

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

КОРЧАГИН
Николай Сергеевич

ЭФФЕКТЫ АНОМАЛЬНОГО ХРОМОМАГНИТНОГО
МОМЕНТА КВАРКА В НЕКОТОРЫХ РЕАКЦИЯХ
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна-2014

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Н.И.Кочелев

Официальные оппоненты:

С.П. Баранов, доктор физико-математических наук,
ФИАН (г.Москва), ведущий научный сотрудник

С.М. Трошин, доктор физико-математических наук,
ГНЦ ИФВЭ (г.Протвино), главный научный сотрудник

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
г.Москва.

Защита диссертации состоится 21 мая 2014 г. в _____ на заседании
диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической
физики им. Н.Н.Боголюбова Объединённого института ядерных ис-
следований по адресу ул. Жолио-Кюри 6, г.Дубна, Московской обла-
сти.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Объ-
единённого института ядерных исследований.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2014 г.

Учёный секретарь совета

А.Б. Арбузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современная микроскопическая теория сильных взаимодействий – квантовая хромодинамика (КХД) – имеет множество достижений в описании явлений, происходящих на малых расстояниях, что соответствует большим переданным импульсам. В таких режимах, благодаря явлению асимптотической свободы, константа связи сильного взаимодействия α_s мала, что позволяет применить теорию возмущений. Но при малых переданных импульсах такой подход неприменим из-за роста константы связи, которая становится порядка единицы при $Q^2 \sim 1 \text{ GeV}^2$. В ряде случаев возможна факторизация больших и малых расстояний (выделение жёстких подпроцессов), что позволяет проводить вычисления, согласующиеся с экспериментом. В таком подходе мягкие подпроцессы обычно не вычисляются, а заменяются экспериментальными данными.

Разработка подходов, позволяющих проводить вычисления вне рамок теории возмущений важнейший раздел теории сильных взаимодействий, т.к. большинство экспериментальных данных связаны как раз с физикой больших расстояний (процессы адронизации, фрагментации, дифракции и т.п.). Кроме того, теория возмущений не может учесть всех эффектов, характерных для неабелевых теорий с сильной связью.

Таким образом, для комплексного описания физики адронов необходимы существенно непертурбативные методы и подходы. Оказалось, что эффекты больших расстояний, такие как спонтанное нарушение киральной симметрии (динамическое появление большой конститuentной массы кварков) и конфайнмент (пленение цветовых зарядов в бесцветных адронах), тесным образом связаны со свойствами вакуума КХД.

Вакуум КХД имеет нетривиальную структуру и кардинальным образом отличается от вакуума в КЭД. Благодаря наличию сильной связи, вакуумное состояние перестраивается, возникают коллективные флуктуации полей, связанные с туннельными переходами между классическими вакуумами с разной топологической структурой. Инстантон – одна из хорошо изученных топологических флуктуаций вакуума глюонного поля. Он может быть ответственен за многие непертурбативные эффекты, наблюдаемые в физике частиц.

В случае глюонного поля, инстантон – это особый вид колебаний вакуума, при котором в нём спонтанно вспыхивает и гаснет сильное глю-

онное поле. Поле внутри инстантона имеет нетривиальную топологию, т. е. не может быть сведено к нулю непрерывной деформацией. Привлечение инстантонов для описания КХД вакуума позволят решить очень многие проблемы. Например, в модели инстантонной жидкости естественным образом появляется эффект спонтанного нарушения киральной симметрии.

Недавно в работах научного руководителя было показано, что нетривиальная топологическая структура вакуума КХД генерирует большой аномальный хромомангнитный момент у кварка (Anomalous Quark Chromomagnetic Moment – AQCM). Это приводит к появлению нового типа кварк-глюонного взаимодействия с переворотом спина.

Основная цель диссертации – исследовать влияние аномальной хромомангнитной кварк-глюонной вершины в трёх реакциях при высоких энергиях. А именно, определить, может ли существование этой вершины приводить к возникновению большой односпиновой асимметрии в кварк-кварковом рассеянии и, как следствие, к значительной асимметрии в инклюзивном рождении пионов. Рассмотреть, какую роль играет эта вершина в упругом pp и $pp\bar{p}$ рассеянии при больших передачах импульса, а так же изучить её вклад в сечение электророждения ρ -мезона.

Научная новизна и практическая ценность.

Впервые вычислена величина односпиновой асимметрии в кварк-кварковом рассеянии, возникающая за счёт аномального хромомангнитного момента кварка. Показано, что предложенный механизм, может быть ответственен за необычайно большие спиновые асимметрии наблюдаемые в реакциях с участием адронов.

Впервые вычислен вклад AQCM в структуру Оддеронного обмена в упругом pp и $pp\bar{p}$ рассеянии. Сделаны предсказания для некоторых свойств спиновой асимметрии в данных реакциях, которые можно проверить в экспериментах.

Впервые вычислен вклад аномального хромомангнитного момента кварка в электророждение ρ -мезона при различных поляризациях.

Результатом данного исследования стало не только более глубокое понимание роли непертурбативных эффектов в реакциях с адронами при высоких энергиях, но и конкретные расчёты этих эффектов для действующих и планируемых экспериментов.

На защиту выдвигаются следующие основные результаты:

1. Предложен новый подход к описанию спиновых эффектов в реакциях с участием адронов, основанный на существовании большого АКСМ, индуцированного сложной непертурбативной структурой вакуума КХД. В качестве примера показано, что АКСМ приводит к большой односпиновой асимметрии в рассеянии кварка на кварке.

2. Предложена новая модель Оддерона, $C = -1$ партнёра Померона, основанная на АКСМ, которая позволяет объяснить данные для упругих pp и $p\bar{p}$ сечений при больших передачах импульса и при высоких энергиях. Сделано предсказание об изменении знака спиновой асимметрии в $p\bar{p}$ рассеянии по сравнению с pp .

3. Вычислен вклад АКСМ в эксклюзивное электророждение ρ -мезона на протоне $\gamma^* + p \rightarrow \rho^0 + p$. Показано, что этот вклад существенен при малых Q^2 , как для продольной, так и для поперечной поляризации виртуального фотона.

Апробация работы.

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, а также на международных конференциях: Light-Cone 2012, Краков; DSPIN13, Дубна.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ, в том числе 3 в рецензируемых журналах из списка ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Она содержит 71 страницу машинописного текста и 27 рисунков. Список литературы включает 94 наименований.

Содержание диссертации

Во введении обсуждаются современные проблемы, связанные с необходимостью учёта сложной структуры вакуума КХД в адронной физике, и определяется основная задача диссертации.

В первой главе вводится обобщённая вершина кварк-глюонного взаимодействия, возникающая из-за инстантонных флуктуаций глюонного поля. Её явный вид

$$-g_s t^a U_\mu(k_1^2, k_2^2, q^2) = -g_s t^a [\gamma_\mu F_1(k_1^2, k_2^2, q^2) + \frac{\sigma_{\mu\nu} q_\nu}{2M_q} F_2(k_1^2, k_2^2, q^2)]. \quad (1)$$

где второй член связан с непертурбативной структурой вакуума КХД. Формфакторы $F_{1,2}$ описывают нелокальность взаимодействия. $k_{1,2}$ –

импульсы входящего и выходящего кварка, $q = k_2 - k_1$ – импульс глюона, M_q – динамическая масса кварка.

Величина непертурбативного вклада определяется значением аномального хромоманнитного момента кварка:

$$\mu_a = F_2(0, 0, 0). \quad (2)$$

В рамках модели вакуума КХД как инстантонной жидкости, АКСМ пропорционален инстантонной плотности. Используя предположение что все инстантоны имеют одинаковый средний размер ρ_c , для АКСМ получается выражение

$$\mu_a = -\frac{3\pi(M_q\rho_c)^2}{4\alpha_s(\rho_c)}. \quad (3)$$

Вторая глава посвящена изучению влияния АКСМ на спиновые эффекты в физике адронов. Вначале вводится понятие односпиновой асимметрии, и подробно объясняется ее физический смысл.

Затем идёт краткий обзор экспериментов по односпиновой асимметрии. Приводятся данные полученные коллаборацией E704 и коллаборациями на RHIC.

Дается краткий обзор основных существующих теоретических подходов, основанных на теореме о факторизации. Рассматривается механизм Сиверса и Коллинза.

Изучаются эффекты аномальной хромоманнитной кварк-глюонной вершины в рассеянии кварка на кварке. Вычисляется односпиновая асимметрия, возникающая в таком рассеянии. В итоге, для величины асимметрии в qq рассеянии получаем следующую формулу:

$$A_N = -\frac{5\alpha_s\mu_a q_t(q_t^2 + m_g^2)}{12\pi M_q} \frac{F_g(\rho|q_t|)N(q_t)}{D(q_t)}, \quad (4)$$

где

$$N(q_t) = \int d^2k_t \frac{(1 + \mu_a^2(k_t^2 - q_t \cdot k_t)F_g(\rho|k_t|)F_g(\rho|q_t - k_t|))/(2M_q^2)}{(k_t^2 + m_g^2)((k_t - q_t)^2 + m_g^2)}$$

$$D(q_t) = \left(1 + \left(\frac{\mu_a q_t}{2M_q} F_g(\rho|q_t|)\right)^2\right)^2 + \frac{\alpha_s^2(q_t^2 + m_g^2)^2}{12\pi^2} \left(\int \frac{d^2k_t}{(k_t^2 + m_g^2)((k_t - q_t)^2 + m_g^2)}\right)^2$$

q_t – поперечный импульс конечного кварка, F_g – формфактор появляющийся из АКСМ вершины, m_g может рассматриваться как динамическая масса глюона.

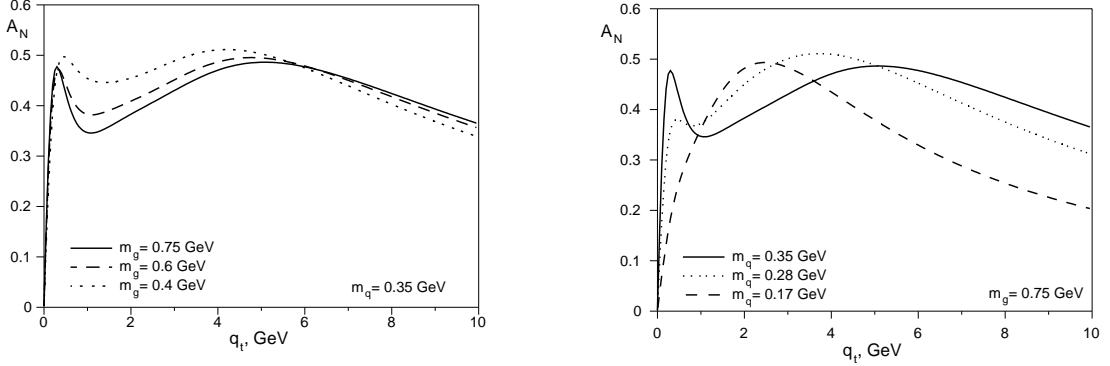


Рис. 1: Слева: зависимость односпиновой асимметрии от поперечного импульса q_t при различных значениях инфракрасного обрезания в глюонном пропагаторе. Справа: та же зависимость при различных значениях динамической массы кварка.

Результаты численного расчёта показаны на Рис.1. Анализируются свойства асимметрии возникающей за счёт АҚСМ. Оказывается что асимметрия слабо зависит от конкретного значения M_q и m_g , не зависит от энергии в с.ц.м. и имеет пологую зависимость от поперечного импульса конечной частицы. Так же, знак асимметрии определяется знаком АҚСМ, поэтому в такая модель имеет предсказательную силу для знака асимметрии в различных процесса.

Далее делаются оценки для асимметрии, возникающей за счёт предложенного механизма в инклюзивном рождении пионов в pp соударениях. Они показывают, что

$$A_N^{\pi^+}(q_t) \approx 0.383A_N^q(q_t), \quad A_N^{\pi^-}(q_t) \approx -0.327A_N^q(q_t), \quad A_N^{\pi^0}(q_t) \approx 0.146A_N^q(q_t),$$

Данная величина асимметрии находится в качественном согласии с экспериментальными данными.

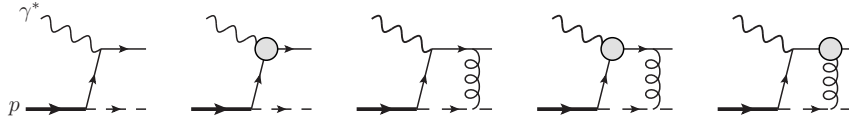


Рис. 2: Лидирующий вклад в односпиновую асимметрию в SIDIS.

Затем кратко обсуждается роль АҚСМ в лептон-адронных реакциях. Предлагается возможный механизм возникновения односпиновых асимметрий в полуинклюзивных лептон-адронных процессах (SIDIS), Рис.2. Отмечается, что возникновение асимметрии в SIDIS и в инклюзивном

рождении отличаются, потому что в SIDIS так же играет роль аномальный магнитный момент кварка, индуцированный инстантонами.

Третья глава посвящена изучению влияния АQСМ на упругое pp и $p\bar{p}$ рассеяние. Предлагается новая модель Оддерона, основанная на вкладе АQСМ в трёх-глюонный обмен.

Приводятся результаты численного расчёта. Показано, что вклад АQСМ доминирует в доступной для экспериментов области и позволяет описать упругие pp и $p\bar{p}$ сечения, Рис.3

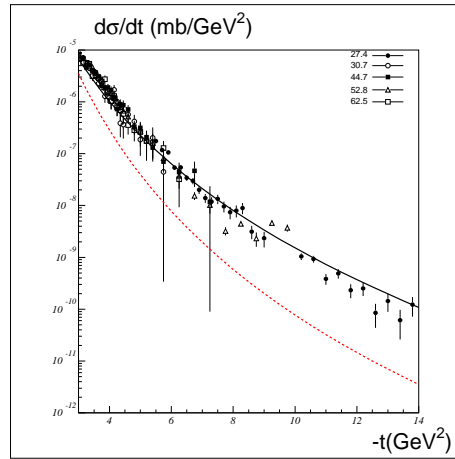


Рис. 3: Вклад pQCD обмена (пунктирная линия) и вклад АQСМ (сплошная линия) в упругое pp и $p\bar{p}$ рассеяние при больших энергиях и передачах в сравнении с экспериментальными данными.

Обсуждается влияние АQСМ на односпиновые асимметрии в упругом pp и $p\bar{p}$ рассеянии. Показывается что знак асимметрии в $p\bar{p}$ должен быть противоположен знаку в pp .

В четвёртой главе описывается вычисление сечения дифракционного электророждения ρ -мезона с учётом АQСМ.

В начале сделано краткое введение в дифракционные процессы.

Вводится волновая функция ρ -мезона и описывается процедура нормировки волновой функции мезона.

Далее подробно описываются процедура вычисления сечения рождения ρ -мезона. Записывается выражение для амплитуд показанных на Рис.4, определяется функция глюонной плотности. Подробно показана процедура вычисления мнимой части амплитуды.

Затем кратко описывается техника спиральных амплитуд, применяемая для вычисления трэйса по спиновым индексам. Используя эту технику, показан расчёт амплитуд при различной поляризации виртуального фотона. Приводятся выражения для амплитуд.

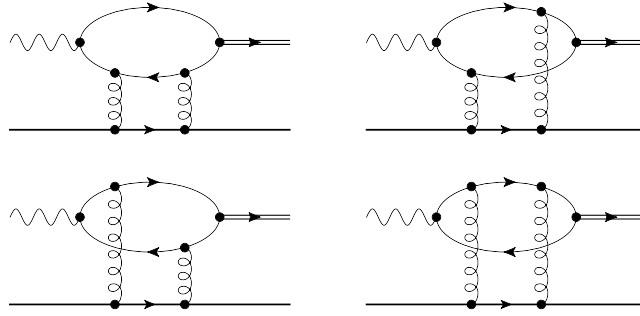


Рис. 4: Четыре диаграммы, дающие основной вклад в дифракционное рождение ρ -мезона.

Даются численные результаты расчёта сечений электророждения ρ -мезона с учётом вклада АКСМ при различной поляризации виртуального фотона (Рис.5). Результаты сравниваются с данными экспериментов. Обсуждаются полученные результаты.

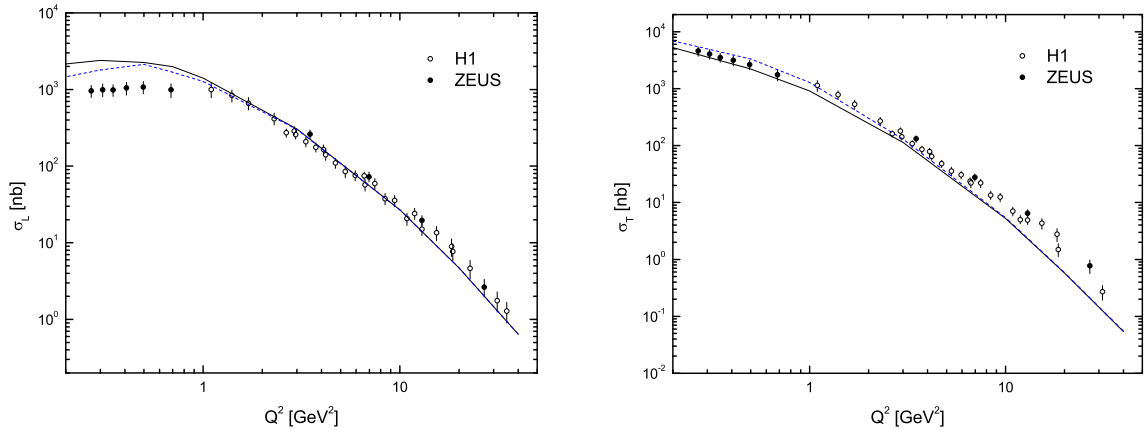


Рис. 5: Сечение σ_L и σ_T реакции $\gamma^*p \rightarrow \rho p$ как функция от Q^2 при энергии столкновения $W = 75$ GeV. Штрихованной линией показан результат расчёта только с пертурбативным взаимодействием. Сплошной линией показан результат с учётом непертурбативных вкладов.

В заключении дана сводка основных результатов, полученных в диссертации, и намечены планы дальнейших исследований.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. N. Korchagin, N. Kochelev, N. Nikolaev,

- Anomalous Quark-Gluon Chromomagnetic Interaction and High Energy ρ -meson electroproduction,
Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра», Т.10 (2013) 8-17
2. N. Kochelev, N. Korchagin,
Anomalous Quark Chromomagnetic Moment and Single-Spin Asymmetries,
Physics Letters B **729** (2014) 117-120
 3. N. Kochelev, N. Korchagin,
Anomalous quark chromomagnetic moment and dynamics of elastic scattering,
Physical Review D **89** (2014) 034028-5
 4. N.Korchagin, N.Kochelev, N.Nikolaev,
Anomalous quark-gluon chromomagnetic interaction and helicity amplitudes of high energy ρ -meson electroproduction,
Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement **6** (2013) 251-256
 5. N.S.Korchagin, N.I.Kochelev, Anomalous nonperturbative quark-gluon chromomagnetic interaction and spin effects in high energy reactions,
DSPIN-13 proceedings, 75-78; arXiv:1402.3101[hep-ph]