



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

2-2003-6

К-755

На правах рукописи  
УДК 539.12.01

**КОЧЕЛЕВ**  
Николай Иннокентьевич

**ВАКУУМ КХД**  
**И СПИН-АРОМАТНЫЕ СВОЙСТВА АДРОНОВ**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 2003

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук И.М. Дрёмин  
профессор  
доктор физико-математических наук Р.Н. Фаустов  
профессор  
доктор физико-математических наук Н.П. Зотов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

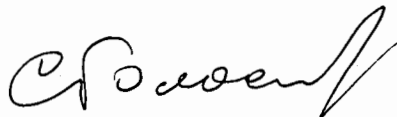
Институт математики им. С.Л. Соболева,  
СО РАН, Новосибирск.

Защита диссертации состоится на заседании специализированного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова Объединённого института ядерных исследований "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2003 г. по адресу г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединённого института ядерных исследований.

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

Учёный секретарь совета,  
доктор физико-математических наук



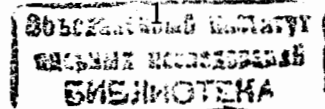
С.В. Голосоков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время общепризнанной теорией сильных взаимодействий является квантовая хромодинамика (КХД). КХД обладает следующими достоинствами: она перенормируема, эффективная константа взаимодействия стремится к нулю на малых расстояниях и поэтому теория "асимптотически свободна", существует надежда на доказательство конфайнмента кварков и глюонов. Первые два свойства позволили, используя теорию возмущений, объяснить целый класс процессов при больших передачах импульса. Однако следует заметить, что процессы с большой передачей импульса между партонами составляют лишь очень малую долю всех процессов, где сильные взаимодействия дают вклад. Основной же экспериментальный материал, накопленный к настоящему времени, относится к свойствам адронов, где динамика больших расстояний между кварками и глюонами играет существенную роль, и поэтому их описание требует выход за рамки хорошо разработанного аппарата теории возмущений КХД.

Одним из наиболее прямых методов учёта непертурбативных эффектов является КХД на пространственно-временной решётке. Однако несмотря на существенный прогресс в этом направлении, КХД на решётке в настоящее время может претендовать лишь на описание очень ограниченного класса адронных матричных элементов. Это связано с некоторыми внутренними проблемами КХД на решётке, такими, как например, неоднозначностями в переходе к непрерывному и киральному пределам и способе последовательного введения лёгких кварков. Особенно эти проблемы дают о себе знать при расчётах спин-зависимых величин, в которых эффекты нарушения сохранения спиральности кварков, вызванные либо конечным размером решётки, либо ненулевыми массами кварков, играют замет-



ную роль. С другой стороны именно спиновая физика адронов в последнее время привлекает всё возрастающее внимание как экспериментаторов, так и теоретиков. Интерес к проблеме вызван в первую очередь сенсационным результатом измерения коллаборацией EMC доли спиральности протона, переносимой кварками. Оказалось, что кварки переносят очень малую долю спиральности нуклона, что находится в противоречии с ожиданиями наивной партонной модели нуклона, где вся спиральность протона переносится тремя валентными кварками. Дальнейшие более точные эксперименты подтвердили этот вывод. В этой связи возникает целый ряд фундаментальных вопросов:

Во-первых, есть ли специальный механизм в рамках теории сильных взаимодействий, квантовой хромодинамики, приводящий к практически полной компенсации спиральности валентных кварков в процессах глубоко-неупругого рассеяния?

Во-вторых, если спиральность нуклона не определяется его валентными кварками, то какие его составляющие ответственны за наблюдаемый спин нуклона?

И, в-третьих, почему составная кварковая модель, в которой весь спин адрона определяется спином валентных кварков, описывает хорошо многие адронные свойства, в том числе и те, которые напрямую связаны со спиновыми степенями свободы?

Следует отметить, что ещё задолго до результата EMC аномальные спиновые эффекты наблюдались также и в других инклюзивных и эксклюзивных адронных процессах при высоких энергиях. Все эксперименты приводили к заключению, что спин играет существенную роль в адронной физике не только при низких энергиях и малых передачах импульса, где можно было бы ожидать большие спиновые асимметрии, связанные с вкладом ненулевых адронных масс в нарушение сохранения спиральности, но также и в процессах при высоких энергиях и больших передачах импульса, где согласно пертурбативной КХД все спин-зависимые наблюдаемые должны быть малы. Однако, до EMC результата этим данным не было уделено достаточного

внимания в силу того, что теоретическое описание этих процессов требует детального описания процесса адронизации кварков и глюонов в наблюдаемые адроны, что можно сделать лишь в рамках пертурбативной КХД.

Кроме спиновых аномалий, в последнее время также интенсивно обсуждаются и наблюдаемые в адронном мире аномалии, зависящие от аромата кварков, участвующих в данном процессе. При этом эксперименты указывают на взаимосвязь между обоими явлениями. А именно, усиление процессов в определённых состояниях относительно ароматных  $SU(2)_f$  и  $SU(3)_f$  групп оказалось сильно зависимым и от их спинового содержания. Следует также отметить, что ароматные аномалии обычно связывают с большим нарушением в некоторых каналах правила Окубо-Цвейга-Изуки (ОЦИ), подавляющего реакции с разрывными кварковыми линиями. В адронной спектроскопии ОЦИ правило, например, запрещает примеси странных кварков в волновых функциях адронов, состоящих из  $u$ - и  $d$ - кварков. Это правило довольно хорошо выполняется для большинства реакций, однако в некоторых случаях наблюдается его аномальное нарушение. В КХД ОЦИ правило является строгим в пределе большого числа цветов, т.е. в лидирующем порядке по  $1/N_c$ -разложению.  $1/N_c$ -разложение широко используется в адронной физике и поэтому установление причин его нарушения есть также одна из фундаментальных задач в теории сильных взаимодействий. Исследование механизмов нарушения правила ОЦИ даёт также важнейшую информацию об ароматной и спиновой структурах кваркового моря в нуклоне.

К сожалению, в силу отмеченных выше причин, наиболее прямой метод расчёта пертурбативных эффектов, КХД на решётке, оказался не очень успешным в вычислении величин, характеризующих спин-ароматную структуру кварковых морей в адронах. Кроме решёточных расчётов существуют и различные аналитические методы учёта этих эффектов, основанные на современных моделях вакуума КХД. Инстантоны, мощные ва-

куумные флуктуации глюонных полей, представляют один из наиболее фундаментальных аспектов непертурбативной КХД. Они были теоретически открыты и впервые изучены в работах Полякова и соавторов и т'Хоофта около 25 лет тому назад. С момента открытия инстантонная физика развивалась в нескольких направлениях.

Первое направление было, в той или иной степени, связано с обоснованием фундаментальной роли инстантонов в структуре вакуума КХД, например, в обосновании инстантонного механизма спонтанного нарушения киральной симметрии в КХД и в возникновении глюонного конденсата.

Второе направление было связано с приложениями инстантонной физики для расчета различных адронных свойств, таких, например, как массы адронов и их форм факторы.

Третье направление, исследование инстантонов на решётке, начало бурно развиваться лишь в последние годы. Так напрямую было показано, что инстантоны являются важнейшими флуктуациями глюонных полей в вакууме, получены оценки их плотности и среднего размера.

Большая работа, выполненная в этих направлениях, привела к выводу, что модель вакуума КХД как жидкости инстантонов является, повидимому, наиболее адекватной моделью для непертурбативного вакуума КХД. Для окончательного становления теории требуется, однако, убедительные доказательства, что наблюдаемые свойства адронов не могут быть описаны без привлечения инстантонов. Спиновая и ароматная физика адронов, где затрагивается динамика кварков и глюонов на больших расстояниях, является как раз одной из областей наиболее чувствительных для проверки различных непертурбативных КХД моделей.

Основная цель диссертации состоит в установлении связи между наблюдаемыми спиновыми и ароматными аномалиями, проявляющимися в адронной спектроскопии и в столкновениях элементарных частиц, со сложной структурой вакуума КХД,

связанной с существованием сильных непертурбативных флуктуаций глюонных и кварковых полей.

### Научная новизна и практическая ценность.

В диссертации предложен новый подход к исследованию наблюдаемых спиновых и ароматных аномалий в физике адронов, основанный на учёте сложной структуры вакуума КХД. Так показано, что существование непертурбативных вакуумных глюонных полей, инстантонов, приводит к специфическим спин- и ароматно-зависимым взаимодействиям между кварками и глюонами. Эти взаимодействия лежат в основе наблюдаемых аномалий. В предлагаемом подходе возникает также глубокая связь между спиновыми и ароматными эффектами. Эта связь следует фактически из необходимости соблюдения принципа Паули для кварков в поле инстантона.

В рамках операторного разложения впервые проделан полный анализ спин-зависимых структурных функций нуклона с учётом вклада слабых токов. Получен ряд важнейших новых правил сумм между различными структурными функциями. Результат этого анализа позволил определить корректность применения различных кварковых моделей к описанию поляризованного глубоко-неупругого рассеяния лептонов на нуклоне.

Одним из результатов диссертации явилось установление связи между физикой дифракционных процессов при больших передачах импульса и спиновой физикой. Так оказалось, что введённая в работе новая траектория Редже,  $f_1$ , с ненатуральной чётностью и высоким интерсептом, позволила объяснить не только аномальное поведение спин-зависимой нуклонной функции  $g_1(x)$  в области малых значений Бьёркеновской переменной  $x$ , но также упругое протон-протонное, протон-антипротонное рассеяние и дифракционное рождение векторных мезонов на нуклонах при больших передачах импульса. Обсуждается связь этой траектории со свойствами вакуума КХД и, в частности, с существованием глюонной аксиальной аномалии.

Совершенно новым полем исследования было изучение ин-

терференции слабых и сильных взаимодействий, возникающей за счёт сложной структуры вакуума КХД. Так оказалось, что специфические правила отбора по спиральности и аромату для кварк-кварковых взаимодействий, индуцируемых инстантонами и обменами электрослабыми векторными бозонами, позволяют понять природу правила  $\Delta I = 1/2$  для нелептонных адронных распадов.

Результатом исследований явилось не только более глубокое понимание роли непертурбативных эффектов в физике адронов, но и конкретные расчёты этих эффектов для многих действующих и планируемых экспериментов: ZEUS, H1, NA48, KTeV, WA102, HERMES, RHIC, COSY, Jlab, COMPASS и ряда других.

#### На защиту выдвигаются следующие основные результаты:

1. Впервые показана доминирующая роль непертурбативных взаимодействий кварков через инстантонные флуктуации в спин-спиновые расщепления между адронными  $SU(3)_f$  мультиплетами.
2. Дано объяснение малости доли спиральности протона, переносимой его кварками. Показано, что специфическая спин-ароматная зависимость инстантонного взаимодействия приводит к большому нарушению спиновой и ароматной симметрии кваркового моря в нуклоне.
3. Предложен новый механизм односпиновых асимметрий в сильных взаимодействиях, базирующийся на возникновении мнимых частей в амплитудах кварк-кваркового рассеяния, индуцируемых инстантонами.
4. Впервые с помощью операторного разложения вычислены

вклады твиста-2 и твиста-3 в нуклонные спин-зависимые электрослабые структурные функции глубокоупругого рассеяния. Получены новые правила сумм для этих функций.

5. Введена аномальная траектория Редже с интерсептом близким к единице и ненатуральной чётностью и показана её важность в процессах адрон-адронного, фотон-адронного и лептон-адронного рассеяния при высоких энергиях и больших передачах. С помощью этой траектории установлена связь между аномальным поведением спин-зависимой функции нуклона  $g_1(x, Q^2)$  и дифракционными процессами при высоких энергиях и больших передачах импульса.

6. Впервые вычислен вклад обмена глюонным духовым полюсом, связанным с аксиальной аномалией, в сечения упругого фото- и электророжения  $\phi$  мезонов на протоне при низких энергиях и показана необходимость учёта непертурбативных эффектов в эксклюзивных процессах с большими передачами импульса.

7. Предложен новый механизм усиления слабых распадов адронов, возникающий за счёт непертурбативного вклада инстантонов. Этот механизм приводит к специфическому виду интерференции слабых и сильных взаимодействий, чрезвычайно чувствительному к квантовым числам начальных и конечных адронных состояний.

#### Апробация работы.

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах ОИЯИ, ИТЭФ, Института Математики им. С.Л. Соболева СО РАН, НИИЯФ МГУ, С.Петербургского ИЯФ, ЦЕРН, ДЕЗИ, Центра теоретической физики для стран Тихого Океана в Сеуле, Центра теоретической физики Сеульского Национального университета, университета им. Гумбольда в Берлине, университета г. Валенсии, университетов Пизы и Торино, Токий-

ского технологического института, Токийского университета, университетов г. Кобе и г. Хиросимы, а также на международных конференциях: "SPIN90", Бонн, 1990; "Adriatico Research Conference on Polarized Dynamics in Nuclear and Particle Physics", Триест, 1992; "16th Workshop on High Energy Physics", Протвино, 1993; "6th International Symposium on Meson-Nucleon Physics and Structure of the Nucleon", Блаубейген, 1995; "Workshop Deep-inelastic scattering and related phenomena", Рим, 1996; "Workshop on Future Physics at HERA", Гамбург, 1996; "SPIN96", Амстердам, 1996; "XIII International Seminar on High Energy Physics Problems", Дубна, 1996; "5th International Workshop on Deep Inelastic Scattering and QCD", Чикаго, 1997; "SPIN98", Протвино, 1998; "Workshop on Physics with Polarized Protons at HERA", Гамбург, 1997; "Workshop on Polarized Protons at High Energies - Accelerator Challenges and Physics Opportunities", Гамбург, 1999, "International Workshop on Deep Inelastic Scattering and QCD", Краков, 2002.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 31 работа.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 8 глав и заключения. Она содержит 163 страницы машинописного текста, 39 рисунков и 4 таблицы, расположенные в тексте. Список литературы включает 278 наименований.

## Содержание диссертации

**Во введение** содержится обзор литературы, посвященный непертурбативным методам вычислений в квантовой хромодинамике. Обсуждаются современные проблемы, связанные с необходимостью учёта сложной структуры вакуума КХД в адронной физике, и определяется основная задача диссертации.

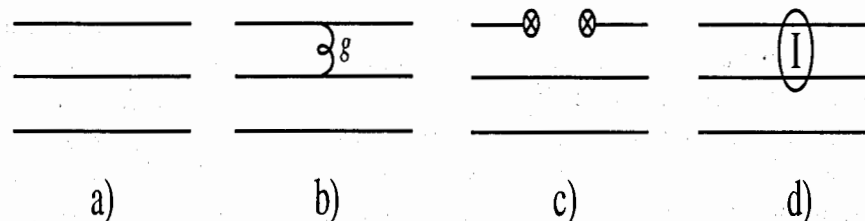
**В первой главе** рассмотрены эффекты вакуума КХД в спектроскопии адронов. Обсуждается новая версия модели кварковых мешков, в которой масса адрона определяется формулой:

$$M^2 = E^2 - \langle p^2 \rangle,$$

где  $E$ -есть энергия мешка,  $\langle p^2 \rangle$ -вклад движения центра масс. В нашей версии модели энергия мешка

$$E = E_{kin} + E_G + E_{long} + E_{inst}$$

состоит из кинетической энергии кварков  $E_{kin} = \sum_i N_i \omega_i$ , где  $N_i$ - количество кварков сорта  $i$  в адроне, потенциала одноглюонного обмена,  $E_G$ , и энергии взаимодействия кварков с длинноволновыми,  $E_{long}$ , и коротковолновыми,  $E_{inst}$ , вакуумными флуктуациями (Рис.1). Отмечается коренное отличие новой версии



**Рис.1.** Вклады а) кинетической энергии, б) одноглюонного обмена, в) взаимодействия через кварковый конденсат и д) инстантонов в энергию адрона. Инстантон обозначен как  $I$ , кресты обозначают кварковые концы, связанные через кварковый конденсат.

модели мешков от популярной MIT модели. Так стабилизация мешка достигается не за счёт, так называемого, объемного члена  $BR^3$ , который был введен фактически "руками" в модель мешков, а за счет вклада взаимодействия кварков с длин-

новолновой частью вакуумных флуктуаций, а именно с кварковым конденсатом. Этот вклад вычисляется с помощью эффективного гамильтониана, который получается из гамильтониана КХД с помощью разбиения кварковых и глюонных полей на квантовую ( $q(x), b(x)$ ) и классическую ( $Q(x), B(x)$ ) части:

$$\Psi(x) = q(x) + Q(x), \quad A_\mu^a(x) = b_\mu^a(x) + B_\mu^a(x).$$

Вклад коротковолновой части вакуумных флуктуаций в массы адронов учитывается с помощью кварк-кварковых взаимодействий т'Хоофта  $\mathcal{L}_{inst}$ , индуцированных инстантонами, в спин-спиновое расщепление масс между адронными мультиплетами

$$E_{inst} = - \langle h | \int \mathcal{L}_{inst} d^3x | h \rangle .$$

Показано, что этот вклад большой и доминирует над вкладом пертурбативного одноглюонного обмена. Исследована зависимость инстантонного вклада от кварковых ароматов и обсуждается природа нарушения правила Окубо-Цвейга-Иизуки. Подробно рассмотрено шести-кварковое состояние  $N$ -дибарион с квантовыми числами  $J^{PC} = 0^{++}$ , изотопическим спином  $I = 0$  и странностью  $S = -2$ . Вычислен вклад инстантонов в массу  $N$ -дибариона и анализируется возможность объяснения существования космических лучей с ультравысокими энергиями как одним из проявлений глубоко связанного, за счёт инстантонов,  $N$ -дибариона.

Во второй главе обсуждается спиновая и ароматная структура нуклона и аномальные односпиновые асимметрии в адрон-адронных взаимодействиях. В рамках модели вакуума КХД как жидкости инстантонов получена оценка деполяризации кварков, индуцируемой непертурбативными флуктуациями глюонных полей. Вычислены вклады инстантонов в спин-зависимую структурную функцию  $g_1^q(x, Q^2)$  на кварковом уровне, возникающие из диаграмм изображённых на Рис.2 и Рис.3. Вклад в

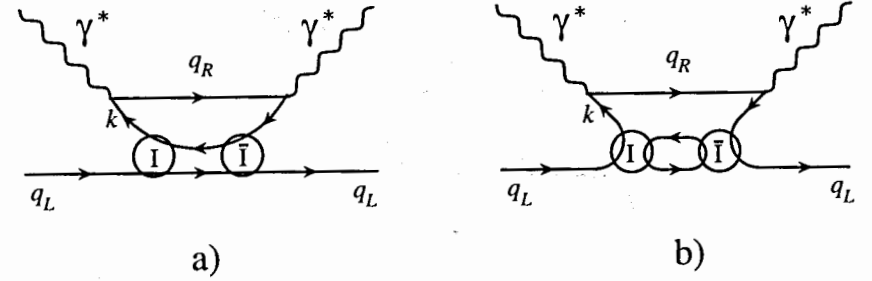


Рис.2. Инстантонный вклад в кварковую структурную функцию  $g_1^q$ , возникающий за счёт кварк-кваркового взаимодействия.

протонную спин-зависимую структурную функцию  $g_1(x)$  был получен с помощью конволюционной формулы

$$g_1^p(x) = \sum_q \int_x^1 \frac{dy}{y} g_1^q\left(\frac{x}{y}\right) \Delta q_V(y),$$

где  $\Delta q_V(y)$  есть начальные поляризации валентных кварков, которые взяты в форме, соответствующей правильным асимптотикам при малых и больших значениях  $x$  ожидаемым из Редже теории и правил кваркового счёта, и нормированы на экспериментальные значения констант слабых распадов гиперонов. Общий вклад от обоих взаимодействий в первый момент  $g_1^p$  равен

$$\delta I_{inst}^{p,q} = \int_0^1 dx g_1^{p,q}(x) = -0.026.$$

Эта величина объясняет наблюдаемое нарушение правила сумм Эллиса-Джаффе для интеграла от структурной функции  $g_1(x)$ . В рамках инстантонного подхода анализируется причина сильного нарушения ароматной симметрии кваркового моря в протоне. Показано, что принцип Паули для кварков, находящихся в поле инстантона, приводит к преобладанию  $\bar{d}$  кварков в про-

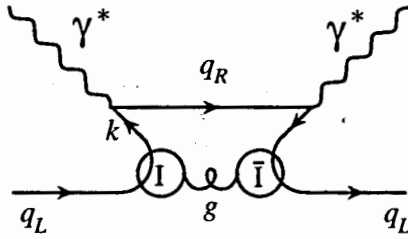


Рис.3. Инстантонный вклад в кварковую структурную функцию  $g_1^q$  от кварк-глюонного взаимодействия, индуцируемого инстантонами.

тоне. Получена оценка нарушения ароматной симметрии неполяризованного  $\bar{d} \approx 2\bar{u}$  и поляризованного моря  $\Delta\bar{u} \approx -4\Delta\bar{d}$ , возникающая за счёт инстантонов.

Рассмотрен новый механизм для односпиновых асимметрий в сильных взаимодействиях. Фундаментальная причина асимметрии лежит в возникновении больших мнимых частей в определённом классе кварк-кварковых амплитуд, где кварк может иметь времениподобную виртуальность. Эта мнимая часть возникает в результате аналитического продолжения инстантонной амплитуды из пространства Евклида, где инстантоны определены, в физическое пространство Минковского.

**В третьей главе** спин-зависимые электрослабые структурные функции исследуются в рамках операторного разложения. В начале главы даётся определение спин-зависимых структурных функций нуклона в Стандартной Модели. Так, спин-зависимая часть адронного тензора, описывающего глубоко-неупругое поляризованное лептон-нуклонное рассеяние с учётом нарушения чётности, зависит в общем случае от пяти структурных

функций  $g_i$

$$\begin{aligned}
 W_{\mu\nu}(q, P, S) = & i\varepsilon_{\mu\nu\lambda\sigma} \frac{q^\lambda S^\sigma}{P \cdot q} g_1(x, Q^2) \\
 & + i\varepsilon_{\mu\nu\lambda\sigma} \frac{q^\lambda (P \cdot q S^\sigma - S \cdot q P^\sigma)}{(P \cdot q)^2} g_2(x, Q^2) \\
 & + \left[ \frac{\hat{P}_\mu \hat{S}_\nu + \hat{S}_\mu \hat{P}_\nu}{2} - S \cdot q \frac{\hat{P}_\mu \hat{P}_\nu}{(P \cdot q)} \right] \frac{g_3(x, Q^2)}{P \cdot q} \\
 & + S \cdot q \frac{\hat{P}_\mu \hat{P}_\nu}{(P \cdot q)^2} g_4(x, Q^2) \\
 & + \left( -g_{\mu\nu} + \frac{q_\mu q_\nu}{q^2} \right) \frac{(S \cdot q)}{P \cdot q} g_5(x, Q^2),
 \end{aligned}$$

с

$$\hat{P}_\mu = P_\mu - \frac{P \cdot q}{q^2} q_\mu, \quad \hat{S}_\mu = S_\mu - \frac{S \cdot q}{q^2} q_\mu,$$

где  $q$  и  $P$ - импульсы калибровочного бозона и нуклона, соответственно, а  $S$  есть нуклонный спин. Затем приведены дисперсионные соотношения для комптоновской амплитуды рассеяния вперёд, мнимая часть которой пропорциональна адронному тензору. Далее производится стандартное операторное разложение Т-произведения двух токов, определяющее эту амплитуду, в нижайшем порядке КХД. В результате получают определённые соотношения между моментами структурных функций и матричными элементами кварк-глюонных операторов твиста-2 и твиста-3 между нуклонными состояниями.

На основе этих соотношений получено новое фундаментальное правило сумм

$$g_3^i(x, Q^2) = 4x \int_x^1 \frac{dy}{y^2} g_5^i(y, Q^2),$$

а также ряд дополнительных правил сумм для твист-2 и твист-3 спин-зависимых структурных функций. В конце главы полу-



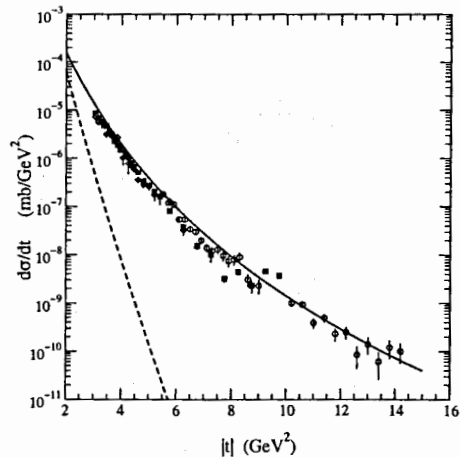


Рис.4. Вклад  $f_1$ -траектории в дифференциальное сечение упругого протон-протонного рассеяния при высоких энергиях и больших передачах импульса. Сплошная линия есть  $f_1$  вклад, штриховая представляет вклад померона, при  $\sqrt{s} = 27.4$  GeV.

ченные правила сумм рассмотрены в рамках различных партонных моделей и определена степень корректности этих моделей.

В четвёртой главе обсуждается связь поведения спин-зависимой структурной функции  $g_1(x, Q^2)$  при малых значениях Бёркенховской переменной  $x$  и сечений дифракционных процессов при высоких энергиях и больших передачах импульса. Такая связь возникает естественным образом, если предположить существование новой траектории Редже с высоким интерсептом и ненатуральной чётностью. Обсуждается возможная непертурбативная причина возникновения данной траектории, основанная на существовании аксиальной аномалии в КХД. Исходя из анализа спин-зависимой функции нуклона  $g_1$  определены параметры новой траектории и её константы взаимодействия с нуклоном.

Вычислен вклад этой траектории в упругое протон-протонное рассеяние при высокой энергии и большой передаче им-

пульса  $-t > 3\text{GeV}^2$  и показано согласие с существующими экспериментальными данными (Рис.4). Обсуждаются преимущества данного подхода по сравнению с широко распространённым подходом, основанном на обмене оддероном.

Вычислен вклад  $f_1$ -обмена в сечения образования  $\rho$  и  $\phi$  мезонов в дифракционных фотон-протонных процессах при высокой энергии. Результаты находятся в согласии с недавними экспериментальными данными, полученными на коллайдере HERA в Германии.

В пятой главе обсуждаются эксперименты и проводятся расчёты сечений реакций, которые чувствительны к существованию новой аномальной  $f_1$  траектории. Так структура  $f_1$  траектории может быть исследована в процессах, для которых важна спиновая зависимость соответствующих вершин, т.е. в различных спин-зависимых асимметриях. Это связано с тем, что  $f_1$ -обмен обладает ненатуральной чётностью и поэтому чувствителен к спинам взаимодействующих частиц, в то время как померонная траектория с натуральной чётностью определяет спин-независимые вклады в амплитуды процессов с участием адронов. Поэтому можно ожидать, что вклад данной траектории может быть выделен с помощью измерения зависящих от спина наблюдаемых в адрон-адронных, лептон-адронных и фотон-адронных взаимодействиях. В случае чистого померонного обмена эти асимметрии практически не отличаются от нуля.

В начале главы вычислен вклад  $f_1$  обмена в двух-спиновую продольную асимметрию в упругом  $pp$ -рассеянии. Показано, что величина асимметрии достигает значений  $A_{LL} \approx -40\%$  и может быть измерена на ускорителе RHIC BROOKHAVEN. Из анализа экспериментальных данных по разнице полных сечений взаимодействия продольно-поляризованных протонов в различных спиновых состояниях,  $\Delta\sigma_L$ , получена оценка интерсепта но-

вой траектории

$$\alpha_{f_1}(0) = 0.99 \pm 0.04.$$

Далее обсуждаются спиновые эффекты в процессах упругого фоторождения векторных мезонов при высоких энергиях в экспериментах с поляризованными фотонами и измерением поляризационного состояния конечного мезона. Матрица плотности, характеризующая угловые распределения в распаде векторного мезона, вычислена здесь с учетом померонного и  $f_1$ -обменов. Асимметрия в таких распадах оказывается очень полезным средством при выделении вклада  $f_1$ -обмена, поскольку имеет сильную зависимость от квантовых чисел, которые для указанных обменных механизмов различны.

В последнем параграфе главы обсуждается новый механизм для объяснения большой двухспиновой асимметрии, наблюдаемой в электромагнитном рождении  $\rho$ -мезонов на нуклоне при промежуточной энергии, измеренной на установке HERMES.

Этот механизм связан с большим вкладом интерференции новой  $f_1$  аномальной траектории с  $f_2$  Редже обменом в двухспиновую асимметрию. Вычисленная величина для полной асимметрии  $A_1 \approx 10 - 15\%$  оказалась сравнимой с измеренной.

Таким образом  $f_1$  аномальный обмен важен не только при высоких, но также и при умеренных энергиях.

**В шестой главе** рассмотрены непертурбативные эффекты КХД в некоторых эксклюзивных процессах при низких энергиях и большой передаче импульса. А именно, рассчитаны вклады в сечения определённых реакций, возникающие за счёт обмена глюонным духовым полюсом, введённым Венециано для решения  $U(1)_A$  проблемы в сильных взаимодействиях. Этот полюс возникает как следствие периодичности потенциальной энергии КХД относительно величины топологического заряда и существованием подбарьерных переходов между различными классическими вакуумами, вызванных инстантонами. Существование

данного полюса, связанного с глюонной аксиальной аномалией, является не только принципиальным моментом решения одной из основных проблем адронной спектроскопии, большой массы  $\eta'$  мезона, но также приводит к естественному объяснению наблюдаемой малости аксиально-векторного синглетного по аромату форм фактору нуклона. В процессах с участием адронов эффекты глюонного полюса описывают нарушение правила Окубо-Цвейга-Иизуки.

В качестве примера вычислен вклад обмена данным полюсом в процессы упругого фото- и электророждения  $\phi$  мезонов на нуклоне при низких энергиях. На основе обобщенного соотношения Гольдбергера-Треймана для аксиальной константы  $g_A^0$

$$2M_N G_A^0 = F g_{\eta' NN} + 2N_f A g_{GNN},$$

и уравнения, определяющего ширину распада  $\phi \rightarrow \eta' \gamma$

$$F g_{\eta' \gamma \phi} + 2N_f A g_{G\gamma\phi} = -C_\phi \sqrt{\frac{\alpha_{em}}{\pi^3}},$$

где  $F \approx \sqrt{2N_f} f_\pi$ , пропагатор глюонного обмена  $A$  равен топологической восприимчивости в чистой Янг-Миллсовской теории,  $\chi(0)|_{YM}$ , величина  $g_{\eta' \gamma \phi}$  может быть извлечена из экспериментальной ширины  $\Gamma_{\phi \rightarrow \eta' \gamma}$ ,  $C_\phi$  есть константа взаимодействия  $\phi$ -мезона с  $s$ -кварками, получены оценки констант связи этого полюса с нуклоном,  $g_{GNN}$ , фотоном и  $\phi$ - мезоном,  $g_{G\gamma\phi}$ , в различных кварковых моделях.

С помощью этих констант вычислены вклады глюонного полюса  $U(1)_A$  проблемы в упругое фото- и электророждение  $\phi$  мезона на протоне при энергиях в несколько GeV. Результаты расчётов позволяют объяснить недавние экспериментальные данные, полученные на установке CLAS в JLAB.

**В седьмой главе** представлены результаты исследования влияния сложной структуры вакуума КХД на процессы рождения мезонов при низких и высоких энергиях. В начале главы об-

суждаются аномалии в сечениях околопорогового рождения частиц, содержащих странные кварки. Наблюдаемое большое нарушение правила Окубо-Цвейга-Иизуки у порога противоречит большинству теоретических предсказаний, относящихся к динамике рождения странных кварков в сильных взаимодействиях. Одна из таких аномалий связана со значительной величиной сечения рождения  $\eta$ -мезонов в протон-нейтронных столкновениях у порога, где оно почти в семь раз больше, чем сечение рождения  $\eta$ -мезонов в протон-протонных столкновениях при тех же кинематических условиях. Приведены качественные аргументы в пользу того, что специфическая ароматная структура кварк-глюонного взаимодействия, индуцируемого инстантонами,

$$\Delta L_{\eta} = - \int \mathcal{L}_{t'Hooft} \frac{\pi^3 \rho^4 d\rho}{8\alpha_s(\rho)} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_{\mu\nu}^a,$$

где  $\mathcal{L}_{t'Hooft}$  - взаимодействие т'Хоофта, приводит к усилению выхода  $\eta$ -мезонов именно в протон-нейтронных взаимодействиях. Вычислен вклад инстантонов, возникающий за счёт ненулевого матричного элемента

$$\langle 0 | \frac{3\alpha_s}{4\pi} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_{\mu\nu}^a | \eta \rangle \approx \sqrt{3} f_{\pi} m_{\eta}^2,$$

в околопороговое рождение  $\eta$ -мезонов в протон-нейтронном взаимодействии. Результаты расчета находятся в согласии с экспериментальными данными, полученными коллаборацией WASA/PROMICE.

В последнем параграфе главы рассмотрены процессы рождения мезонов в двойных дифракционных процессах (ДДП). Эти процессы интересны как с точки зрения адронной спектроскопии, т.е. как источник глюоболов и другой кварк-глюонной экзотики, так и с точки зрения понимания механизмов дифракционных процессов при высоких энергиях, где доминирует обмен с вакуумными квантовыми числами, т.е. померон.

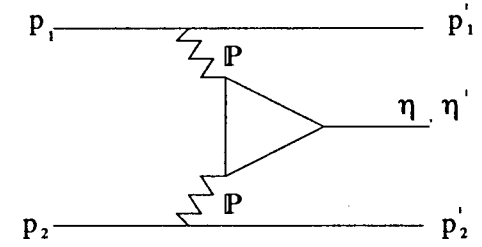


Рис.5. Вклад двойного померонного обмена в процесс центрального рождения псевдоскалярных мезонов.

Одними из наиболее удобных реакций для исследования непертурбативной природы померона и его связи со сложной структурой вакуума КХД, являются процессы центрального рождения  $\eta$  и  $\eta'$  мезонов при высоких энергиях. Распространённое мнение заключается в том, что основной вклад в ДДП дает двойной померонный обмен (Рис.5). В диссертации вычисляется вклад этого механизма в сечения рождения  $\eta$  и  $\eta'$  мезонов для кинематики WA102 эксперимента в ЦЕРНе. Показано, что двойной померонный обмен приемлемо описывает данные WA102 только в случае рождения  $\eta'$  мезонов, в то время как для  $\eta$  мезонов результаты расчёта дают значительно меньшие сечения. Указан источник расхождения. Им является вклад обмена вторичными Реджеонами в ДДП. Получена оценка этого вклада и показано, что его учёт позволяет значительно улучшить согласие с экспериментом для выхода  $\eta$  мезонов в ДДП.

**В восьмой главе** исследован вклад инстантонов в слабые распады адронов. Интерес к вопросам интерференции сильных и слабых взаимодействий и роли вакуума КХД в ней заметно вырос после того, как недавние эксперименты обнаружили большое CP нарушение в распадах  $K \rightarrow \pi\pi$ . Этот эффект довольно трудно объяснить в рамках Стандартной Модели. Одним из краеугольных камней этой проблемы является известное пра-

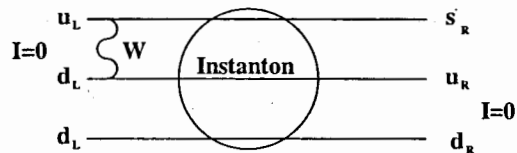


Рис.6. Вклад шести-кваркового взаимодействия, индуцированного инстантонами, в  $\Delta I = 1/2$  слабую амплитуду.

вило  $\Delta I = 1/2$ . Это феноменологическое правило связано с наблюдаемым сильным усилением слабых распадов с изменением изотопического спина на величину  $\Delta I = 1/2$  по отношению к распадам с  $\Delta I = 3/2$ .

Предлагается новый непертурбативный механизм правила  $\Delta I = 1/2$ , основанный на том, что непертурбативное мультикварковое взаимодействие т'Хоофта, индуцируемое инстантонами, также как и слабое взаимодействие, чрезвычайно чувствительно к ароматам и спиральностям кварков. Так принцип Паули для кварков в нулевых модах в поле инстантона означает, что взаимодействие должно быть антисимметрично относительно перестановок любых входящих и выходящих кварков. Именно это свойство приводит к тому, что одноинстантонный вклад присутствует в слабой  $\Delta I = 1/2$  амплитуде и отсутствует в  $\Delta I = 3/2$  амплитуде (Рис.6). Делается важное наблюдение, что дополнительный член в слабом Гамильтониане с  $\Delta S = 1$ , возникающий из шести-кваркового взаимодействия (Рис.6), соответствует вкладу оператора размерности  $d = 9$ , который ранее не учитывался в расчётах слабых распадов адронов. Подробно вычисляется вклад этого взаимодействия в распад  $K \rightarrow \pi\pi$  и показывается возможность непертурбативного объяснения правила  $\Delta I = 1/2$  для этого распада.

В заключении дана сводка основных результатов, полученных в диссертации, указаны приложения этих результатов и намечены ближайшие перспективы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. N.I. Kochelev and V. Vento, Gluonic effects in vector meson photoproduction at large momentum transfers, Phys. Lett. **B541** (2002) 281.
2. N.I. Kochelev, D.-P. Min, V. Vento, and A.V. Vinnikov, A mechanism for the Double-Spin Asymmetry in Electromagnetic  $\rho$  Production at HERMES, Phys. Rev. **D65** (2002) 097504, Brief Report.
3. N.I. Kochelev and V. Vento, Evidence for the flavor singlet axial anomaly related effects in  $\phi$  meson electromagnetic production at large momentum transfers, Phys. Lett. **B515** (2001) 375.
4. N.I. Kochelev and V. Vento, Instantons and  $\Delta I = 1/2$  rule, Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 11601.
5. N.I. Kochelev, D.-P. Min, Y. Oh, V. Vento, A.V. Vinnikov, A new anomalous trajectory in Regge phenomenology and hard diffraction, Nucl. Phys. **B99** (Proc. Suppl.) (2001) 24.

6. N.I. Kochelev, T. Morii, B.L. Reznik, A.V. Vinnikov,  
The role of secondary Reggions in central meson production,  
Eur. Phys. J. **A8** (2000) 405.
7. Y. Oh, N.I. Kochelev, D.-P. Min, V. Vento, A.V. Vinnikov,  
Anomalous  $f_1$  exchange in vector meson photoproduction asymmetries,  
Phys. Rev. **D62** (2000) 017504.
8. N.I. Kochelev,  
A New Mechanism for Single Spin Asymmetries in Strong Interaction,  
Письма в ЖЭТФ **72** (2000) 691.
9. N.I. Kochelev, D.-P. Min, Y. Oh, V. Vento, A.V. Vinnikov,  
A new anomalous trajectory in Regge theory,  
Phys. Rev. **D61** (2000) 694008.
10. S. Oyama, T. Morii and N.I. Kochelev,  
Diffractive  $\Lambda_c^+$  production in polarized pp reactions and polarized gluon distribution,  
Phys. Rev. **D62** (2000) 057502.
11. N.I. Kochelev, V. Vento and A.V. Vinnikov,  
Instantons and  $\eta$  meson production near threshold in NN collisions,  
Phys. Lett. **B472** (2000) 247.
12. N.I. Kochelev,  
Ultra-high energy cosmic rays and stable H-dibaryon,  
Письма в ЖЭТФ, **70** (1999) 483.
13. N.I. Kochelev, T. Morii, V. Vinnikov,  
Pomeron fusion and central  $\eta$  and  $\eta'$  production,  
Phys. Lett. **B457** (1999) 202.

14. N.I. Kochelev,  
Anomalous quark chromomagnetic moment induced by instantons,  
Phys. Lett. **B426** (1998) 149.
15. N.I. Kochelev,  
Instantons and polarized structure functions.  
Phys. Rev. **D57** (1998) 5539.
16. A.E. Dorokhov, S.V. Esaibegyan, N.I. Kochelev, N.G. Stefanis,  
Multiinstantons effects in QCD sum rules for the pion,  
J. Phys. **G23** (1997) 643.
17. N.I. Kochelev, T. Morii and T. Yamanishi,  
Semiinclusive  $\Lambda_c^+$  lepton productions and polarized gluon distribution,  
Phys. Lett. **B405** (1997) 168.
18. J. Blumlein, N.I. Kochelev,  
On the twist-2 and twist-3 contributions to the spin dependent electroweak structure functions,  
Nucl. Phys. **B498** 1997 285.
19. J. Blumlein, N. Kochelev,  
On the twist-2 contributions to polarized structure functions and new sum rules,  
Phys. Lett. **B381** (1996) 296.
20. А.Е. Дорохов, Н.И. Кочелев,  
Инстантоны и функции распределения кварков в нуклоне,  
ЭЧАЯ **26** (1995) 5.
21. N.I. Kochelev,  
Charge symmetry breaking in the pion-nucleon coupling constants and the proton spin problem,  
Phys. Lett. **B301** (1993) 272.

22. A.E. Dorokhov, N.I. Kochelev,  
Instanton-induced asymmetric quark configurations in the nucleon and parton sum rules,  
Phys. Lett. **B304** (1993) 167.
23. A.E. Dorokhov, N.I. Kochelev, Yu.A. Zubov,  
Proton spin within nonperturbative QCD,  
Inter. Jour. of Mod. Phys. **A8** (1993) 603.
24. А.Е. Дорохов, Н.И. Кочелев, Ю.А. Зубов,  
Проявление структуры вакуума КХД в составных кварковых моделях,  
ЭЧАЯ **23** (1993) 1193.
25. A.E. Dorokhov, N.I. Kochelev,  
Spin-dependent structure functions of sea quarks in the framework of nonperturbative QCD and a new Regge trajectory,  
Phys.Lett. **B259** (1991) 335.
26. A.E. Dorokhov, N.I. Kochelev,  
Spin crisis and nonperturbative QCD dynamics,  
Phys. Lett. **B245** (1990) 609.
27. A.E. Dorokhov, N.I. Kochelev,  
On contribution of instantons to nucleon sum rules,  
Z. Phys. **C46** (1990) 281.
28. А.Е. Дорохов, Н.И. Кочелев,  
Кварковая модель с кварковым взаимодействием через КХД вакуум,  
Яд. Физ. **52** (1990) 135.
29. A.E.Dorokhov, N.I.Kochelev Instantons and EMC effect for spin dependent function  $g_1^p(x)$ ,  
Mod.Phys.Lett. **A5** (1990) 55.
30. Н.И. Кочелев,  
Роль инстантонов в адронной спектроскопии,  
Яд. Физ. **41** (1985) 291.
31. Н.И. Кочелев,  
Псевдоскалярные мезоны в киральной модели мешков,  
Яд. Физ. **39** (1984) 729.

Получено 10 января 2003 г.