели и прояснения картины вакуума КХД, характеризуемого однородным самодуальным глюонным полем, представляется необходимым проведение систематического анализа возможных проявлений этого поля в свойствах легких мезонов при низких энергиях.

В этом направлении проводилось исследование, результаты которого выдвигаются на защиту.

Целью диссертации является вычисление статических и динамических характеристик легких мезонов в рамках модели индуцированных нелокальных кварковых токов.

Основная задача заключается в изучении роли кварковых нулевых мод, обусловленных взаимодействием спина кварка с однородным самодуальным полем и приводящих к негодстоуновскому механизму нарушения киральной симметрии, при описании низкоэнергетических характеристик легких мезонов в рамках модели индуцированных нелокальных кварковых токов.

Научная новизна и ценность работы. Впервые изучена роль однородного (анти-)самодуального вакуумного глюонного поля, реализующего непertурбативный вакуум КХД, при описании основных харак-

теристик легких мезонов при низких энергиях.

В рамках модели индуцированных нелокальных кварковых токов, основанной на предположении о том, что вакуум КХД реализуется однородным (анти-)самодуальным глюонным полем, получено единое описание статических (массы, константы распадов, электромагнитные радиусы) и динамических (формфакторы) свойств легких мезонов. С минимальным набором параметров (массы кварков, напряженность вакуумного поля и константа связи α_s) достигнуто хорошее количественное согласие с экспериментальными данными, а лежащие в его основе качественные причины имеют ясный физический смысл.

Впервые показано, что нулевые моды, индуцируемые взаимодействием спина кварка с однородным самодуальным вакуумным глюонным полем, служат причиной образования кваркового конденсата, расщепления масс псевдоскалярных и векторных мезонов, малости массы пиона и определяют значения констант слабых распадов f_π и f_K , переходного формфактора пиона $F_{\gamma\pi}(Q^2)$ и ширины распада $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$.

Полученные в диссертации результаты позволяют рассматривать однородное самодуальное глюонное поле в качестве возможного кандидата на роль вакуума КХД и служат стимулом для дальнейшего изучения его природы.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, на международных семинарах "Релятивистская ядерная физика & квантовая хромодинамика" (Дубна, 12-17 сентября, 1994) и "Физика тяжелых кварков" (Германия, 14-16 декабря, 1994), на международных конференциях "Мезоны и ядра при промежуточных энергиях" (Дубна, 3-7 мая, 1994), "Адрон 95" (Манчестер, 9-14 июля, 1995), "Проблемы квантовой теории поля"

(Дубна, 13-17 июля, 1998), а также на международных рабочих совещаниях "Физика высоких энергий" (Протвино, 14-17 сентября, 1993) и "Физика тяжелых кварков" (Дубна, 20-22 мая, 1996).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в пяти работах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, четырех приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 125 страниц, в том числе 13 рисунков, 3 таблицы. Библиография содержит 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе формулируется модель индуцированных нелокальных кварковых токов, основанная на предположении о том, что непертурбативный вакуум КХД реализуется длинномасштабными флуктуациями (анти-)самодуального глюонного поля.

В §1.2 вакуумные флуктуации глюонного поля аппроксимируются однородным (анти-)самодуальным полем, а все физические амплитуды усредняются по его различным вакуумным конфигурациям. Вакуумное поле учитывается как в глюонном, так и в кварковом пропагаторах.

В §1.3 а) показано, что кварковый и глюонный пропагаторы во внешнем поле являются целыми функциями в импульсном представлении, т.е. не имеют полюсов, соответствующих свободным физическим частицам.

Взаимодействие спина кварка с однородным самодуальным полем порождает континуум нулевых мод оператора Дирака во внешнем поле (§1.3 б)). Нулевые моды приводят к неаналитичности функций Грина

по массе кварка в точке $m_q = 0$. В частности, для плотности кваркового конденсата имеет место равенство

$$\sum_{f=1}^{N_F} \lim_{m_f \rightarrow 0} m_f \langle \bar{\psi}_f \psi_f \rangle_B = -N_F \frac{B^2}{2\pi^2},$$

справедливое во всех порядках петлевого разложения. Ненулевой безмассовый предел произведения массы кварка и плотности кваркового конденсата указывает на неголдстоуновский механизм нарушения киральной симметрии. Нарушение киральной симметрии возникает как вторичный эффект спонтанного нарушения четности.

Параграф 1.4 посвящен изучению коллективных мод, индуцированных однородным фоновым полем.

В §1.4 а) построены биллокальные бесцветные кварковые токи, естественное разложение которых, выполненное в §1.4 б), в ряд по нелокальным токам с полным набором квантовых чисел (спином, изоспином, радиальным и орбитальным числами) обеспечивается конфаймированными глюонными полями. Нелокальное четырехкварковое взаимодействие генерирует суперперенормированную теорию возмущений.

Бозонизация одноглюонного обмена в присутствии фонового поля (§1.4 в)) приводит к эффективной мезонной теории, которая является ультрафиолетово-конечной благодаря нелокальности мезон-кваркового взаимодействия. При этом различные кварковые петли, разделенные мезонными линиями, усредняются по пространственным направлениям вакуумного поля и по само- и антисамодуальным конфигурациям независимо друг от друга.

Модель содержит минимальный набор параметров: массы кварков m_f , напряженность вакуумного поля B и константа связи α_s .

Вторая глава посвящена вычислению статических характеристик легких мезонов в рамках модели индуцированных нелокальных кварко-

вых токов.

В §2.1 получены массы псевдоскалярных и векторных нонетов легких мезонов в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Качественная причина этого заключается в следующем: взаимодействие спина кварка с однородным самодуальным глюонным полем обуславливает расщепление масс псевдоскалярных и векторных мезонов с одинаковым кварковым составом (π - ρ , K - K^*) и малость пионной массы.

Это же спин-полевое взаимодействие исключает из спектра скалярные и аксиальные аналоги π и ρ мезонов. Скалярные и аксиальные мезоны возникают в сверхтонкой структуре орбитальных возбуждений векторных мезонов.

В §2.2 вычислены константы слабых распадов пиона и каона f_π и f_K и показано, что их значения в основном определяются взаимодействием спина кварка с однородным глюонным полем.

В третьей главе в рамках представленной модели рассмотрены динамические характеристики пиона.

В §3.2 электромагнитное взаимодействие введено минимальным образом как в часть лагранжиана, отвечающую свободным кваркам, так и в нелокальный кварковый ток. Развита последовательная процедура вычисления нелокальных вершин в любом порядке разложения по электромагнитному полю.

В §3.3 найдено, что вклад кварковых нулевых мод в однопетлевую амплитуду процессов $\pi^0 \gamma^* \rightarrow \gamma$ и $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ объясняет экспериментально наблюдаемые значения переходного формфактора $F_{\gamma\pi}(Q^2)$ и двухфотонной константы распада $g_{\pi\gamma\gamma}$.

В §3.4 продемонстрировано, что учет вакуумного поля в пропагаторах кварков и глюонов кардинально изменяет асимптотику треугольной диаграммы $\sim 1/(Q^2)^{1+m_0^2/B}$ по сравнению с обычным $\sim 1/Q^4$ поведе-

нием, что приводит к увеличению ее вклада в зарядовый формфактор пиона $F_\pi(Q^2)$.

Абсолютная асимптотика зарядового формфактора $\sim 1/Q^2$ определяется диаграммами жесткого перерасцеяния в полном согласии с анализом в рамках правил кваркового счета и пертурбативной КХД.

В заключении сформулированы результаты диссертации, выдвигаемые на защиту.

В приложениях приведены процедура разложения нелокальных вершин по электромагнитному полю (В), подробные вычисления нелокального кваркового тока (А), а также переходного (В) и зарядового (Г) формфакторов пиона.

Результаты диссертации, выдвигаемые на защиту

Основной результат диссертации состоит в том, что в рамках модели индуцированных нелокальных кварковых токов нулевые моды, обусловленные взаимодействием спина кварка с однородным самодуальным вакуумным глюонным полем, служат причиной образования кваркового конденсата, расщепления масс псевдоскалярных и векторных мезонов, малости массы пиона и определяют значения констант слабых распадов f_π и f_K , переходного формфактора пиона $F_{\gamma\pi}(Q^2)$ и ширины распада $\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$.

Таким образом, модель правильно передает основные особенности низкоэнергетической физики легких мезонов.

Этот вывод сделан на основе следующих результатов:

1) В рамках модели индуцированных нелокальных кварковых токов с минимальным набором параметров (массы кварков, напряженность вакуумного поля и константа связи α_s) вычислены массы псевдоскалярных и векторных нонетов легких мезонов. Получено хорошее согласие

с экспериментальными данными.

- Показано, что взаимодействие спина кварка с длинномасштабными флуктуациями глюонного поля обуславливает расщепление масс псевдоскалярных и векторных мезонов с одинаковым кварковым составом (π - ρ , K - K^*) и малость пионной массы.
- Это же спин-полевое взаимодействие исключает из спектра скалярные и аксиальные аналоги π и ρ мезонов. Скалярные и аксиальные мезоны возникают в сверхтонкой структуре орбитальных возбуждений векторных мезонов.

2) Вычисление констант слабых распадов пиона и каона f_π и f_K показывает, что их значения в основном определяются взаимодействием спина кварка с однородным глюонным полем.

3) Продемонстрировано, что вклад кварковых нулевых мод в однопетлевую амплитуду процессов $\pi^0\gamma^* \rightarrow \gamma$ и $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ объясняет экспериментально наблюдаемые значения переходного формфактора $F_{\gamma\pi}(Q^2)$ и двухфотонной константы распада $g_{\pi\gamma\gamma}$.

4) Показано, что учет вакуумного поля в пропагаторах кварков и глюонов кардинально изменяет асимптотику треугольной диаграммы $\sim 1/(Q^2)^{1+m_i^2/B}$ по сравнению с обычным $\sim 1/Q^4$ поведением, что приводит к увеличению ее вклада в зарядовый формфактор пиона $F_\pi(Q^2)$.

Абсолютная асимптотика зарядового формфактора $\sim 1/Q^2$ определяется диаграммами жесткого перерасеяния, что согласуется с анализом в рамках правил кваркового счета и пертурбативной КХД.

Результаты диссертации опубликованы в работах

1. Ya. Burdanov, G. Efimov, S. Nedelko, S. Solunin.

Meson masses within the model of induced nonlocal quark currents. Phys. Rev. D, 1996, v.54, No.7, pp. 4483-4498; hep-ph/9601344.

2. Ya. Burdanov, G. Efimov, S. Nedelko, S. Solunin. Mass splitting of the pseudoscalar and vector mesons induced by the homogeneous vacuum gluon field.

Z. Phys. C, 1995, v.66, pp. 253-261;

Erratum: Eur. Phys. J. C, 1999, v.7, p.551;

Preprint JINR-E2-94-88, JINR, 1994.

3. Ya. Burdanov, G. Efimov, S. Nedelko, S. Solunin. Bosonization of heavy and light quarks induced by the homogeneous vacuum gluon field.

Chinese J. of Phys., 1996, v.34, No.3, pp. 889-893.

4. Ya. Burdanov, G. Efimov, S. Nedelko. Self-dual homogeneous gluon field and electromagnetic structure of pion. Preprint JINR-E2-98-196, JINR, 1998, hep-ph/9806478; Submitted to "Phys. Rev. C".

5. Ya. Burdanov, G. Efimov, S. Nedelko. (Anti-)self-dual homogeneous gluon field and axial anomaly in QCD. hep-ph/9810455.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 октября 1999 года.